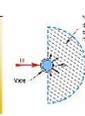
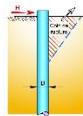
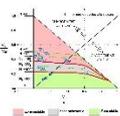
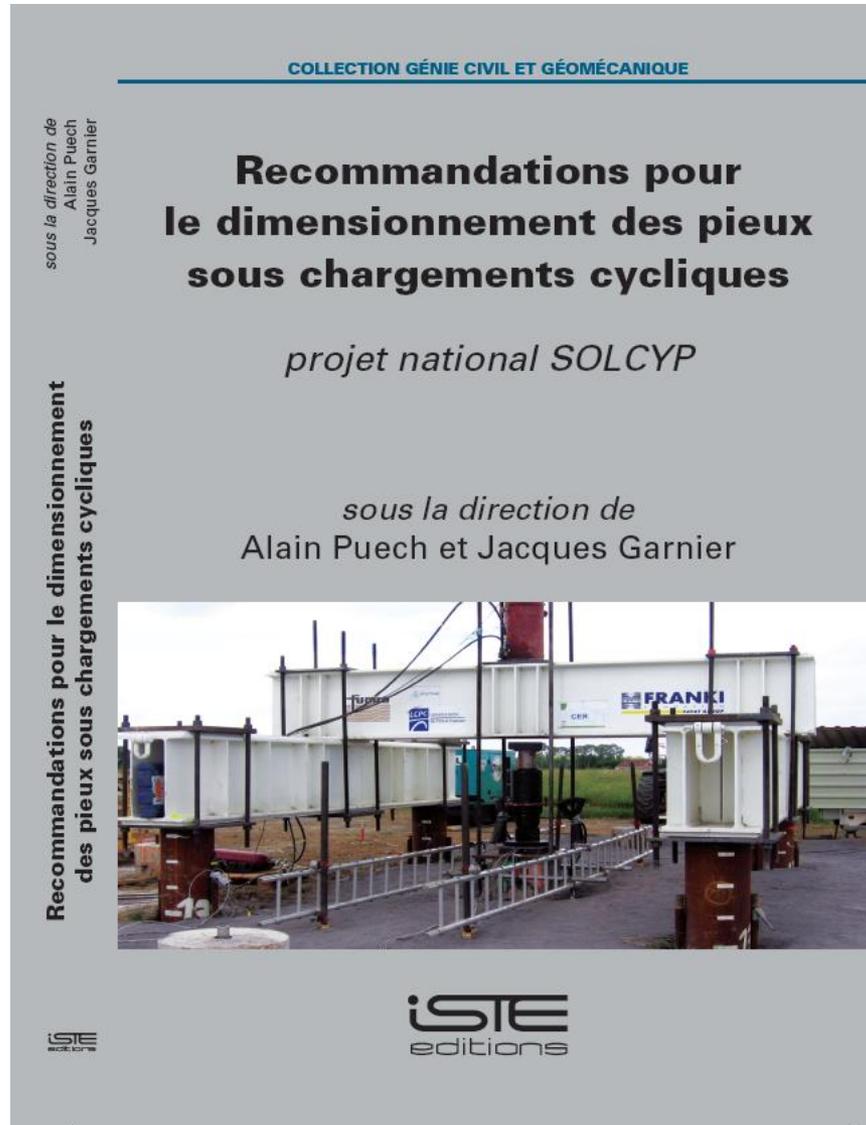


Structure des Recommandations

Jean-Pierre IORIO, Saipem

Lundi 13 mars 2017, Paris

SOLCYP – Journée de restitution



► Hommage

Ouvrage dédié au Pr. Pierre FORAY (*Université de Grenoble Alpes*)

Qui nous apporté de précieux conseils,
Et qui reste très présent dans notre mémoire.



► Le projet SOLCYP

- Rappel du contexte
- Ouvrages concernés / Périmètre d'application
- Objectifs des recommandations / Organisation

► Structure du document

- Plan général
- Principaux sujets traités

► Conclusion

- Apport SOLCYP
- Perspectives de développement



► Rappel du contexte

- Méthodes de dimensionnement existantes limitées au domaine offshore (cf. recommandations API)
- Méthodes forfaitaires ne permettant pas la prise en compte des spécificités du chargement cyclique considéré (amplitude et/ou nombre de cycles) → sécurité non maîtrisée
- Récents développements dans le domaine de l'énergie, du transport et du génie industriel (éoliennes offshore, etc.)
- Besoin exprimé (dans le cadre du "Pôle de Compétence Sol" de l'IREX) de combler partiellement les lacunes techniques et réglementaires en la matière



► **Ouvrages concernés** (*non exhaustif*)

- Structures pétrolières fixes ou flottantes
- Fondations d'éoliennes offshore (monopieux, multipodes)
- Projets maritimes ou portuaires (digues, jetées, murs de quai)

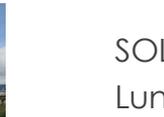
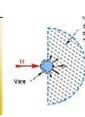
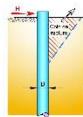
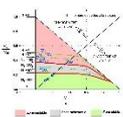
- Ouvrages d'art (ponts ferroviaires)
- Bâtiments et tours de grande hauteur
- Structures support légères et élancées (pylônes électriques, éoliennes terrestres, cheminées, grues à tour)

- Terminaux de réception (ou exportation) de GNL
- Réservoirs de stockage (cycles de vidange-remplissage)



► Périimètre d'application

- Développement de méthodes de dimensionnement des systèmes sol-pieu (axial / latéral), prenant en compte la dégradation de la résistance et de la rigidité sous l'effet des cycles.
- Aspects non traités dans le document:
 - Effets du séisme,
 - Machines vibrantes (actions dynamiques /fréquences élevées),
 - Fatigue des superstructures,
 - Interactions sol-structure.



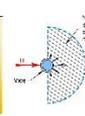
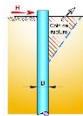
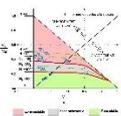
► Objectifs des recommandations

- **Compréhension** des phénomènes mis en jeu lors d'un chargement cyclique de pieu (sol + interface sol-pieu)
- Basée sur l'interprétation de **nombreux essais**:
 - Essais de laboratoire et sur modèles physiques
 - Essais de chargement de pieu en vraie grandeur
- **Approche méthodologique** et **méthodes de calcul** pour la prise en compte des effets des charges variables
- Recommandations en matière d'**essais et contrôles** (pieu sous chargement cyclique en phase conception ou exécution)



► Organisation

- Aboutissement du **PN SOLCYP**
- Document élaboré dans la période 2012-2016 par un groupe de travail spécifique s'appuyant sur:
 - Revue de littérature internationale,
 - Données expérimentales SOLCYP,
 - Études complémentaires IFSTTAR, L 3S-R, Fugro GeoConsulting.
- Fruit d'une harmonieuse collaboration:
 - Laboratoires ou instituts de recherche,
 - Organismes industriels,
 - Bureau de contrôle.



► Organisation (suite)

- **Direction de la rédaction:** A. Puech & J. Garnier
- **Animation:** J.P. Iorio (*Saipem*)
- **Membres:** M. Boulon (*L 3S-R*), S. Burlon (*IFSTTAR*),
 J. Canou (*Ponts, Navier-géotechnique*), L. Carpinteiro (*SOCOTEC*)
 C. Dano (*Ecole Centrale Nantes, GeM*), A. Le Kouby (*IFSTTAR*),
 M. Khemakhem (*Fugro GeoConsulting*), E. Palix (*EDF-EN*),
 P. Reiffsteck (*IFSTTAR*), F. Rosquoët (*Université Compiègne*),
 L. Thorel (*IFSTTAR*).

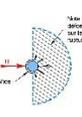
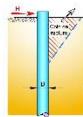
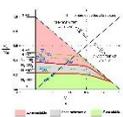


► Organisation (suite)

- **Comité de relecture:**

Pr. A. Holeyman (*Université de Louvain-la-Neuve, Belgique*),
A. Pecker (*Ecole des ponts ParisTech*), B. Simon (*Terrasol*)

- **Figures:** M. Anic Antic (*Terrasol*)



La structure du document s'articule autour de cinq entités correspondant à l'enchaînement logique des tâches d'ingénierie :

- ▶ **Présentation générale du projet** (Ch. 1 + 2)
- ▶ **Notions fondamentales** (Ch. 3 + 4)
- ▶ **Approche méthodologique** (Ch. 5)
- ▶ **Description des mécanismes et méthodes de calcul**
Chargement axial (Ch. 6 + 7) / Chargement latéral (Ch. 8 + 9)
- ▶ **Essais de sol et essais de chargement de pieux** (Ch. 10 + 11)

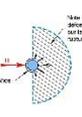
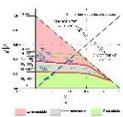


► Présentation générale du projet

Ch. 1 – Le projet SOLCYP et

Ch. 2 – Périmètre et domaine d'application

- Enjeu et motivations / Organisation du projet
- Contenu du document / Contexte réglementaire
- Ouvrages concernés / Effets sur les fondations
- Types de sols / Types de pieux

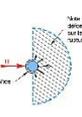
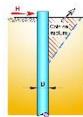
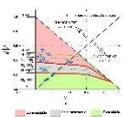


► Notions fondamentales

Ch. 3 – Charges cycliques *et*

Ch. 4 – Introduction à la dégradation cyclique

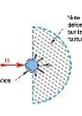
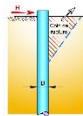
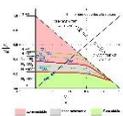
- Caractérisation des chargements cycliques
- Chargement cyclique réel → chargement idéalisé régulier
- Processus de dégradation: effet sur les propriétés des sols, sur l'interface sol-pieu, et sur la réponse des pieux (axial / latéral)
- Diagramme de stabilité cyclique
- Influence de la rigidité relative sol-pieu



► Approche méthodologique

Ch. 5 – Stratégie SOLCYP

- Procédure d'analyse permettant de déterminer le niveau d'étude approprié en fonction du degré de sévérité du cas étudié
- Procédure synthétisée sous forme de logigrammes (axial / latéral)
- Critères de sévérité cyclique (axial / latéral)
- Méthodes de dimensionnement: globales / locales / éléments finis



► Description des mécanismes et méthodes de calcul

Ch. 6 – Comportement des pieux sous chargements cycliques axiaux

Ch. 7 – Dimensionnement des pieux sous charges cycliques axiales

- Aspects fondamentaux du comportement des pieux
- Diagrammes d'interaction (type de sol / type de pieu)
- Revue des diverses approches opérationnelles existantes
- Approche SOLCYP (sols non cohérents)
- **Module SOLCYP-DEG** permettant d'évaluer la *dégradation* résultant d'une série de N cycles
- Application à des pieux d'essai représentatifs (battu / foré)



► Description des mécanismes et méthodes de calcul

Ch. 8 – Comportement des pieux s/s chargements cycliques latéraux

Ch. 9 – Dimensionnement des pieux sous charges cycliques latérales

- Réponse des pieux (synthèse des données existantes)
- Règles actuelles API / DNV / ISO (P-Y cycliques)
- **Méthode globale SOLCYP-G** → *déplacement en tête et moment maximum en travée* induits par une séquence de N cycles, avec prise en compte de la rigidité relative sol-pieu
- **Méthode locale SOLCYP-L** → *coefficients d'abattement* des courbes P-Y monotones, déduits des courbes cycliques des essais
- Domaine de validité et exemple d'application



► Essais de sol et essais de chargement de pieux

Ch. 10 – Détermination des paramètres cycliques pour le dimensionnement des pieux *et*

Ch. 11 – Recommandations pour la réalisation d'essais de pieux sous chargement cyclique

- Paramètres requis et **méthodes de détermination** (essais labo)
- Recommandations pour essais spécifiques (non standard)
- **Essais de pieux**: définition de procédures appropriées:
 - Aide au dimensionnement (laboratoire ou in-situ) (*phase conception*)
 - Validation de projet (*début de phase exécution*)
 - Contrôle (*pendant les travaux*)



► Apport SOLCYP

- **Ensemble harmonieux** couvrant toute la chaîne ingénierie
(de la conception à l'exécution)
- **Compréhension** des phénomènes de dégradation
(essais de sol + essais d'interface sol-pieu)
- **Diagrammes de stabilité cyclique** développés pour différents types de sols (sables, argiles) et de pieux (battus, forés)
(apport spécifique pour pieux forés)



► Apport SOLCYP (*suite*)

- **Méthodes de dimensionnement** prenant en compte:
 - la sévérité du chargement cyclique et le nombre de cycles,
 - la rigidité relative sol-pieu.
- ➔ *apport significatif par rapport aux recommandations API*
- ➔ *applications élargies au domaine terrestre*

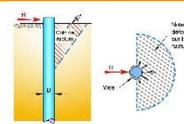
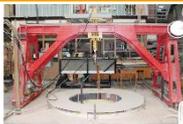
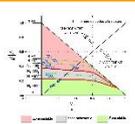
- **Large base expérimentale**
 - *Chargement axial*: essais d'interface sol-pieu
+ pieux in-situ (Loon-Plage + Merville)
 - *Chargement transversal*: essais sur modèle (centrifugeuse)

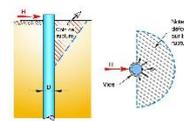
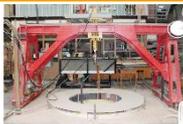
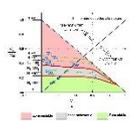


► Perspectives de développement

- **Méthodes de dimensionnement** (élargir domaines de validité)
- **REX projets** (retour d'essais de chargement de pieux)
- **Gamme de sols** élargie (roches tendres, sols carbonatés, SOLCYP+)
- **Monopieux rigides** (éoliennes offshore, nombreux projets en cours dont projet PISA)
- **Essais in-situ** (CPT cyclique + PMT cyclique, PN ARSCOP)







MERCI

À l'IREX pour leur soutien

Et à tous les membres du groupe de rédaction
pour leur persévérance sur ce long projet

