



SOLCYP

**Projet National de recherche sur le
comportement des pieux soumis à des
solicitations cycliques**

- un projet de recherche sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques,
- d'une durée de 4 ans (2008 – 2012)
- piloté par l'**IREX** (Institut pour la Recherche EXpérimentale en Génie Civil)
- comportant deux volets:
 - un projet dit **ANR-SOLCYP** financé par l'Agence Nationale de la Recherche, lancé le 18/06/08, budget: 2,6 M€, labellisé par le **Pôle Génie Civil Ouest (R2GC)**
 - un projet dit **PN-SOLCYP** : Projet National, lancé le 08/12/08, financé par la DRAST (avec participation FNTP), budget 2.4 M€

Des études exploratoires, menées dans le cadre d'un groupe de travail "Sollicitations cycliques en géotechnique" émanant du pôle de compétences "Sols" de l'IREX, ont mis en évidence la pauvreté de la documentation technique française et européenne dans le domaine de la réponse des sols soumis à des sollicitations cycliques (hors sismique) alors même que les textes réglementaires (EUROCODE 7 notamment) recommandent leur prise en compte dans l'ingénierie des fondations et que de nouveaux types de structures (éoliennes par exemple) sont sensibles à cette problématique.

Le projet SOLCYP a pour objectifs de:

- **comprendre les phénomènes** physiques régissant la réponse des pieux soumis à des sollicitations cycliques verticales ou horizontales ;
- **quantifier** l'effet des chargements cycliques sur la réponse et la capacité des pieux ;
- **définir une méthodologie** d'approche du comportement des pieux soumis à des chargements de nature cyclique ;
- développer des **méthodes d'ingénierie** dont la complexité de mise en œuvre devra rester compatible avec la nature des ouvrages et la sévérité des effets cycliques ;
- effectuer un **travail prénormatif** en vue de l'introduction dans la réglementation nationale de la méthodologie proposée et des méthodes de calcul associées.

Les ouvrages concernés incluent notamment :

- les structures supports légères (composante gravitaire faible) telles que par exemple : les pylônes de transport d'énergie, les éoliennes terrestres ou offshore, les hydroliennes, les cheminées et tours de grande hauteur, etc.
- les réservoirs soumis à des cycles de vidange/remplissage,
- les ouvrages d'art supportant les infrastructures de transport, notamment ponts ferroviaires,
- les bâtiments industriels équipés de ponts roulants, machines tournantes, etc.

On s'intéresse dans le cadre du projet:

- à des chargements cycliques verticaux ou horizontaux appliqués en tête des pieux ;
- d'amplitude variable induisant des efforts à caractère alterné (avec inversion du signe de la contrainte de cisaillement) ou répété (sans changement du signe de la contrainte de cisaillement) ;
- dans des gammes de fréquence basse à moyenne (< 5 Hz) sans considération d'effets inertiels ;
- avec des nombre de cycles de l'ordre de 10^2 à 10^3 pour les chargements de nature environnementale (houle, vent,...) ou supérieurs à 10^5 pour les chargements industriels (trains, ponts roulants,...).

- Le développement de méthodes d'ingénierie est l'objectif final du projet SOLCYP (ANR+PN)
- La méthodologie sera du type suivant:

1- **établissement de critères simples** (du type diagramme de fonctionnement cyclique des pieux) permettant de distinguer :

* les cas où les chargements cycliques restent en dessous d'un **seuil critique** ne nécessitant pas une étude spécifique
 (la grande majorité des cas si on se réfère à la pratique existante et à celle de l'offshore courant)

* les cas où la résistance cyclique (ou la déformation cyclique) peuvent être dimensionnantes:

→ étude spécifique est nécessaire.

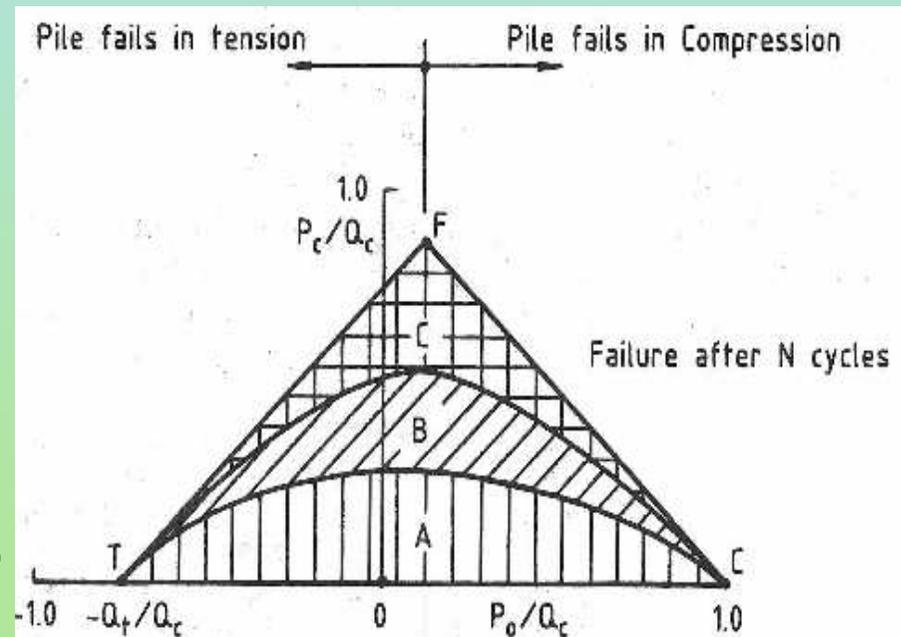


Diagramme de stabilité cyclique

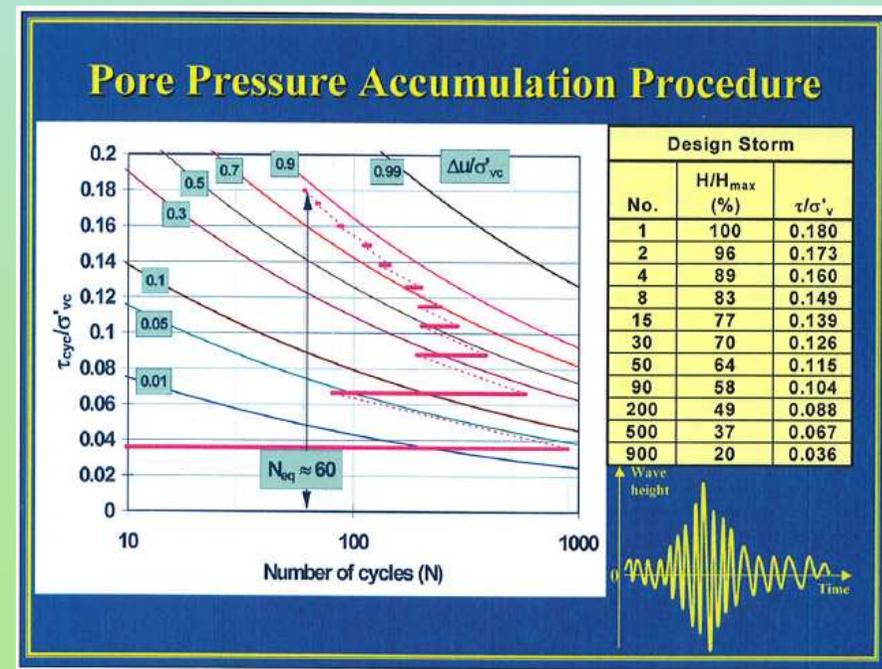
Lorsqu'une étude spécifique est nécessaire, deux cas peuvent se présenter selon la complexité du projet:

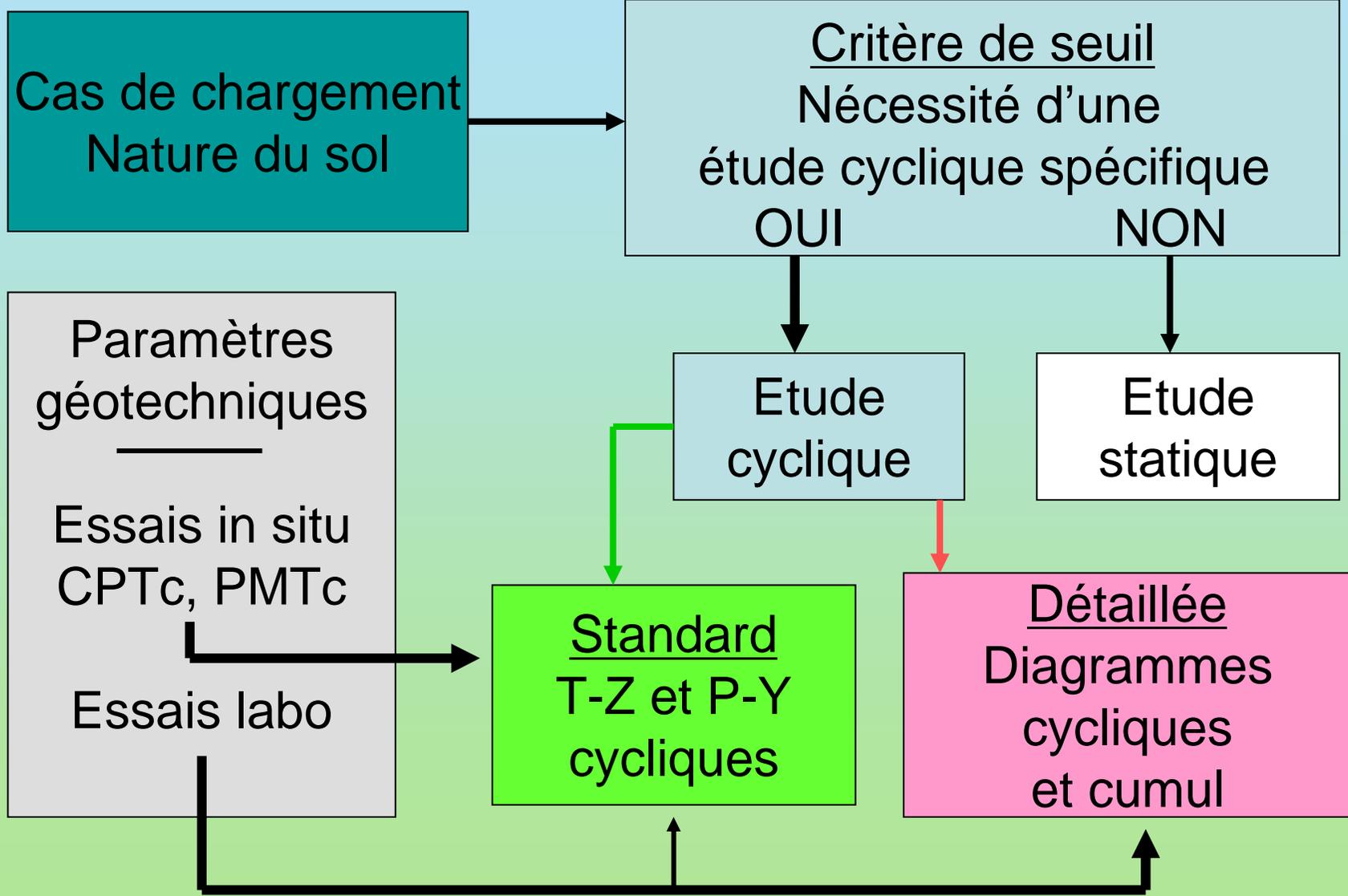
2 - ingénierie standard (le plus souvent suffisant):

- * à base essentiellement d'essais in situ (CPTc ou PMTc)
- * sur le principe de courbes d'interaction sol-pieu de type (t-z)cyclique en vertical et (p-y)cyclique en latéral

3 - ingénierie détaillée (exceptionnel)

- * essais de laboratoire:
 —————> établissement de diagrammes cycliques
- * calcul de la résistance cyclique:
 —————> procédure de cumul des déformations ou Δu
 (comme pratiqué pour les structures offshore)





- Dans le cadre de l'**ANR**
 - Compréhension de la phénoménologie
 - Développement des méthodes de calculs (simplifiées + élaborées)
 - Validation sur les modèles physiques
- Dans le cadre du **PN**
 - Développement d'outils de mesures in situ pour caractériser la réponse cyclique des sols
 - Validation des méthodes de calculs (simplifiées + élaborées) sur les essais sur site

ANR+PN : Elaboration de recommandations pour la future réglementation

P.N.

A.N.R.

Instrumentation de structures:
connaissance des sollicitations

Essais de pieux sur sites expérimentaux

(avec caractérisation complète des sols, mise en place de pieux de différents types, chargements statiques / cycliques)

Essais spéciaux sur chantiers

(selon opportunité)

Essais géotechniques *in situ* pour la détermination des paramètres cycliques des sols:

pénétromètre cyclique, pressiomètre cyclique

Essais de laboratoire:

- essais de comportement
- essais d'interface

Essais sur modèles physiques

- chambre d'étalonnage
- centrifugeuse

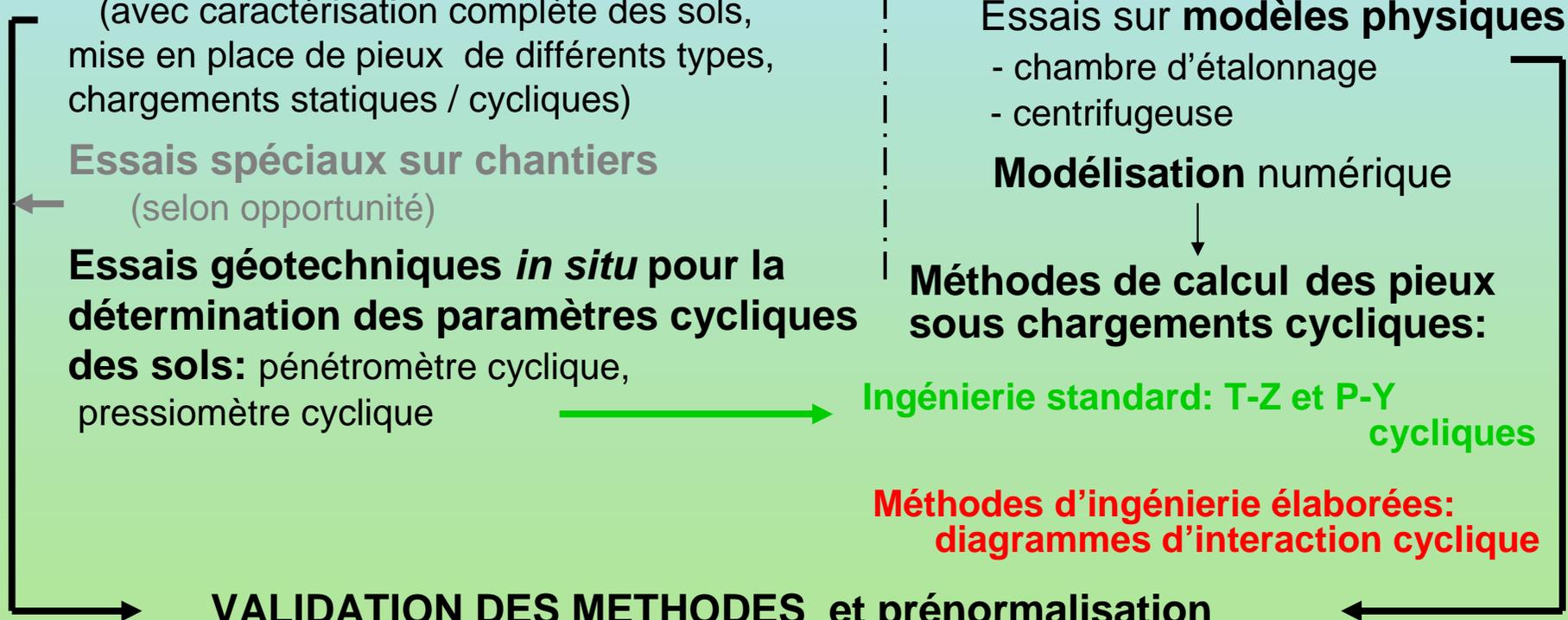
Modélisation numérique

Méthodes de calcul des pieux sous chargements cycliques:

Ingénierie standard: T-Z et P-Y cycliques

Méthodes d'ingénierie élaborées: diagrammes d'interaction cyclique

VALIDATION DES METHODES et prénormalisation

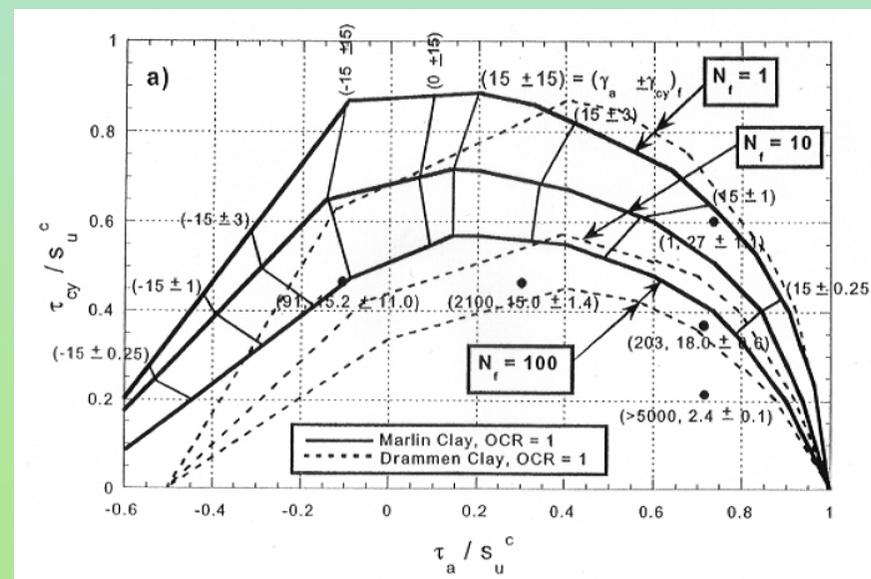
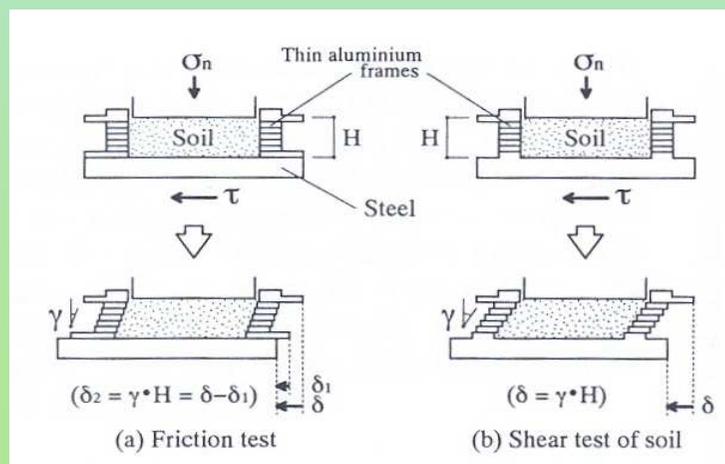


Tâche 1 : Caractérisation expérimentale des sols de référence

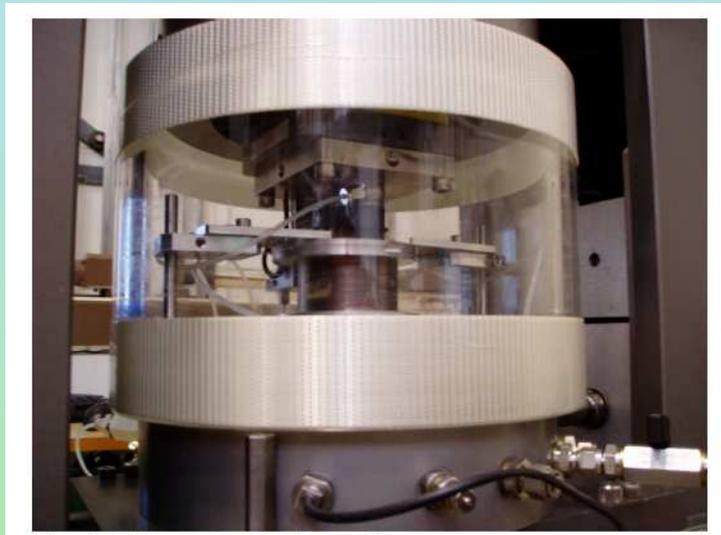
Responsable : C. Dano / GeM

Objectif : caractériser deux sols sous sollicitations monotones et cycliques et fournir les paramètres de base nécessaires aux autres tâches du projet.

- choix d'un **sable (Fontainebleau)** et d'une **argile de référence (Speswhite)**,
- **essais triaxiaux (TX) et de cisaillement simple (DSS) statiques et cycliques**,
- études des paramètres clés : amplitude, fréquence, nombre de cycles, etc.
- synthèse des résultats sous forme de diagrammes-contours, tels que développés pour les études offshore.



Tâche 1 : Caractérisation expérimentale des sols de référence



Appareil DSS du GeM

Triaxial cyclique pour éprouvettes 300mm



Tâche 2 : Expérimentations sur les interfaces

Responsable: J. Canou / CERMES

Objectif : fournir des éléments sur la rhéologie des interfaces soumises à des sollicitations cycliques, en utilisant une approche analogue à celle utilisée pour les sols de référence dans la perspective d'application au frottement des pieux.

Interfaces sol-acier et sol-béton

Trois types de dispositifs expérimentaux :

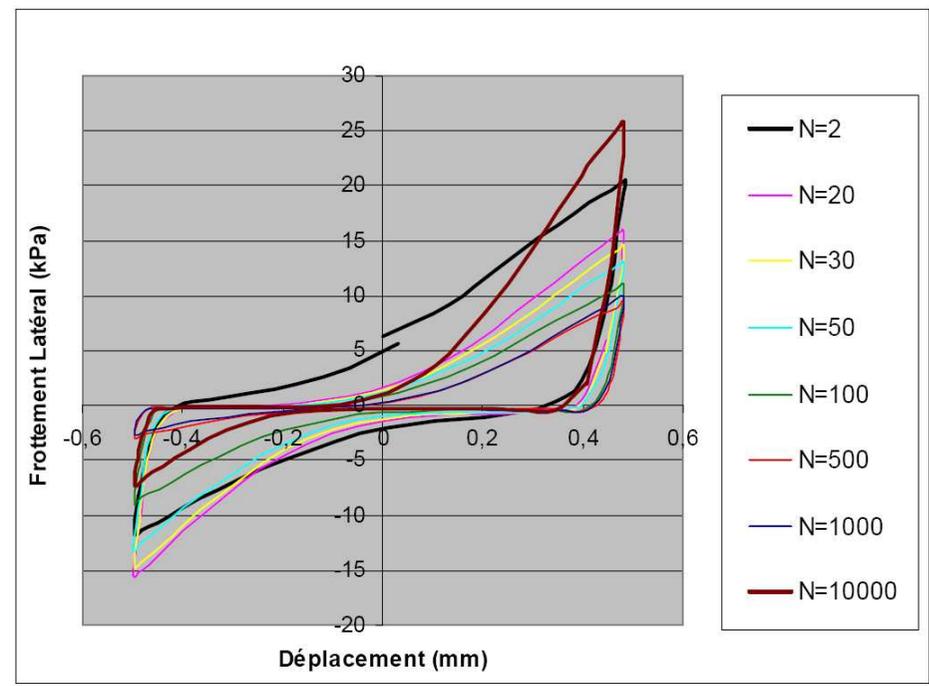
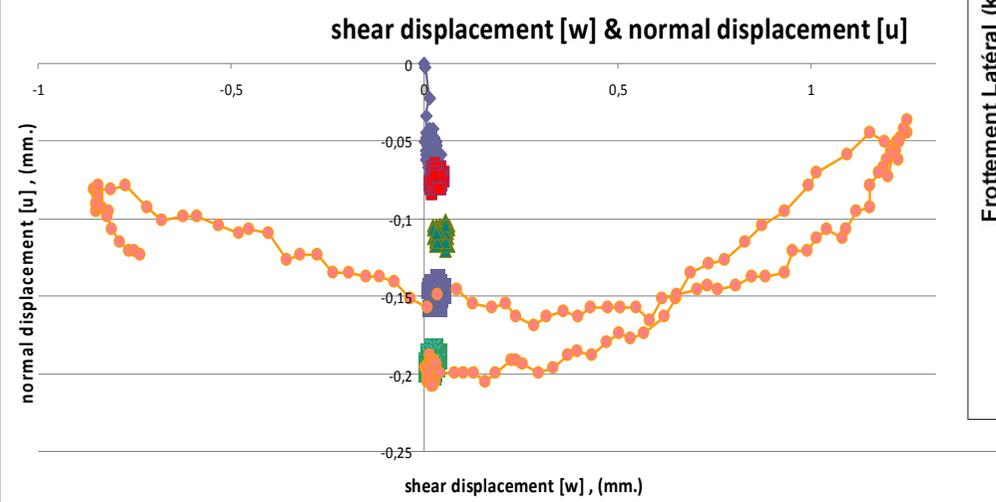
- cisaillement direct linéaire à rigidité imposée
- cisaillement direct annulaire,
- « pieux-sondes » instrumentés en **chambres d'étalonnage**.



Tâche 2 : Expérimentations sur les interfaces

Grand nombre de cycles

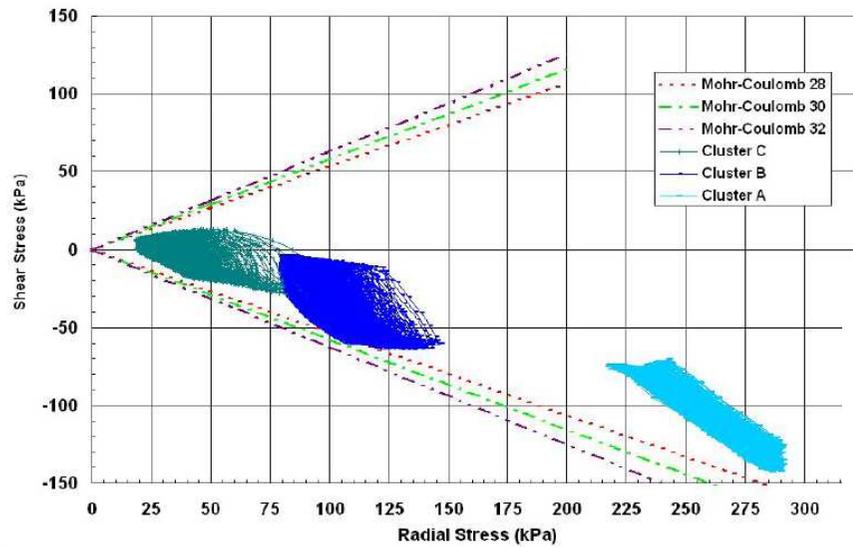
Essais CNS (3S-R)



Test : fncy100de11 ; (Dr=90%) ; $\Delta\tau = 10$ kPa ; $-5 < \tau < 5$ kPa (at the beginning until reaching rupture) ; at rate 0.5 mm./1 min.
 Note : (f ; sand type) , (cn ; constant normal stress) , (cy ; cyclic test) , (d ; dende sample) , (e11 ; number of sample)
 Number of cycles : 1000

Essais en chambre de calibration (Cermes)

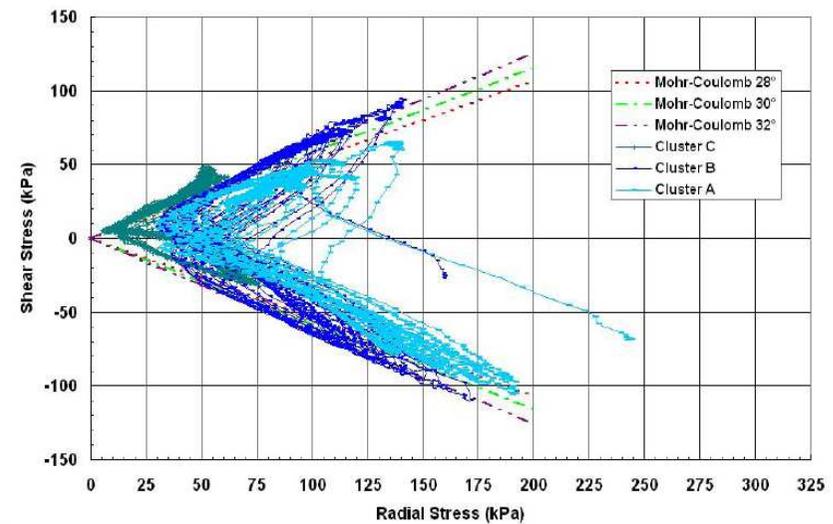
Tâche 2 : Expérimentations sur les interfaces



Cycles de faible amplitude

Pieu en chambre de calibration 3S-R

Chemins de contraintes



Cycles de grande amplitude

Tâche 3 : Comportement du système sol-pieu

Responsable: J. Garnier / LCPC

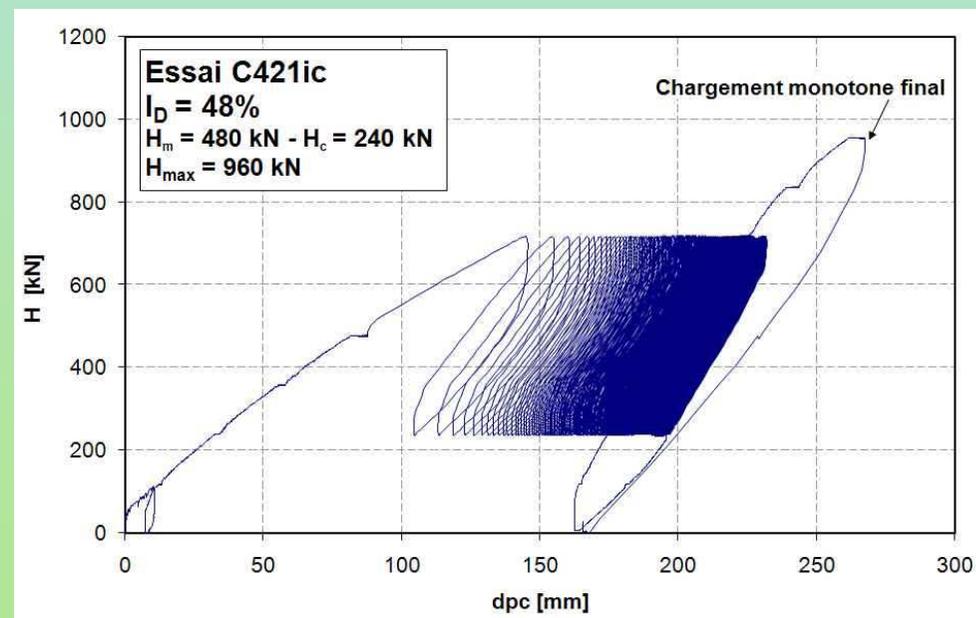
Objectif : passer du niveau local au niveau global sol-pieu.

Essais de chargements cycliques en **centrifugeuse** (LCPC) sur des pieux mis en place dans les deux sols de référence :

- **chargements verticaux** : 6 massifs / 25 essais de chargement.
- **chargements horizontaux** : 15 massifs / 50 essais de chargement.

Les données obtenues seront utilisées pour:

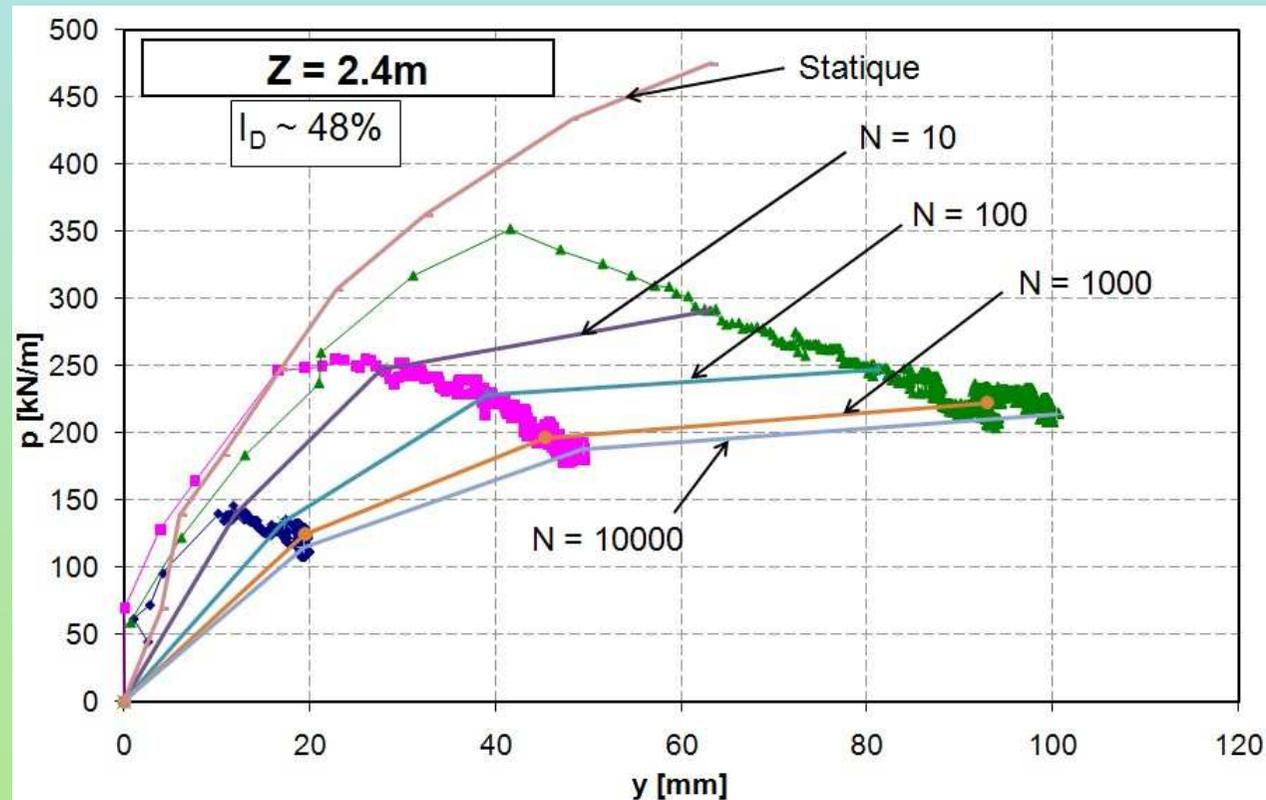
- caler les modèles numériques de comportement d'un pieu sous sollicitations cycliques verticales ou horizontales (Tâche 4).
- élaborer puis valider les méthodes de dimensionnement pratiques (Tâche 5).



Tâche 3 : Comportement du système sol-pieu

Responsable: J. Garnier / LCPC

Exemple de résultat obtenu (thèse de J. Rakotonindriana)

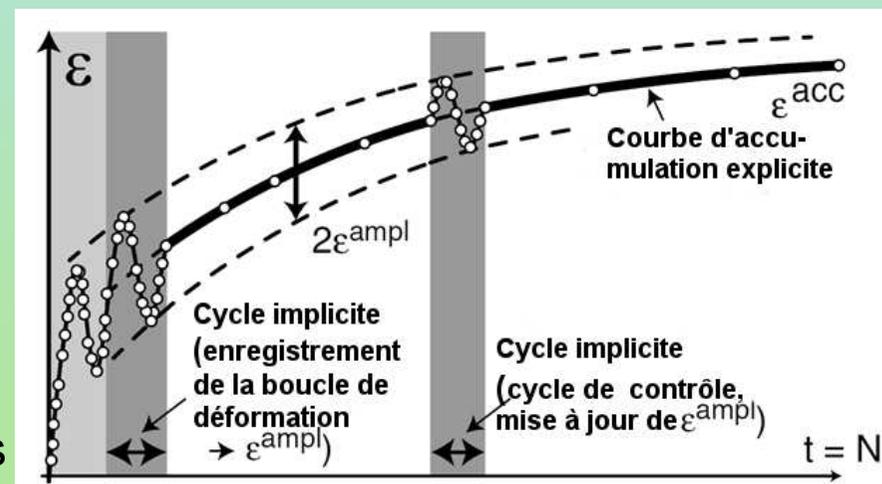


Tâche 4 : Modélisation du système sol-pieu

Responsable: M. Boulon / 3S-R

Objectif : développer, comparer et valider, plusieurs procédures de modélisation numérique, en éléments/différences finis, du système sol-interface-pieu, sous sollicitation cyclique axiale ou latérale, comportant un très grand nombre de cycles, à fréquence faible (sans force d'inertie).

- Prise en compte rigoureuse du comportement sol+interface
- Outils utilisables (intégration dans logiciels courants: PLAXIS, CESAR)
- Loi constitutive petit nombre de cycles + extrapolation (pseudo-fluage cyclique)



Procédure de Wichtman (2005)

Tâche 5 : Développement et validation de méthodes de calcul et de dimensionnement

Responsable: A. Puech / FUGRO

Objectif : se confond avec l'objectif global du projet ANR-SOLCYP à savoir développer et valider des méthodes innovantes de calcul et de dimensionnement des pieux de génie civil.

Construction d'une méthodologie d'approche du comportement des pieux sous chargements cycliques en trois niveaux

Elaboration de méthodes simplifiées de type courbes de transfert (p-y) et (t-z)

Elaboration de méthodes avancées de type diagramme-contour

Application et évaluation des méthodes sur projets réels

Tâche 6 : Synthèse, recommandations

Responsables: A. Puech /FUGRO et J.P. Iorio/SAIPEM

Objectif : prolonger le travail conceptuel par :

- *la rédaction d'un ouvrage de synthèse et de recommandations ;*
- *l'élaboration d'un document prénormatif.*

Tâche 5 : Développement et validation de méthodes de calcul et de dimensionnement

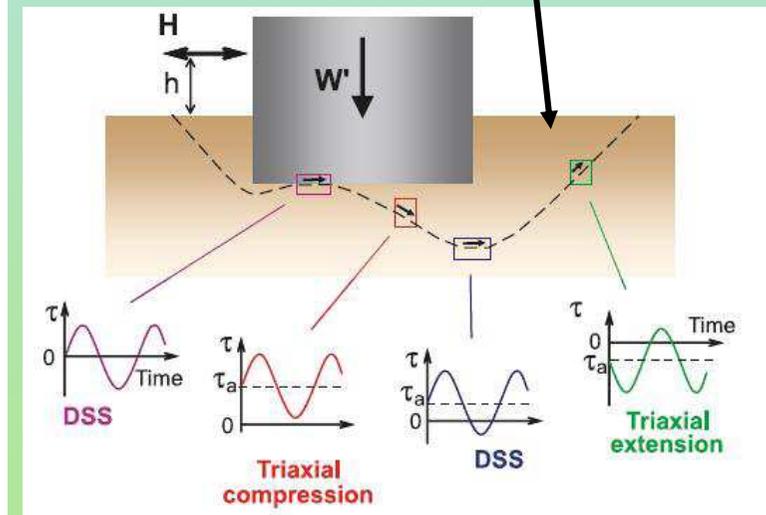
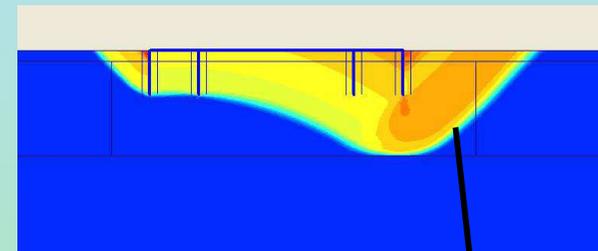
Responsable: A. Puech / FUGRO



PROJET SOLCYP

PRISE EN COMPTE DES CHARGEMENTS CYCLIQUES
 DANS LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS
 OFFSHORE

Tâche 6 : Développement et validation de méthodes de calcul et de dimensionnement



Essais de pieux sur sites expérimentaux

Capacité des systèmes de chargement limitée à 120T

Pieux: diamètre: environ 400mm, longueur: 12 à 15m

Deux types d'interface: **acier / sol** ou **ciment / sol**

Deux procédures d'installation: **battage**

non refoulant / foré simple

Deux sites:

MERVILLE: Argile des Flandres OCR 4-5; IP = 60

DUNKERQUE: Sables denses

Sur chaque site: installation de 4 pieux acier battus et
4 pieux forés cimentés

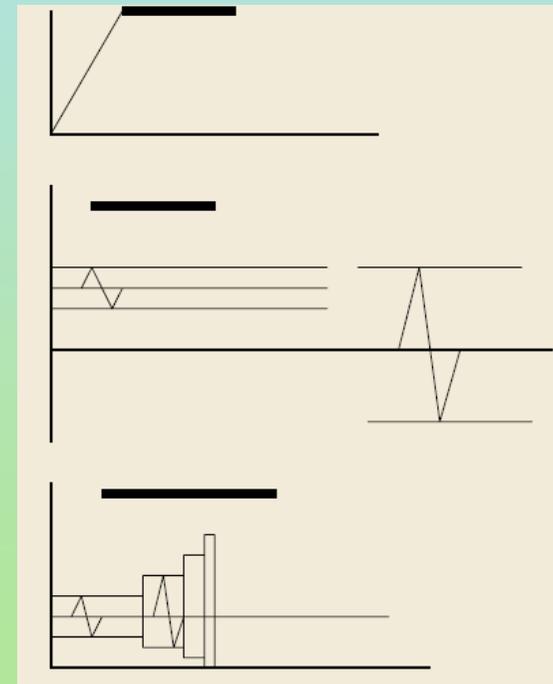
Caractérisation complète des sites et des matériaux par essais in situ et
essais de laboratoire (programme similaire à matériaux de référence)

Essais de pieux sur sites expérimentaux

Pieux instrumentés sous chargement par extensomètres amovibles

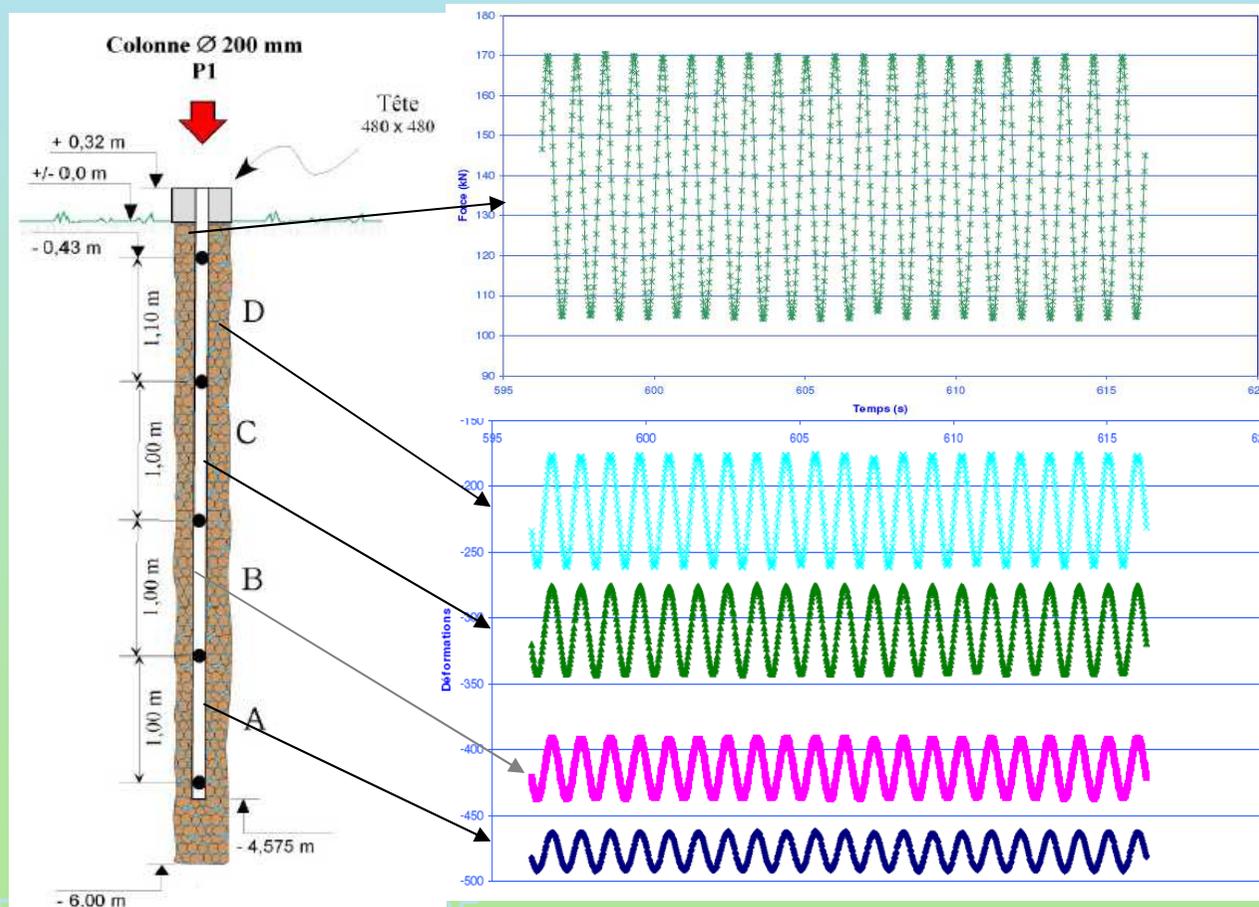
Soumis à des séries de chargements cycliques comprenant:

- Statique de référence
- Séries à amplitude constantes répétée
- Séries à amplitude constante alternée
- essais « Tempête » à amplitude variable
- essais de fatigue ($N > 10\ 000$)



Essais de pieux sur sites expérimentaux

Faisabilité acquise (recherche propre LCPC / CER –Rouen)



Essai du
29/05/08

Essai de 170 kN et 170 kN

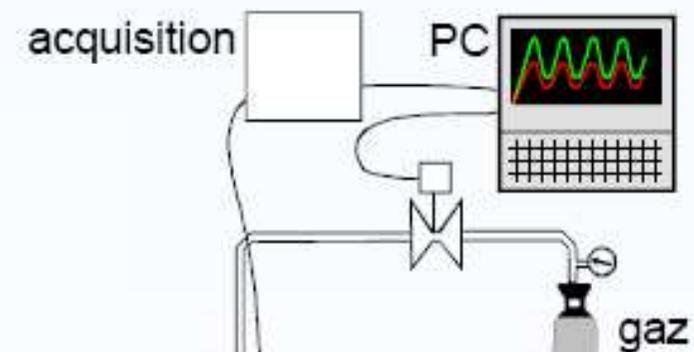
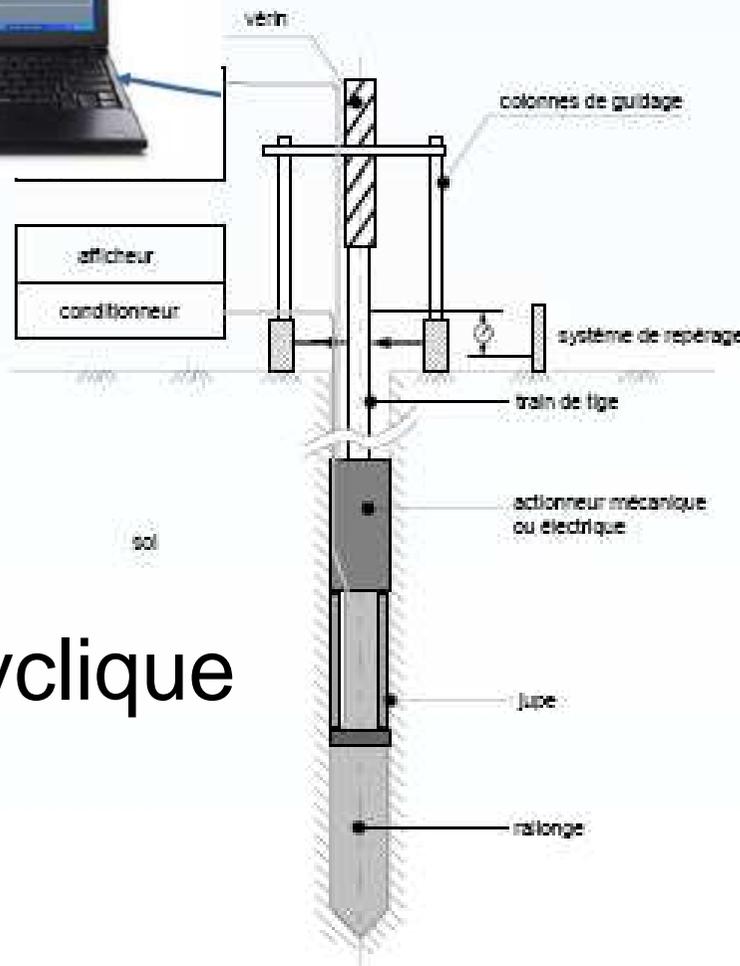
Essais cycliques in situ

- 1 – Adaptation du pressiomètre autoforeur LCPC pour essais cycliques
- 2 – Conception et construction d'un pénétromètre cyclique
- 3 – Exécution d'essais cycliques PMTc et CPTc sur les sites de MERVILLE, DUNKERQUE et CRAN
- 4- Réalisation d'essais cycliques in situ sur chantiers réels
 - après validation sur sites d'essais
 - pour tester la méthodologie proposée

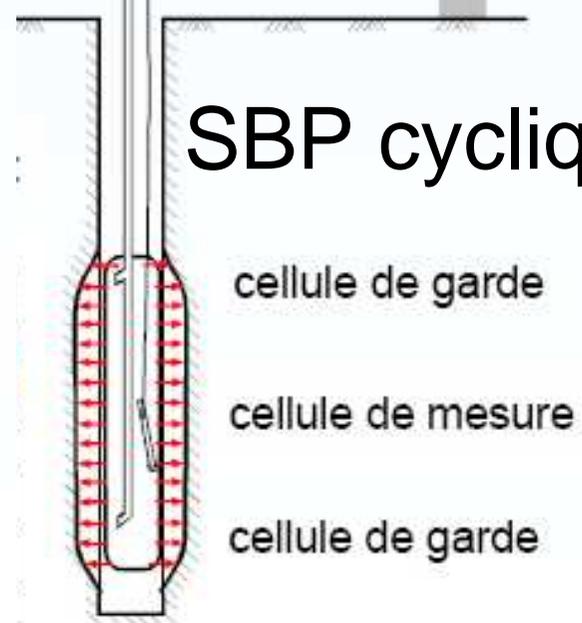
Essais cycliques in situ



CPT cyclique



SBP cyclique



Instrumentation de structures

- Méconnaissance des efforts cycliques réellement transmis en tête des pieux
- Réserve pour instrumenter trois structures
- Choix à déterminer selon avis des participants et opportunités:
 - éolienne terrestre
 - éolienne offshore
 - pont ligne à grande vitesse
 - fondation de machine vibrante,

Organisation

- Président: *A. Pecker* (Géodynamique & Structures)
- Comité d'experts: *Prof. R. Jardine* (Imperial College)
Prof. A. Holeyman (UC Louvain)
- Direction Scientifique: *J. Canou* (ENPC-Cermes)
- Direction Technique: *A. Puech* (Fugro)
- Gestion Administrative et Financière: IREX (*C. Bernardini*)

Groupes de Travail

GT1	Sols & Interfaces	J.Canou / C. Dano
GT2	Pieux	F.Rocher-Lacoste / J. Garnier
GT3	Modélisation	M. Boulon
GT4	Outils	Ph. Reiffsteck
GT5	Méthodes d'Ingénierie	A. Puech
GT6	Instrumentation d'ouvrages	S. Borel
GT7	Synthèse/Recommandations	J.P. Iorio

Partenaires

- 6 organismes universitaires et de recherche (volet ANR):

CERMES (ENPC), GeM (Ecole Centrale de Nantes),
3S-R (INPG, Grenoble), LCPC (Nantes et Paris),
LML (Université de Lille), LTDS (Ecole Centrale de Lyon).

- 3 organismes industriels (ANR+PN): EDF, FUGRO-France, SAIPEM

- + partenaires PN:

BOTTE Fondations, EDF-Energies Nouvelles, FRANKI Fondations,
EIFFAGE, IHC Marteaux Hydrauliques, MENARD,
SOLETANCHE-BACHY, TERRASOL.

Bienvenue à tous les organismes

- maîtres d'ouvrages
- maîtres d'œuvres
- entreprises
- bureaux d'études
- bureaux de contrôle
- laboratoires privés ou publics
-



qui souhaitent rejoindre le projet **PN-SOLCYP!**

a.puech@fugro.com

irex@wanadoo.fr

Site internet : « www.pnsolcyp.org »