

# RECOMMANDATIONS SOLCYP POUR LE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES

## SOLCYP RECOMMENDATIONS FOR DESIGNING PILES UNDER CYCLIC LOADING

Alain PUECH<sup>1</sup>, Jacques GARNIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FugroGeoConsulting, Nanterre, France

<sup>2</sup> IFSTTAR, Nantes, France

**RÉSUMÉ** – Le projet national SOLCYP s'est attaché à améliorer les connaissances sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques et à proposer des procédures permettant la prise en compte de l'effet des cycles dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil ou maritime. Les résultats du projet sont synthétisés sous forme d'un ouvrage de « Recommandations » dont le contenu est résumé ci-après.

**ABSTRACT** – The SOLCYP Joint Industry Project was aimed at investigating the response of piles under cyclic loading and proposing procedures to account for cyclic effects in designing foundations for civil engineering or maritime structures. Results of the project are gathered in a book of "Recommendations", the content of which is summarized hereafter.

### 1. Introduction

L'industrie pétrolière a développé des procédures pour prendre en compte les effets des fortes houles sur les fondations des structures offshore. Elles sont explicitées dans des codes ou recommandations professionnelles (API RP 2GEO, 2011; ISO 19901-4, 2003). L'industrie éolienne adapte progressivement ces procédures au cas des éoliennes offshore (DnV-OS-J101, 2011, 2014; BSH, 2007, 2011).

Parallèlement et de manière surprenante, l'effet des sollicitations cycliques sur le comportement des fondations est largement ignoré dans le champ d'activité de la construction. Il existe quelques exceptions notoires (liquéfaction des sols sous séismes, fatigue des chaussées) mais d'une manière générale, il n'y a pas - sur le plan national, ni au niveau européen (CEN) ou international (ISO) - de document spécifique (norme, texte réglementaire, recommandation professionnelle) traitant explicitement des risques liés aux sollicitations cycliques et proposant une approche méthodologique pour les prendre en compte dans le dimensionnement des fondations. Cette lacune technique et réglementaire est de plus en plus ressentie au moment où apparaissent de nouveaux types de structures ou infrastructures liées aux récents développements dans le domaine de l'énergie, du transport et du génie industriel.

Les recommandations SOLCYP proposent une approche méthodologique et des méthodes de calcul pour prendre en compte les effets des charges variables dans le dimensionnement des fondations sur pieux.

Elles s'appuient sur des expérimentations en laboratoire et en vraie grandeur et des modélisations conduites dans le cadre du projet SOLCYP. Les sollicitations dynamiques dans lesquelles des effets inertiels se manifestent ont été exclues de cette recherche.

## 2. Le projet SOLCYP

Le projet SOLCYP comporte deux volets : un volet- dit ANR-SOLCYP- qui a obtenu un financement auprès de l'Agence Nationale de la Recherche et un volet - dit PN-SOLCYP - organisé sous forme de Projet National. Les travaux expérimentaux se sont déroulés de mi-2008 à fin 2013 et l'élaboration des Recommandations s'est poursuivie jusqu'en 2015.

Le contenu scientifique et technique du projet ANR-SOLCYP s'articule autour de cinq tâches : 1) caractérisation expérimentale du comportement monotone et cyclique de deux sols de référence : une argile et un sable ; 2) expérimentations sur le comportement des interfaces sol-pieu : interfaces sol-acier pour caractériser le comportement des pieux battus et interfaces sol-béton pour caractériser le comportement des pieux forés ; 3) essais en chambre d'étalonnage et en centrifugeuse pour appréhender la réponse globale du système sol-pieu sous chargements cycliques ; 4) développement de différentes approches numériques pour modéliser le comportement cyclique des pieux ; 5) proposition de procédures et méthodes de calcul pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques. Le rapport final ANR-SOLCYP de septembre 2013 synthétise les résultats obtenus.

L'objectif essentiel du PN-SOLCYP était d'établir une base expérimentale de données d'essais de pieux à grande échelle pouvant servir de référence pour la validation des méthodologies développées dans le cadre du programme ANR-SOLCYP.



**Figure 1.** Installation de pieux battus et forés sur le site de Merville



**Figure 2.** Dispositif de chargement des pieux pour essais cycliques alternés

### 2.1 Essais de pieux in situ sous charges axiales

Des essais in situ de pieux sous chargement axial ont été conduits sur deux sites expérimentaux. Le premier site est à Merville dans le Nord de la France où se rencontre près de la surface la formation d'argile des Flandres. Dix pieux ont été installés sur ce site : quatre pieux tubulaires métalliques fermés à leur base, quatre pieux forés CFA et deux pieux dits vissés. La longueur des pieux était de 13,5m et les diamètres de respectivement 406mm pour les pieux battus et 420mm pour les pieux forés ou vissés. Les pieux étaient équipés d'extensomètres amovibles de type LCPC permettant la mesure des efforts axiaux tous les mètres. Les pieux ont été soumis à des séries de chargements incluant des chargements statiques conventionnels (par incréments de charge maintenus une heure), des chargements monotones rapides et des chargements cycliques. Ces derniers comprenaient des essais conduisant à la rupture après un

nombre limité de cycles de grande amplitude et des essais à faible amplitude allant jusqu'à plusieurs milliers de cycles ( $N > 10\,000$ ). Tous les modes de chargement ont été appliqués : tension, compression, répétés, alternés.

Le deuxième site était à Loon-Plage, près de Dunkerque où la formation de sables des Flandres est affleurante. Deux pieux métalliques battus fermés à leur base, de 13,5m de long et 406mm de diamètre, et cinq pieux forés à la tarière creuse, de 420mm de diamètre et de longueurs 8 ou 10,5m, ont été testés. Un programme de chargement similaire dans son esprit à celui de Merville leur a été appliqué en mars 2012.

## **2.2 Essais de pieux modèles sous charges axiales**

Des séries d'essais en macrogravité ont été conduites sur des matériaux de référence (sable de Fontainebleau et argile Speswhite) dans la grande centrifugeuse de l'IFSTTAR à Nantes. L'objectif principal était d'établir des diagrammes de stabilité cyclique pour : 1) différentes conditions de sols (sables denses et moyennement denses, argiles molles et raides) ; 2) différentes méthodes d'installation : forage et battage ; 3) différents modes de chargement : tension, compression, cyclique répété, cyclique alterné.

Parallèlement, des essais de pieux modèles fortement instrumentés ont été réalisés dans la grande chambre d'étalonnage du Laboratoire 3SR de l'Université Grenoble - Alpes. Ces essais menés en collaboration avec l'Imperial College de Londres ont permis de recueillir des données de grande précision sur la mobilisation du frottement à l'interface pieu – sable et son évolution en cours de cyclage.

## **2.3 Essais de pieux modèles sous charges latérales**

L'effet des chargements cycliques latéraux n'a été abordé que par le biais d'essais en macrogravité. Seul le comportement de pieux flexibles a été simulé dans la centrifugeuse IFSTTAR mais en exploitant les résultats de travaux réalisés par d'autres auteurs les données obtenues ont pu être étendues aux cas de pieux de différentes rigidités relatives. Des séries de chargements répétés et alternés ont été conduites sur des pieux modèles moulés dans du sable de Fontainebleau moyennement dense et dense et dans de l'argile Speswhite normalement consolidée et surconsolidée. L'objectif principal était l'évolution des déplacements du pieu et des moments de flexion sous l'effet des cycles ainsi que la dégradation des réactions mobilisées dans le sol.

## **3. Les Recommandations SOLCYP**

Le présent document a pour ambition de :

- décrire les phénomènes physiques gouvernant la réponse des pieux soumis à des sollicitations cycliques axiales ou latérales ;
- exposer la méthodologie de dimensionnement des pieux sous chargements cycliques développée dans le cadre du projet SOLCYP;
- fournir un ensemble de recommandations susceptibles de servir de base pour initier des actions prénormatives en vue de l'introduction de ces nouveaux acquis dans la normalisation nationale ou internationale.

Le document a été rédigé par un petit groupe d'experts impliqués dans le projet SOLCYP. Ces recommandations n'ont pas de caractère normatif. Toutefois les auteurs ont veillé à ce que le contenu du document soit à la fois compatible et complémentaire avec les normes en vigueur, dans les domaines du génie civil et du génie portuaire et

maritime français (Eurocode 7 ; NF EN 1997 et son annexe nationale NF 94 251- 1/NA ; Eurocode 8 ; NF EN 1998 et ses annexes nationales ; Norme NF P 94 262 – Justification des ouvrages géotechniques / Fondations profondes et dans le domaine de l'industrie offshore internationale (citées dans l'introduction).

Le document comporte 11 chapitres y compris l'Introduction.

- Le chapitre 2 définit le périmètre d'application des Recommandations.
- Le chapitre 3 est consacré à la caractérisation des charges cycliques et aux données requises pour évaluer leurs effets sur des fondations sur pieux.
- Le chapitre 4 traite des phénomènes de dégradation cyclique dans les sols et les interfaces et s'intéresse aux interactions sol-pieu.
- Le chapitre 5 présente la stratégie développée au cours du projet SOLCYP pour aborder le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques.
- Les chapitres 6 et 8 décrivent la phénoménologie du comportement des pieux soumis à des charges cycliques respectivement axiales et latérales.
- Les chapitres 7 et 9 exposent les Recommandations SOLCYP pour la conception et le dimensionnement des pieux sous charges axiales (7) et latérales (9).
- Le chapitre 10 indique comment obtenir les paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement des pieux sous charges cycliques.
- Le chapitre 11 fournit des recommandations pour la réalisation d'essais de pieux sous chargements cyclique (essais d'aide au dimensionnement ou de contrôle)

Dans le cadre de la présente communication, on se limitera à décrire la méthodologie d'approche SOLCYP et à illustrer quelques aspects particuliers.

#### 4. La méthodologie SOLCYP

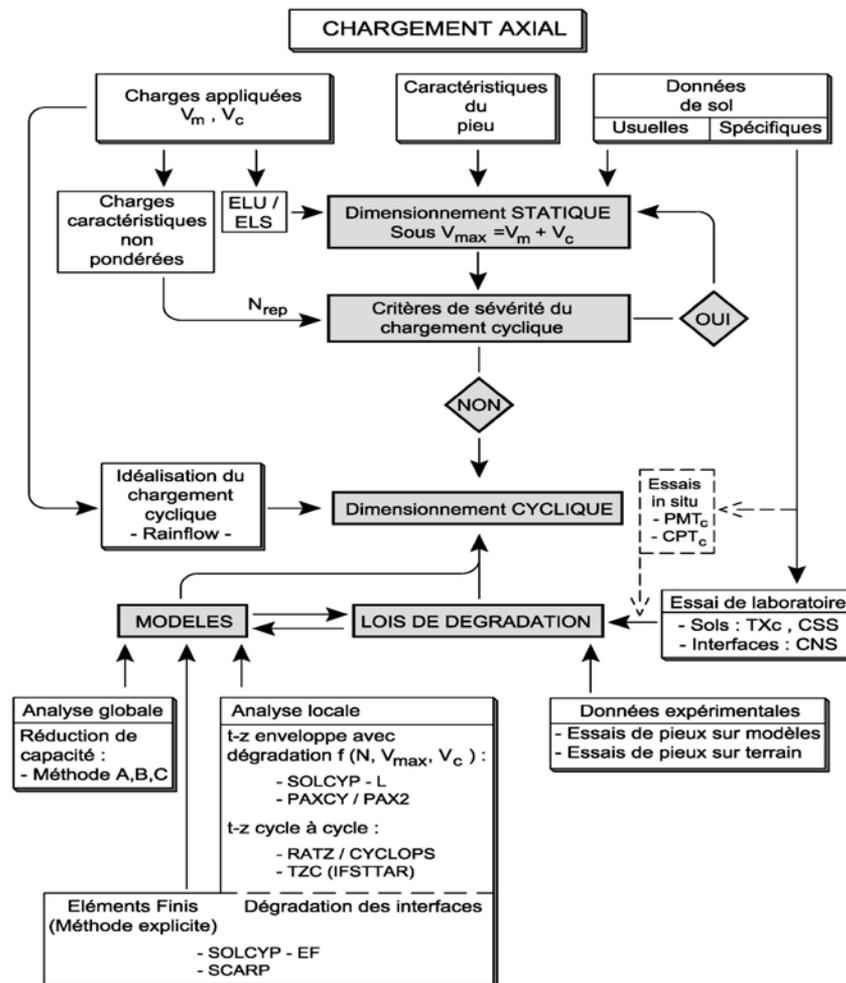
Le dimensionnement d'un pieu soumis à des chargements cycliques peut faire appel à des procédures relativement complexes qui ne font pas toujours nécessairement partie de la pratique quotidienne. On a pris le parti de proposer différentes approches correspondant à des niveaux de complexité croissante, et de développer des critères pour déterminer le niveau d'analyse le plus approprié selon le cas considéré.

Le relatif succès des méthodes courantes d'ingénierie (qui ignorent le plus souvent les effets potentiels des chargements cycliques) montre que, dans bien des cas, les effets des chargements cycliques peuvent être couverts par l'utilisation de coefficients de sécurité suffisants. Cependant, pour certains types de chargements cycliques, les méthodes courantes peuvent être mises en défaut.

La procédure générale SOLCYP applicable au dimensionnement des pieux sous chargements axiaux et transversaux est synthétisée sous forme de diagrammes, tel que celui de la Figure 3 applicable au cas des pieux sous charges axiales. Chacune des étapes mentionnées dans les procédures est explicitée dans les paragraphes suivants.

- Le principe est le suivant : 1) le pieu est dimensionné sous charges statiques selon les procédures usuelles et les réglementations en vigueur ; 2) les charges non pondérées sont décomposées en composantes moyennes ( $Q_m$ ) et en composantes cycliques ( $Q_c$ ) en suivant une procédure compatible avec l'Eurocode 7 ; 3) le nombre de cycles représentatif de l'évènement cyclique considéré  $N_{rep}$  est estimé ; 4) les effets potentiels sur le système sol-pieu considéré du chargement cyclique de projet caractérisé par ( $Q_m$  ;  $Q_c$  ;  $N_{rep}$ ) sont évalués par référence à des critères de sévérité (voir paragraphe 5 ci-après) ; 5) si les effets sont mineurs, le dimensionnement statique est validé ; 6) si les effets sont jugés significatifs, il convient de procéder à un dimensionnement cyclique. La mise en œuvre d'un dimensionnement cyclique nécessite deux types de données spécifiques :
- l'établissement d'un chargement cyclique idéalisé (voir paragraphe 6 ci-après) ;

o l'obtention de paramètres de dégradation cyclique (voir paragraphe 7 ci-après). Ces données sont ensuite utilisées comme entrées dans des modèles d'analyse du comportement du système sol-pieu. Il peut s'agir d'analyses globales ou d'analyses locales (voir paragraphe 8 ci-après)



**Figure 3.** Procédure SOLCYP pour le dimensionnement des pieux sous chargement cyclique axial (dans ce cas  $Q=V$ )

## 5. Critères de sévérité cyclique

Le diagramme de stabilité cyclique - dit aussi diagramme d'interaction - constitue un outil pratique pour déterminer si les charges cycliques axiales appliquées en tête de pieu peuvent s'avérer critiques pour la configuration sol-pieu envisagée. Le concept introduit par Poulos (1988) est supposé connu.

Pour évaluer la sévérité d'un chargement, on peut comparer la combinaison de charges à l'ELU/ELS définie par son point de fonctionnement ( $Q_m/Q_{us}$  et  $Q_c/Q_{us}$ ) à des lignes spécifiques du diagramme ( $Q_{us}$  désigne la résistance limite statique). Deux lignes sont particulièrement intéressantes à ce stade :

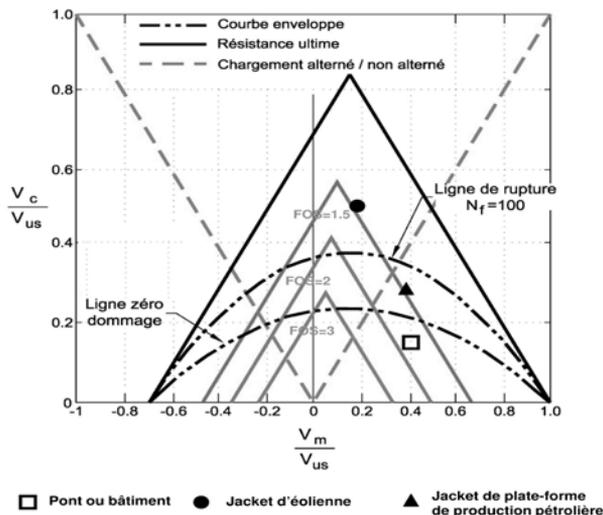
- la ligne de zéro-dommages : à l'intérieur du domaine défini par cette ligne, les chargements cycliques provoquent des déplacements permanents non significatifs de la tête du pieu et n'affectent pas la capacité ultime.

- la ligne de rupture pour un nombre de cycles représentatif de l'événement considéré  $N_{rep}$ . Le choix de  $N_{rep}$  doit être fait avec discernement. Pour des événements cycliques de type tempête, la valeur  $N_{rep} = 100$  pourra être retenue. Pour des événements plus

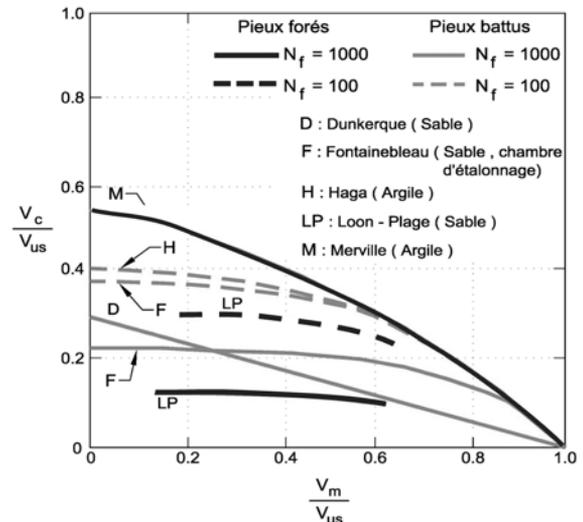
réguliers mettant en jeu de très grands nombres de cycles (tels que efforts de marées, éoliennes en service), des valeurs de  $N_{rep}$  plus élevées pourront être à considérer.

Dans l'exemple présenté sur la Figure 4 :

- le point représentatif d'un chargement de pont se situe au-dessous de la ligne de zéro-dommagement : aucune analyse cyclique n'est nécessaire.
- le point représentatif d'un chargement de jacket de plate-forme de production pétrolière se situe suffisamment loin de la ligne  $N_f=100$  pour ne pas avoir recours à une analyse cyclique pour autant que la confiance dans la représentativité du diagramme utilisé soit bonne.
- le point représentatif d'un chargement d'éolienne offshore indique que, bien qu'un coefficient global de sécurité de 1.5 soit assuré, la stabilité vis-à-vis des chargements cycliques est critique. Un redimensionnement du pieu s'impose.



**Figure 4.** Degrés de sévérité cyclique pour plusieurs fondations



**Figure 5.** Lignes de zéro-dommagement et de rupture à  $N_f=100$ - Essais en traction- (SOLCYP, NGI, ICL)

Le diagramme de stabilité cyclique n'étant pas unique, il convient de se référer à un diagramme représentatif 1) du type de sol considéré (sable, argile), de son état (densité, consistance) et de son histoire (degré de consolidation) ; 2) du type de pieu et de son mode de mise en place (métallique battu, foré simple, etc.). Un apport majeur du projet SOLCYP est la construction de diagrammes de stabilité pour différentes combinaisons de types de sols et de types de pieux. La figure 5 regroupe les lignes de zéro-dommagement et de rupture à  $N_f=100$  désormais disponibles pour des essais en traction.

Des critères de sévérité cyclique adaptés ont été développés pour les chargements cycliques transversaux.

## 6. Traitement des charges

Les connaissances actuelles sur le comportement des sols et sur la réponse des pieux sous sollicitations cycliques indiquent clairement que celles-ci doivent être identifiées avec précision pour parvenir à en prévoir les effets. Il est nécessaire de connaître : 1) la valeur moyenne de la charge appliquée et sa possible évolution au cours du chargement ; 2) l'amplitude du chargement cyclique: celle-ci a, en général, un caractère aléatoire et varie d'un cycle à l'autre. Des simulations temporelles, telles qu'usuellement pratiquées dans

l'industrie offshore, sont nécessaires pour déterminer l'histogramme des charges pendant la durée de l'événement; 3) la fréquence type des chargements.

La connaissance de l'histogramme des charges n'est pas à elle seule suffisante pour étudier les effets des charges cycliques sur une fondation. Pour cela, les chargements aléatoires doivent être traités pour fournir des chargements idéalisés, caractérisés par des paquets de  $N_i$  cycles d'amplitude et de période constantes. Les techniques de type "rainflow analysis" permettent de transformer les événements aléatoires en séries ordonnées de cycles. Un logiciel dédié nommé "Cascade " a été développé dans le cadre du projet (Héricher, 2012). La procédure de traitement des charges cycliques est résumée sur la figure 6.



**Figure 6.** Prise en compte d'un chargement cyclique dans le dimensionnement des fondations

## 7. Obtention des paramètres de dégradation cyclique

L'effet néfaste des cycles sur un système sol-pieu se traduit essentiellement par une réduction de la résistance (frottement) dans le cas de charges axiales et une accumulation des déplacements irréversibles de la tête du pieu (axiaux ou transversaux).

Les paramètres caractérisant la dégradation cyclique peuvent être obtenus à partir :

- d'essais de pieux in situ ou sur modèles (chambre d'étalonnage, centrifugeuse) : le chapitre 11 recommande des procédures d'essais.
- d'essais de laboratoire : c'est la voie la plus développée du fait de son application généralisée en travaux offshore. On décrit au chapitre 10 les différents types d'essais disponibles, en précisant les modes opératoires et les limites de chaque essai.
- d'essais in situ (pressiomètre ou pénétromètre cycliques): cette voie est encore peu développée.

## 8. Méthodes d'analyse

Trois types d'approches correspondant à des niveaux de complexité croissante sont à la disposition du concepteur: des approches "globales", des approches "locales", et des approches par la méthode des éléments finis.

Les approches "globales" ne s'intéressent qu'au comportement "global" du pieu. On peut citer la méthode ABC pour l'évaluation de la dégradation de la capacité portante (cas des charges axiales). Une méthode originale, dans le cas des charges transversales, a été développée dans SOLCYP pour évaluer l'accumulation des déplacements permanents de la tête du pieu sous l'effet des cycles et l'évaluation du moment maximum dans le pieu.

Dans les approches "locales", la relation entre la contrainte appliquée à l'interface sol-pieu et le déplacement local du pieu s'exprime au moyen d'une courbe de transfert (courbes "t-z" ou "p-y"). Les apports du projet SOLCYP sont :

- un module de dégradation cyclique SOLCYP-DEG, basé sur une banque de données d'essais d'interface à rigidité normale imposée (essais CNS dans du sable), permettant de construire des courbes « t-z cycliques », c'est-à-dire prenant explicitement en compte l'effet de la sévérité des cycles et du nombre de cycles. L'appellation t-z cyclique englobe le concept de courbes cycliques enveloppes (telles que proposées par API ou ISO) et de courbes cycle à cycle (logiciel TZC).

- la confrontation des méthodes proposées aux résultats des essais de pieux in situ de Loon-Plage/Dunkerque ;

- la revue des logiciels existants : PAXCY (NGI, argiles) ; SCARP (Poulos, sables) ; RATZ/CYCLOPS (Randolph, UWA)

- la proposition de courbes-enveloppes p-y cycliques pour les sables.

Les travaux conduits dans le cadre de SOLCYP ont montré que les méthodes d'analyse par Eléments Finis de type « implicite » dans lesquelles chaque cycle est décrit pas à pas par une loi constitutive complète n'étaient pas utilisables en pratique. Une approche de type « explicite » dans laquelle le comportement de l'interface est géré par des éléments spéciaux dont le comportement est déterminé par le module SOLCYP-DEG a été conduite avec succès dans le cas d'un pieu foré chargé axialement. Le cas des pieux battus reste encore délicat à traiter.

Ces approches sont décrites dans le chapitre 7 pour les chargements axiaux et dans le chapitre 9 pour les chargements latéraux.

## 9. Remerciements

Le PN-SOLCYP a regroupé treize acteurs des secteurs du génie civil et de l'énergie : BOTTE FONDATIONS, EDF, EDF-EN, FRANKI FONDATION, FUGRO, IHC, MENARD, SAIPEM, SOCOTEC, SOLETANCHE-BACHY, SUBSEA 7, TERRASOL, TOTAL ainsi que les laboratoires et instituts de recherche impliqués dans le programme ANR-SOLCYP : GeM (Ecole Centrale Nantes), IFSTTAR , LGCgE (Univ. de Lille), LTDS (Ecole Centrale Lyon), Navier-Géotechnique (Ecole des Ponts-ParisTech), 3S-R (Univ. Grenoble-Alpes).

Le PN-SOLCYP a été soutenu financièrement par le ministère du développement durable (MEDDE) et la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP). Il a été labellisé par le Pôle Ecoconstruction (Pays de la Loire) et a reçu le soutien financier de la région Pays de la Loire via son réseau R2GC.

Le projet national SOLCYP était piloté par l'IRESX. Le Président du projet était : Alain PECKER (GDS), et le Directeur Technique : Alain PUECH (Fugro ).

Le Pr. Richard JARDINE de l'Imperial College, Londres et le Pr. Alain HOLEYMAN de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve ont apporté leurs conseils et expertise.

Le comité de rédaction des Recommandations était piloté par A.PUECH (Fugro) et J. GARNIER (Directeur de Recherche Emérite). Ses membres étaient: M. BEN AMOR (Fugro) ; M. BOULON (Univ. Grenoble-Alpes) ; S. BURLON (Ifsttar) ; J. CANOU (Navier/Cermes) ; L. CARPINTEIRO (Socotec) ; C. DANO (Ecole Centrale Nantes/GeM) ; J.P. IORIO (Saipem), A. LE KOUBY (Ifsttar) ; E. PALIX (EDF-EN) ; Ph. REIFFSTECK (Ifsttar) ; F. ROSQUOËT (Univ. Compiègne) ; L. THOREL (Ifsttar).

## 11. Références bibliographiques

Les références complètes et une sélection des publications SOLCYP sont librement accessibles sur [www.pnsolcyp.org](http://www.pnsolcyp.org) ou [www.cfms-sols.org](http://www.cfms-sols.org) :

Design for cyclic loading: piles and other foundations, *Proceedings of TC209 Workshop*, 18<sup>th</sup> ICSMGE, Paris, 04 Sept. 2013.