

## Contribution du projet SOLCYP dans l'élaboration des recommandations CFMS pour le dimensionnement des pieux de fondations d'éoliennes offshore

*Patrick BERTHELOT, Bureau Veritas*  
*Alain PUECH, Fugro GeoConsulting*

- ▶ Début 2013 le **CFMS** a mis en place un nouveau Groupe de travail pour rédiger des "Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore".

Ces Recommandations traitent spécifiquement les aspects géotechniques liés à la conception et au calcul des **fondations** des éoliennes offshore.

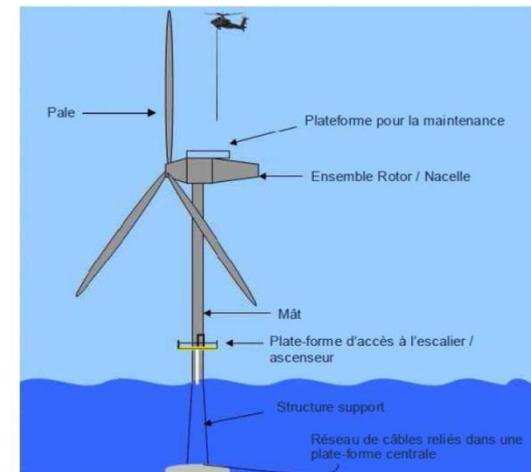
Elles ne traitent pas des composants caractérisant une éolienne.



Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique

Groupe de Travail « Fondations d'éoliennes offshore »

## Recommandations pour la conception et le calcul des fondations d'éoliennes offshore



Page 1



► **Groupe de travail "Fondations d'Eoliennes offshore".**

*Président : Patrick Berthelot, Bureau Veritas*

*Animateur : Alain Puech, FugroGeoconsulting*

**Maître d'Ouvrage : EDF-EN ; GDF-Suez; EoleRes**

**BET Géotechnique : Fugro; Fondasol; Cathie Associates;  
GdS; Terrasol**

**BET : Technip; Doris Engineering; Ceteal; Egis; Subsea7**

**Constructeur : Alstom**

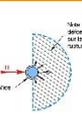
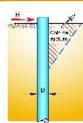
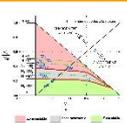
**Entreprises : Bouygues; Saipem**

**Bureau de Contrôle Technique : Bureau Veritas; Socotec**

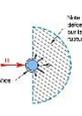
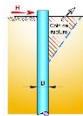
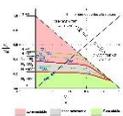
**Institutionnels : Ifsttar**



- ▶ **Chapitre 1 : Introduction**
- ▶ **Chapitre 2 : Référentiel**
- ▶ **Chapitre 3 : Conditions de sites**
- ▶ **Chapitre 4 : Charges**
- ▶ **Chapitre 5 : Etudes de terrains**  
(disponible sur [www.cfms-sols.org](http://www.cfms-sols.org))
- ▶ **Chapitre 6 : Paramètres de projet et profils de dimensionnement**
- ▶ **Chapitre 7 : Sollicitations et vérifications**
- ▶ **Chapitre 8 : Dimensionnement des monopieux**
- ▶ **Chapitre 9 : Dimensionnement des pieux**
- ▶ **Chapitre 10 : Dimensionnement des embases gravitaires**
- ▶ **Annexes**



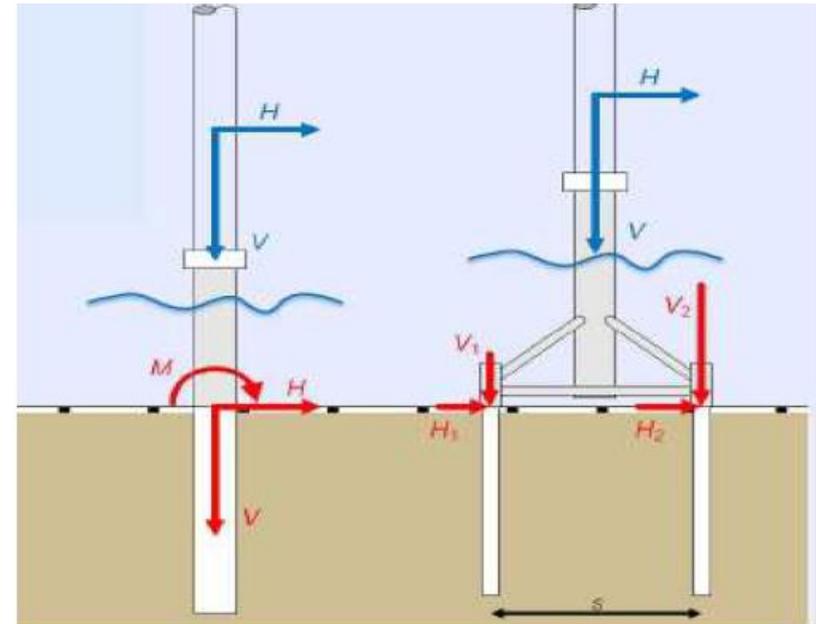
- ▶ **Chapitre 1 : Introduction**
- ▶ **Chapitre 2 : Référentiel**
- ▶ **Chapitre 3 : Conditions de sites**
- ▶ **Chapitre 4 : Charges**
- ▶ **Chapitre 5 : Etudes de terrains**  
(disponible sur [www.cfms-sols.org](http://www.cfms-sols.org))
- ▶ **Chapitre 6 : Paramètres de projet et profils de dimensionnement**
- ▶ **Chapitre 7 : Sollicitations et vérifications**
- ▶ **Chapitre 8 : Dimensionnement des monopieux**
- ▶ **Chapitre 9 : Dimensionnement des pieux**
- ▶ **Chapitre 10 : Dimensionnement des embases gravitaires**
- ▶ **Annexes**



Les sollicitations sur les fondations sont caractérisées par :

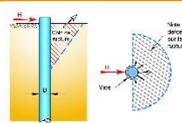
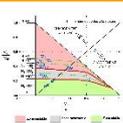
▶ Des efforts verticaux **V**  
de compression ou de traction

▶ Des efforts horizontaux **H**



▶ Des moments de renversement **M**

▶ Des moments de torsion **T** (généralement faibles; non représentés)



## ► Monopieux

Extension du fût de l'éolienne dans le sol de fondation. Tubes de grand diamètre, **4 à 7 m** et élancement faible **D/B de 2 à 4** ; mis en place par battage (+ forage si besoin)

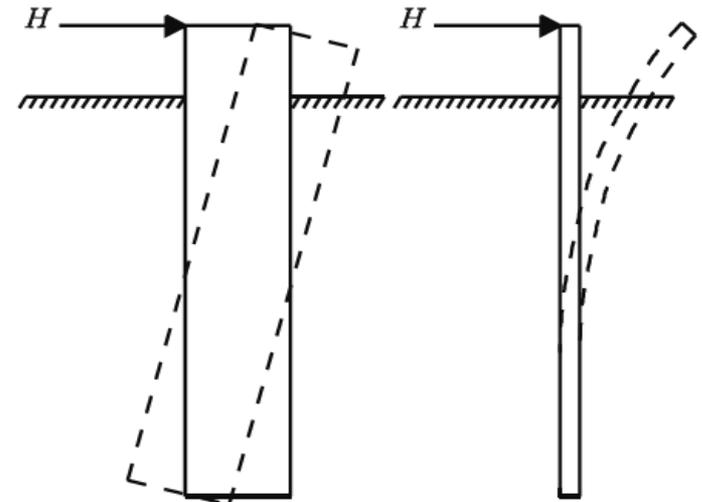
= **caissons rigides**

## ► Pieux pour multipodes

Tubes métalliques **1,5 à 3 m** de diamètre et **D/B > 10**

= **éléments flexibles.**

Essentiellement mis en place par battage (+ forage si sol induré).



Utilisés également pour les fondations des équipements annexes lourds (sous stations ...)



- ▶ **L'industrie pétrolière** a développé des procédures pour prendre en compte les effets des fortes houles sur les fondations des structures offshore.

**ISO 19901-4; ISO 19902; API RP2GEO**

- ▶ **L'industrie éolienne** adapte progressivement ces procédures au cas des éoliennes offshore pour des fondations sur monopieux, pieux (et embases gravitaires).

**DNV-GL ST-0126,2016; BSH, 2011**



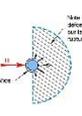
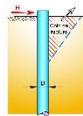
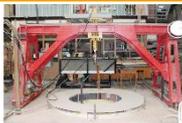
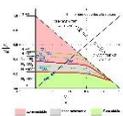
## Les Recommandations CFMS capitalisent sur les recommandations internationales en s'attachant plus particulièrement à :

- Couvrir les problématiques liées aux types de sols spécifiques rencontrés sur le plateau continental français:
  - **comportement des roches tendres carbonatées (calcarénites, craies, marnes)**
  - **recours aux pieux forés**
- Harmoniser les approches typiquement offshore avec le **savoir-faire français dans le domaine terrestre, pieux forés, expérience acquise dans les craies ...**
- Introduire les apports du **projet SOLCYP** dans le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques.



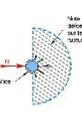
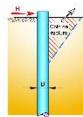
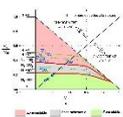
- ▶ Les aspects spécifiques au comportement des monopieux dans les roches tendres carbonatées seront abordés dans la présentation suivante.

***SOLCYP+ : extension de la procédure SOLCYP pour le développement de l'éolien offshore français-sable et sols carbonatés ( Elisabeth PALIX , EDF-EN)***



► La contribution du projet SOLCYP dans les Recommandations CFMS se manifeste principalement à trois niveaux:

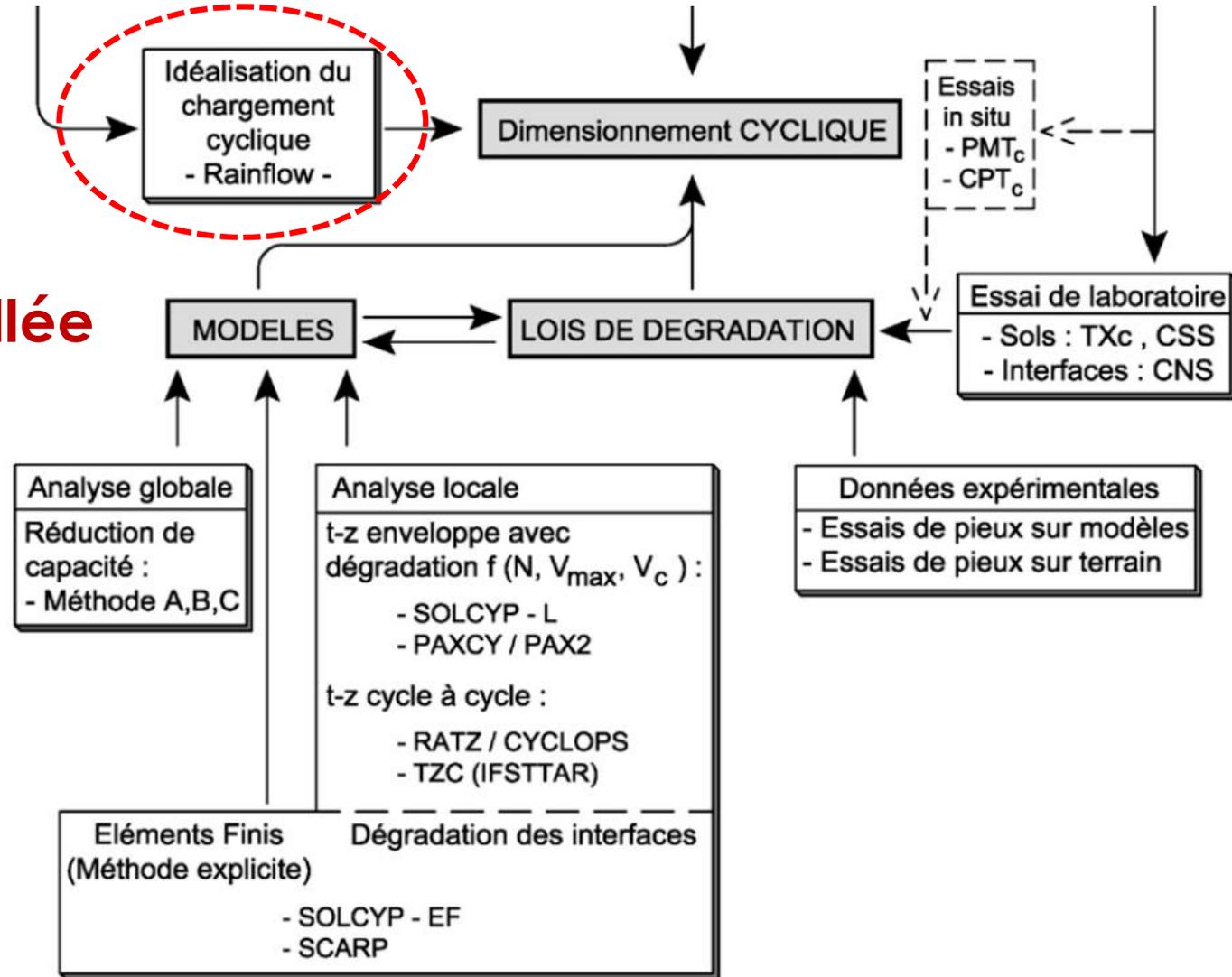
- 1) dans la procédure de traitement des *charges cycliques*
- 2) pour le calcul des déplacements permanents des *monopieux sous charges cycliques transversales*
- 3) pour l'estimation de la dégradation de la *capacité axiale des pieux*



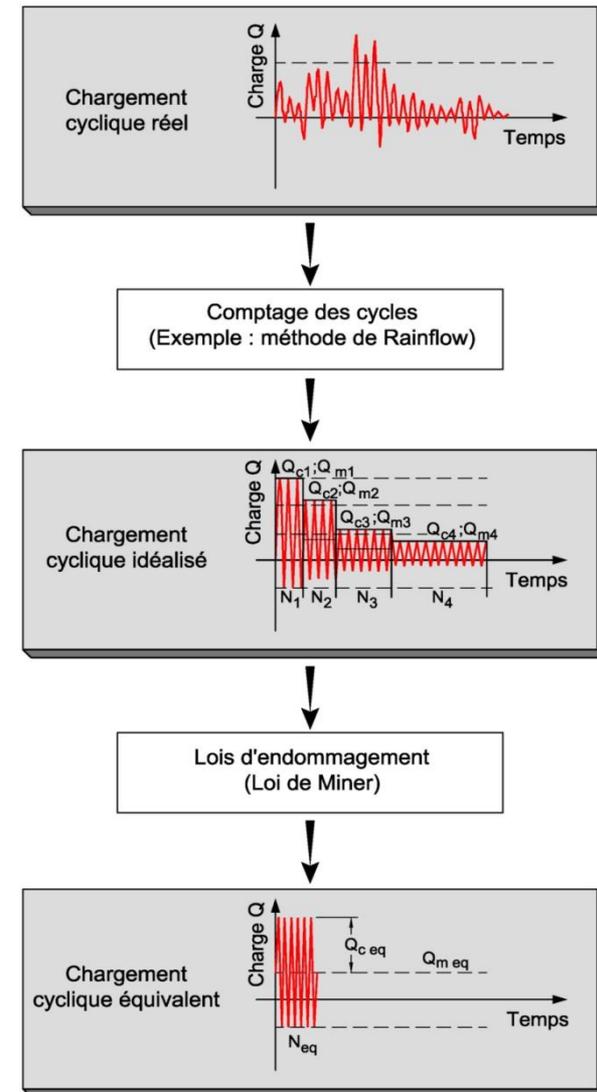
**RAPPEL**

**ETAPE IIA**

**Définition détaillée  
des actions**



1. Etablir une simulation temporelle de l'évènement de projet
2. Transformer le chargement réel aléatoire en un chargement idéalisé (méthode de comptage)
3. Déterminer le chargement équivalent à partir du chargement idéalisé en utilisant les lois d'endommagement (Miner)



- ▶ Le dimensionnement des monopieux est essentiellement conditionné par le respect de critères très sévères sur leur **rotation  $\theta$  (ou déplacement  $Y$ )** à long terme.
- ▶ Les chargements cycliques ont un effet secondaire sur les capacités verticales et transversales (ELU)
- ▶ **La justification principale porte sur l'estimation des déplacements (rotations) sous l'effet d'un grand nombre de cycles en conditions de service (ELS)**
- ▶ L'approche la plus communément mise en œuvre consiste à relier le déplacement sous  $N$  cycles au déplacement du premier cycle par des formulations du type:

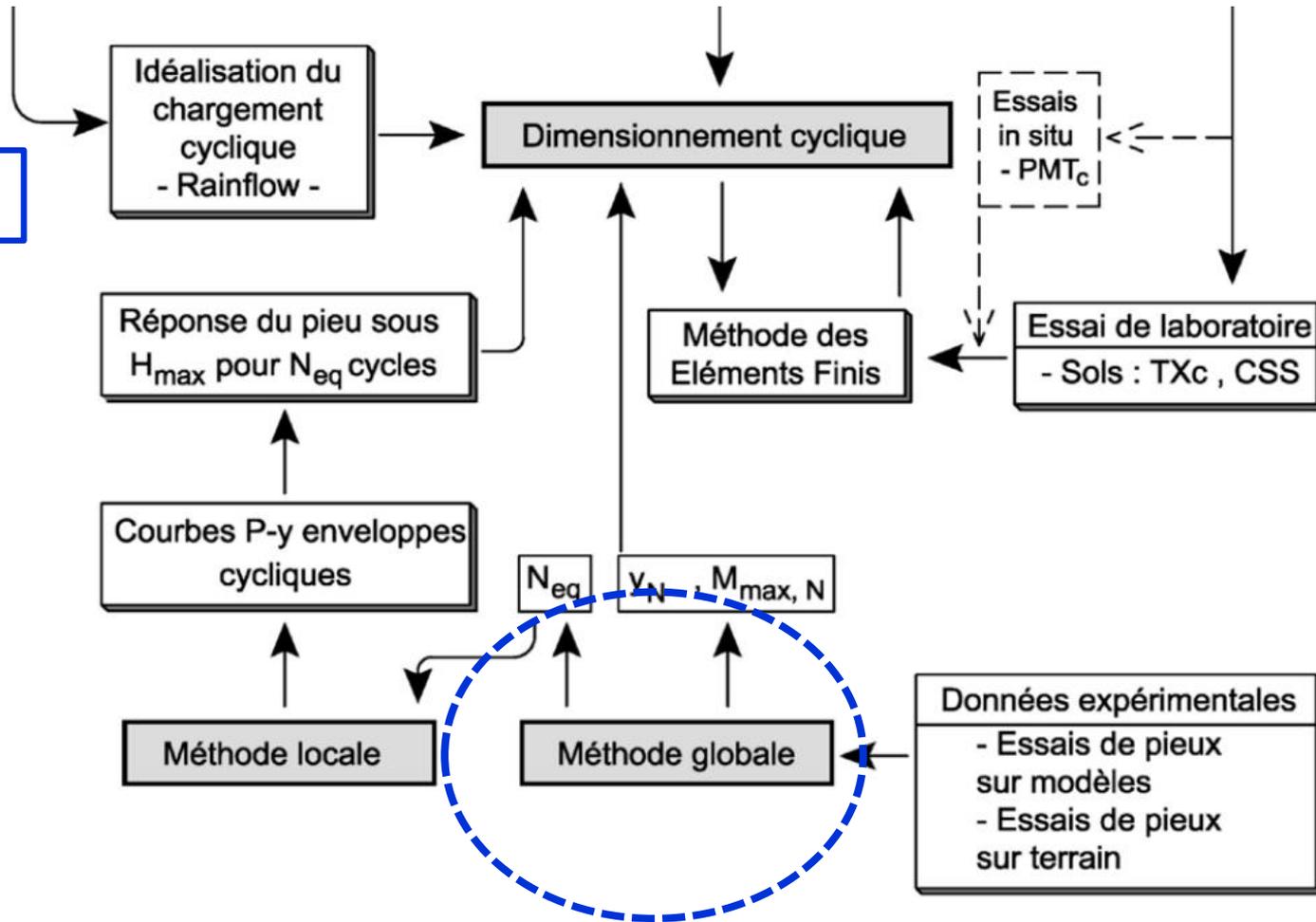
$$y_N / y_1 = 1 + \alpha \ln N$$

$$y_N / y_1 = N^m$$

- ▶ **Cette approche est appelée « méthode globale »**



**RAPPEL**

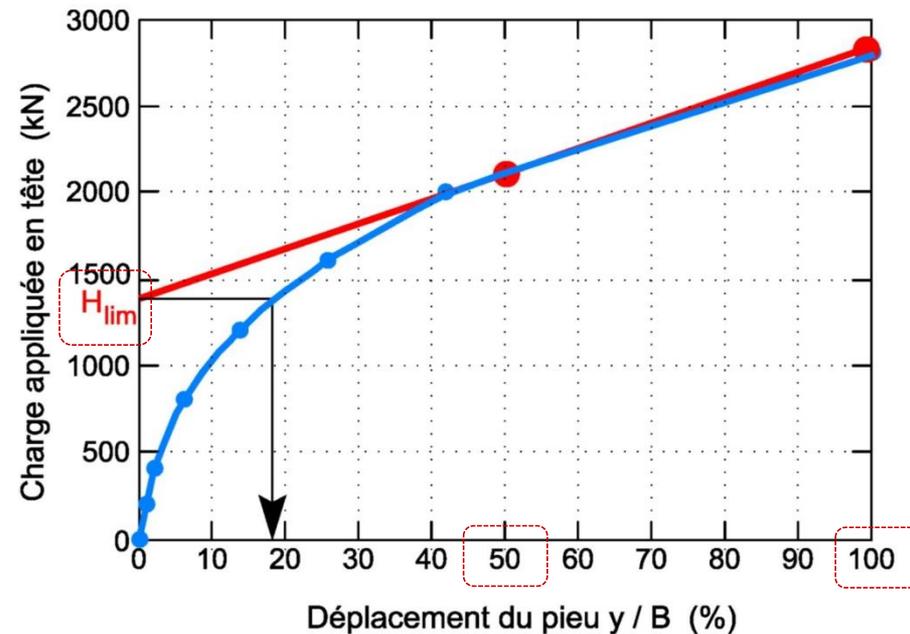


**Focus sur la méthode globale**



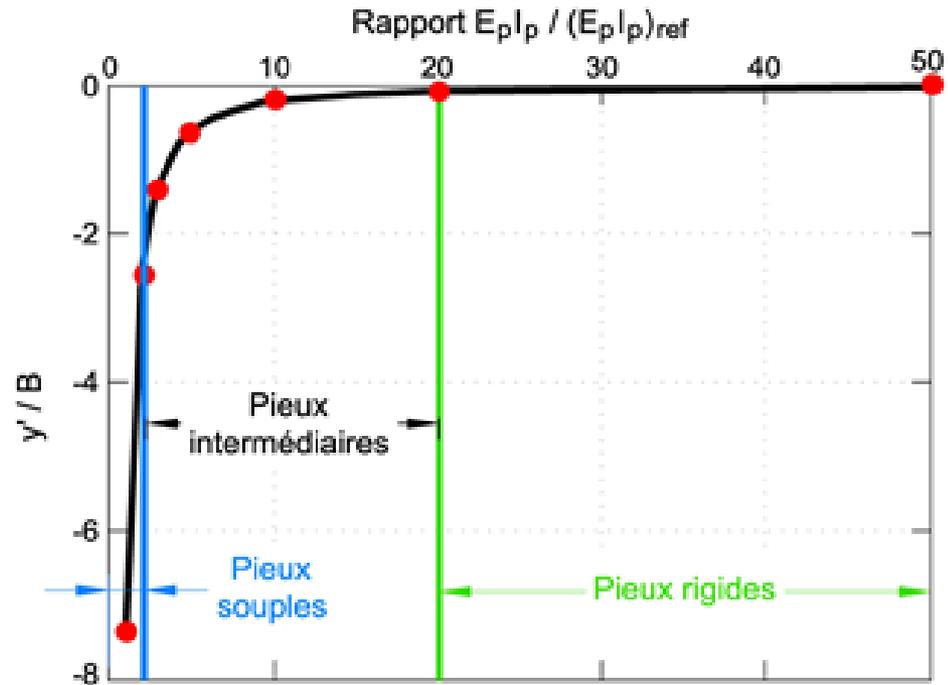
► La méthode globale mise au point dans SOLCYP est à ce jour la plus élaborée.

1. la charge limite  $H_{lim}$  servant de référence pour la caractérisation de la sévérité des chargements cycliques (rapports  $H_{max}/H_{lim}$  ;  $H_m/H_{lim}$  ;  $\Delta H/H_{lim}$ ) est clairement identifiée ;



2. La rigidité des pieux est prise en compte par l'intermédiaire du coefficient **CR** qui permet de réconcilier les données expérimentales de déplacements sous chargements cycliques obtenues sur des pieux souples et des pieux rigides (monopieux).

$$CR = \left( \frac{E_p I_p}{(E_p I_p)_{fl}} \right)^{1/5}$$



- ▶ Les formulations décrivant le cumul des déformations cycliques ( $y_N/y_1$ ) proposées pour les sables intègrent la quasi-totalité des données expérimentales disponibles à ce jour (essais sur modèles et essais in situ).

$$\frac{y_N}{y_1} = 1 + \frac{0,235}{CR} \log(N) \left( \frac{H_c}{H_{\max}} \right)^{0,35}$$

CR = coefficient de rigidité transversale

- ▶ Des formulations sont également proposées pour les argiles, bien que basées exclusivement sur des résultats d'essais sur centrifugeuse .



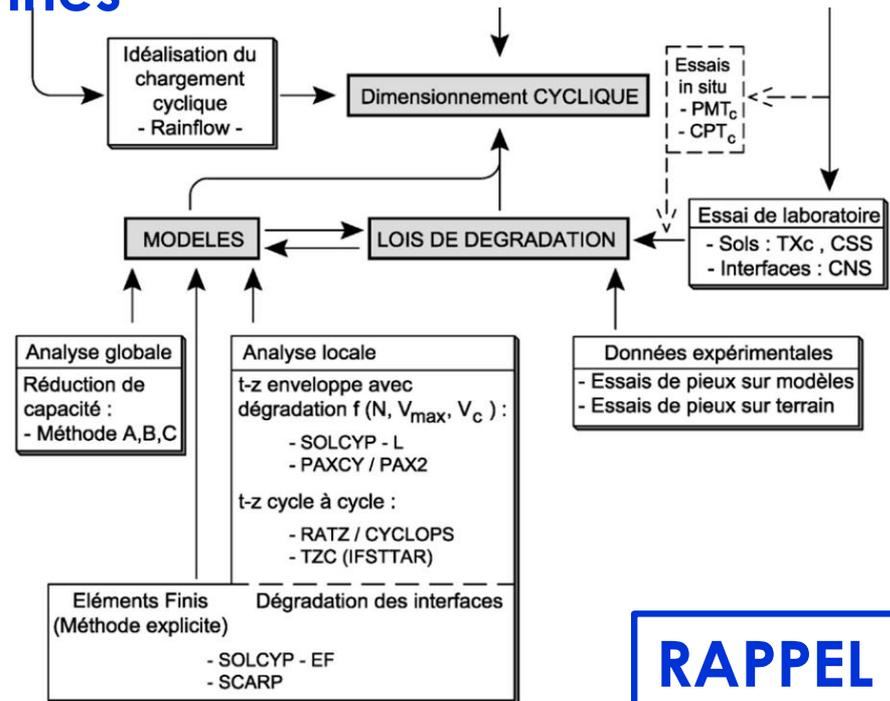
## ► Pieux des sous-stations

Structures fortement chargées, **Qc/Qm modéré**,  
Dimensionnement à partir des approches offshore  
traditionnelles

## ► Pieux de fondations des éoliennes

Structures légères,  
**fortes valeurs de Qc/Qm**  
Dimensionnement cyclique  
indispensable

**Procédure SOLCYP pour charges axiales applicable dans son intégralité.**



**RAPPEL**



# MERCI DE VOTRE ATTENTION

