Conférence Coulomb - CFMS

18 juin 2019

Aperçu des défis de la géotechnique offshore

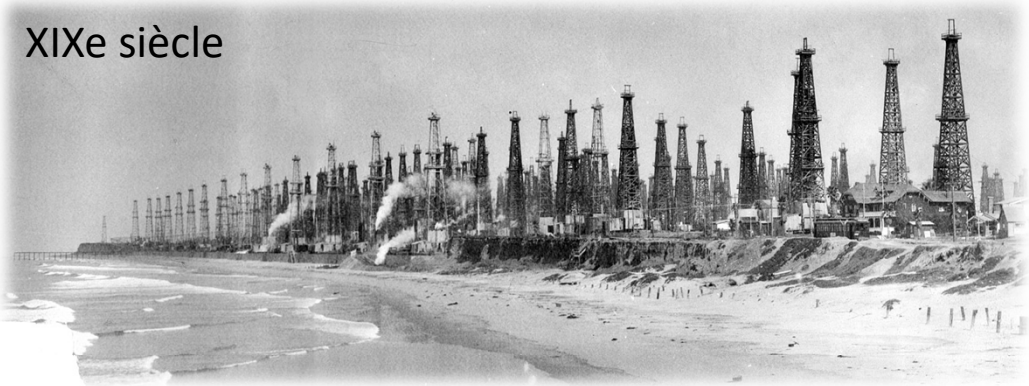
Philippe JEANJEAN

bp

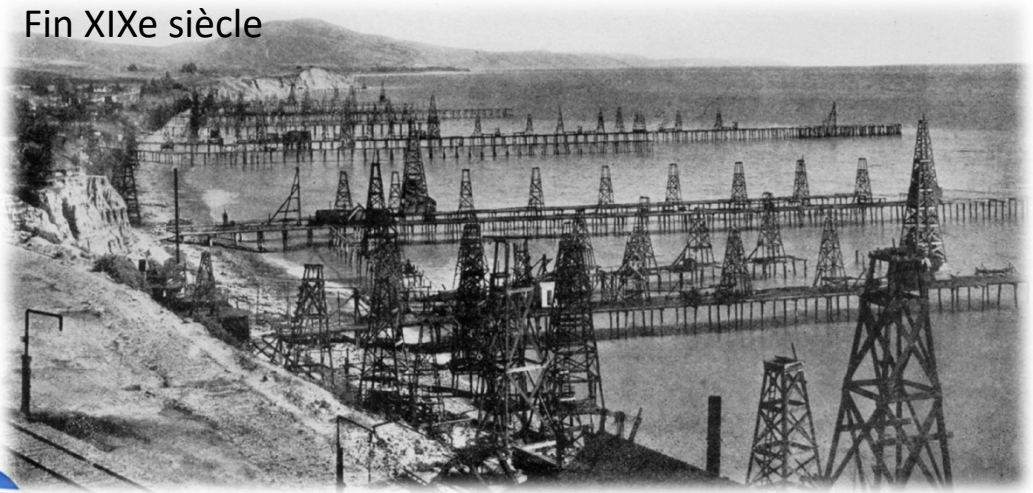
Plate-forme *Thunder Horse* – Golfe du Mexique

Il était une fois: la géotechnique « offshore »

XIXe siècle

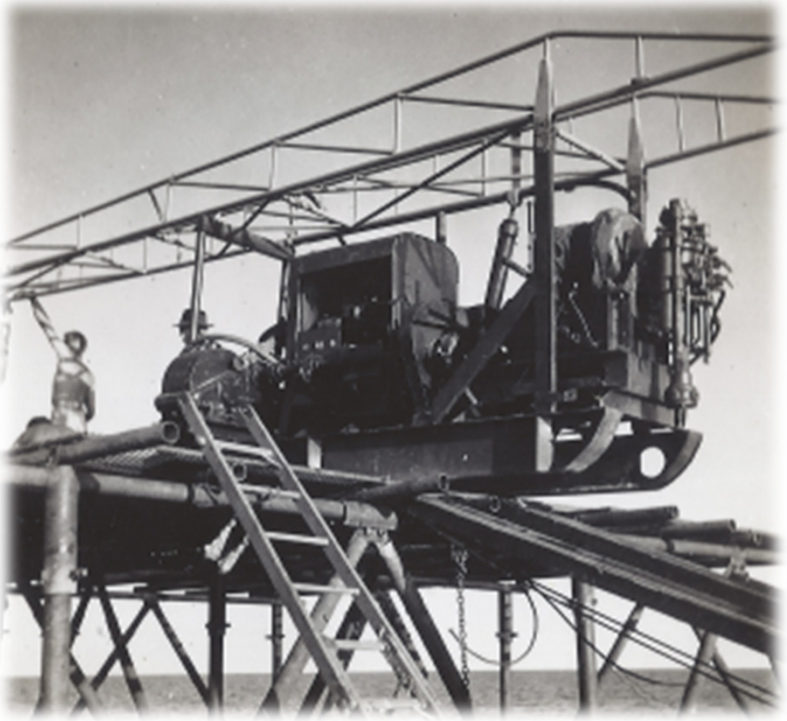


Fin XIXe siècle



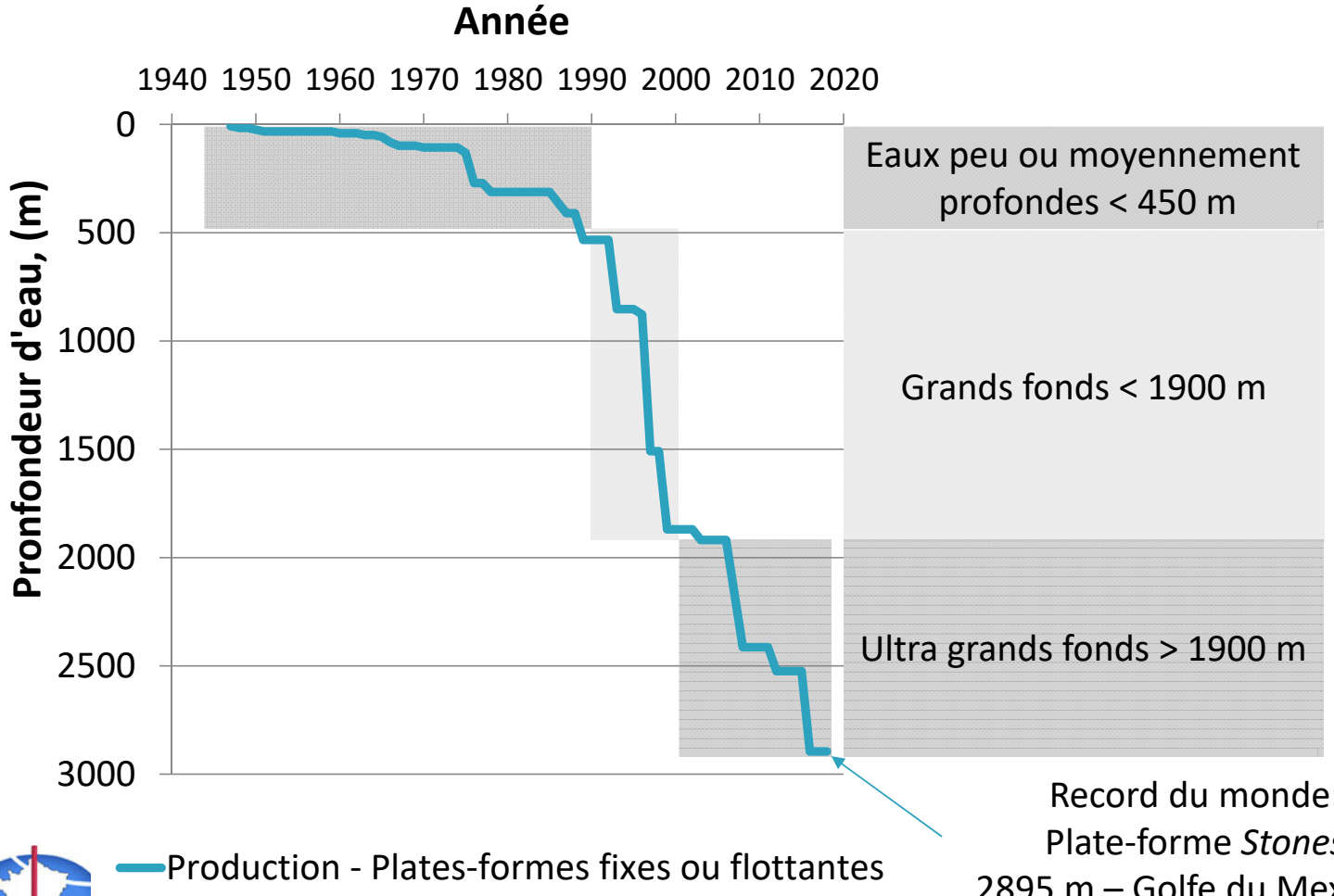
Crédit photo: Orange County Archives.

Greer & McClelland
1er sondage géotechnique offshore – 1947
Profondeur d'eau: 6 m



Crédit photo: Famille McClelland

Progression des capacités: de 6 m à 3 000 m en 70 ans

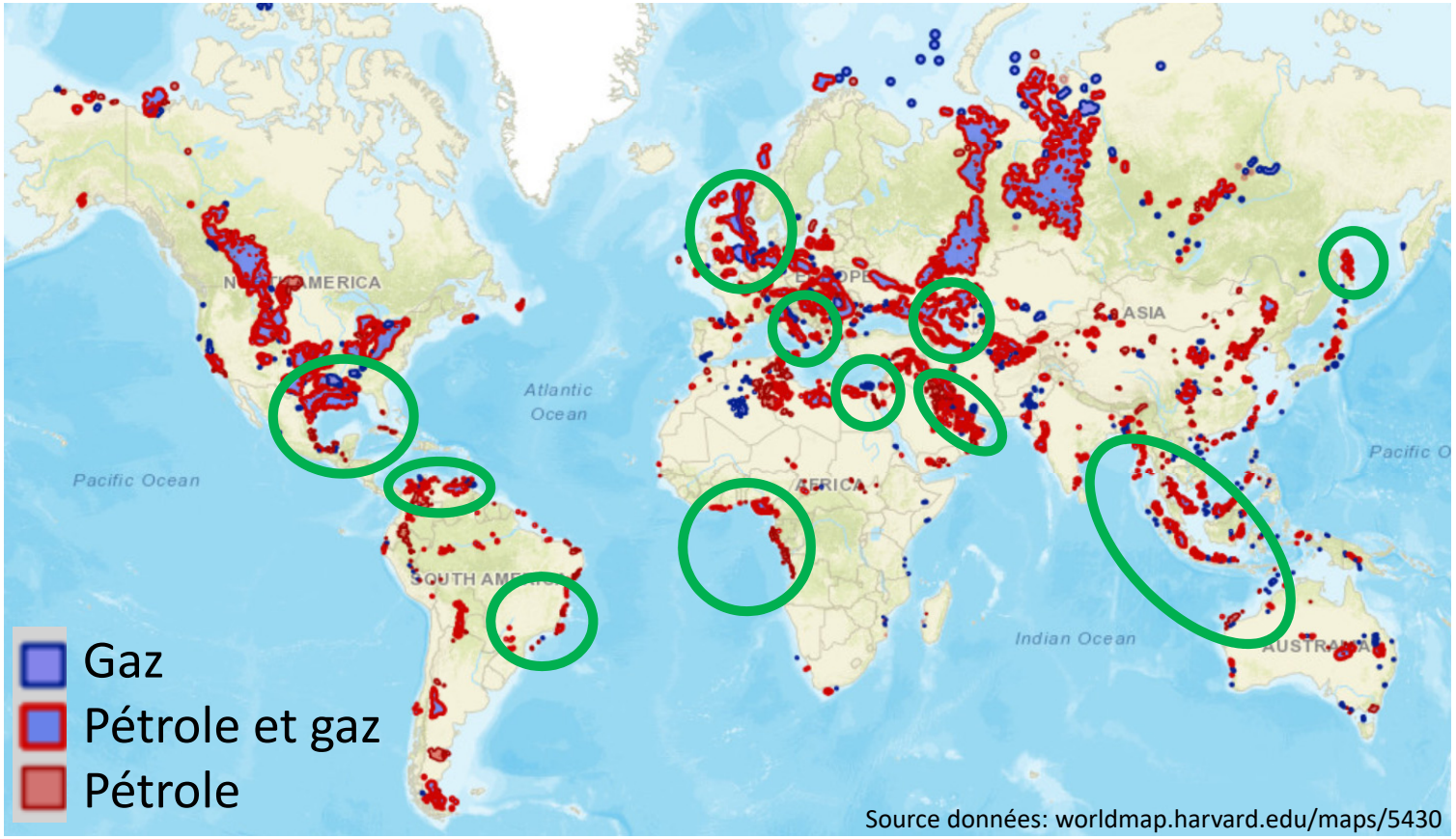


- ≈ 15 000 plates-formes
- Production totale *offshore*:
  - 27 mb/j
  - 27% de la production totale
  - 80% en eaux peu profondes

Record du monde:
Plate-forme *Stones*
2895 m – Golfe du Mexique

Une industrie à l'échelle planétaire

- Les principaux champs d'hydrocarbures et bassins de production offshore

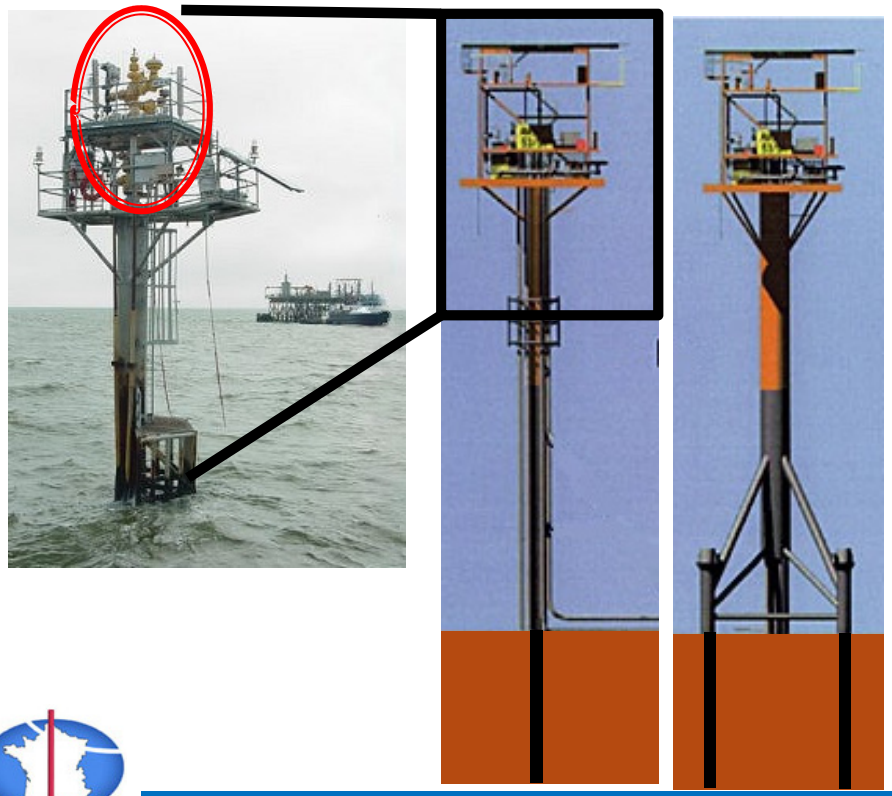


Source données: worldmap.harvard.edu/maps/5430

Structures minimales pour champs mineurs

- Structures monopodes ou multi-podes: profondeur d'eau < 50 m

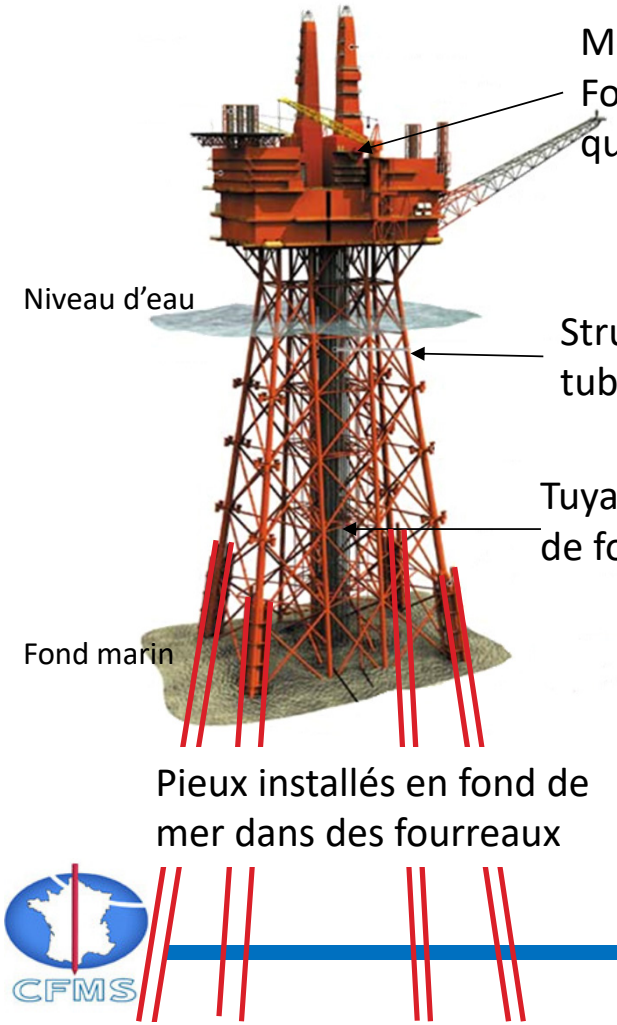
Caisson monopode typique
Golfe du Mexique



Installation des structures minimales Davy et Bessemer – Mer du Nord – 1995
Poids total: 10 MN (1000 tonnes) – Modules de surface: 4 MN (400 tonnes)

Photos: Charles Hodge Photography

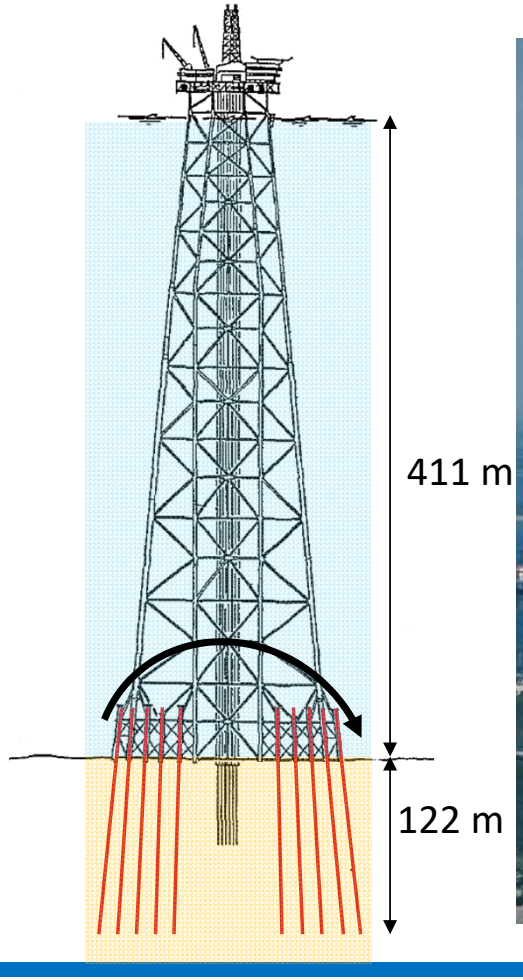
Plates-formes fixes: les « jackets »

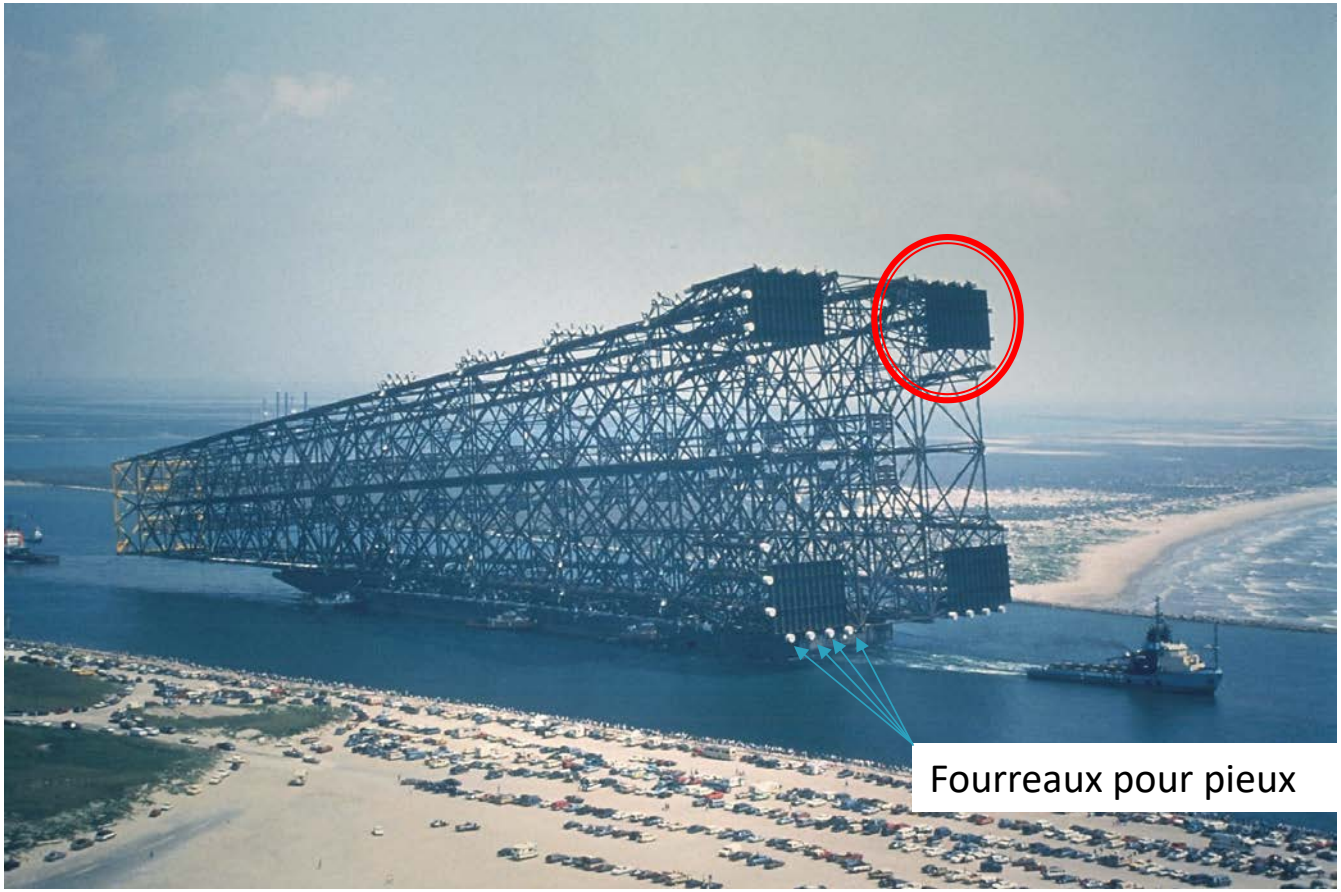


- Représentent ≈ 95% des plates-formes
- Utilisés jusqu'à ≈ 411 m d'eau
- Pieux battus
- Pieux forés-cimentés dans les sols carbonatés

Bullwinkle (1988): transport jusqu'à emplacement final

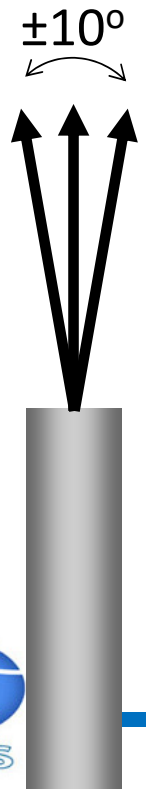
Tour Eiffel
Hauteur: 324 m





Les plates-formes à lignes tendues: TLP

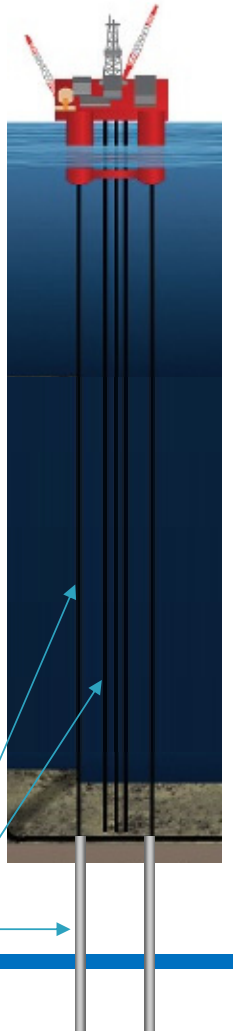
- TLP: Tension Leg Platforms
- 30 au monde; ≈ 60% dans le Golfe du Mexique



Dimensionnement des pieux:

- Charges: Ouragan
- Période de retour: 100 ans
- Coefficient de sécurité: > 2,25
- Charge à la rupture: 40 – 70 MN

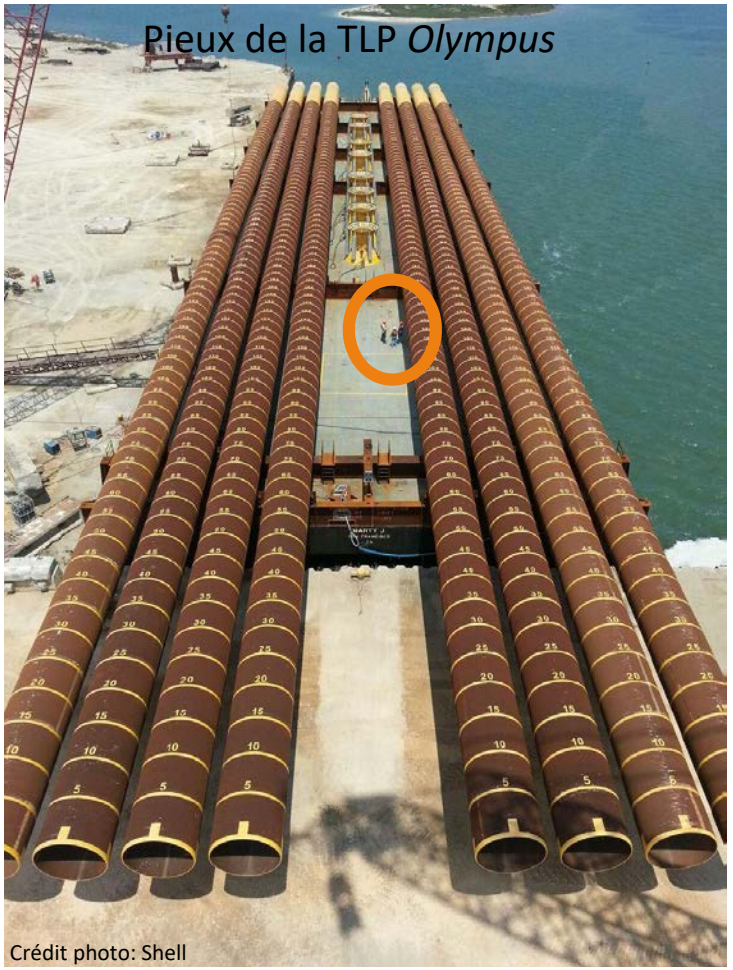
TLP typique
Grands Fonds



Pieux d'exception: fondation pour TLP

- Diamètre: jusqu'à 2,4 m
- Longueur: jusqu'à 140 m

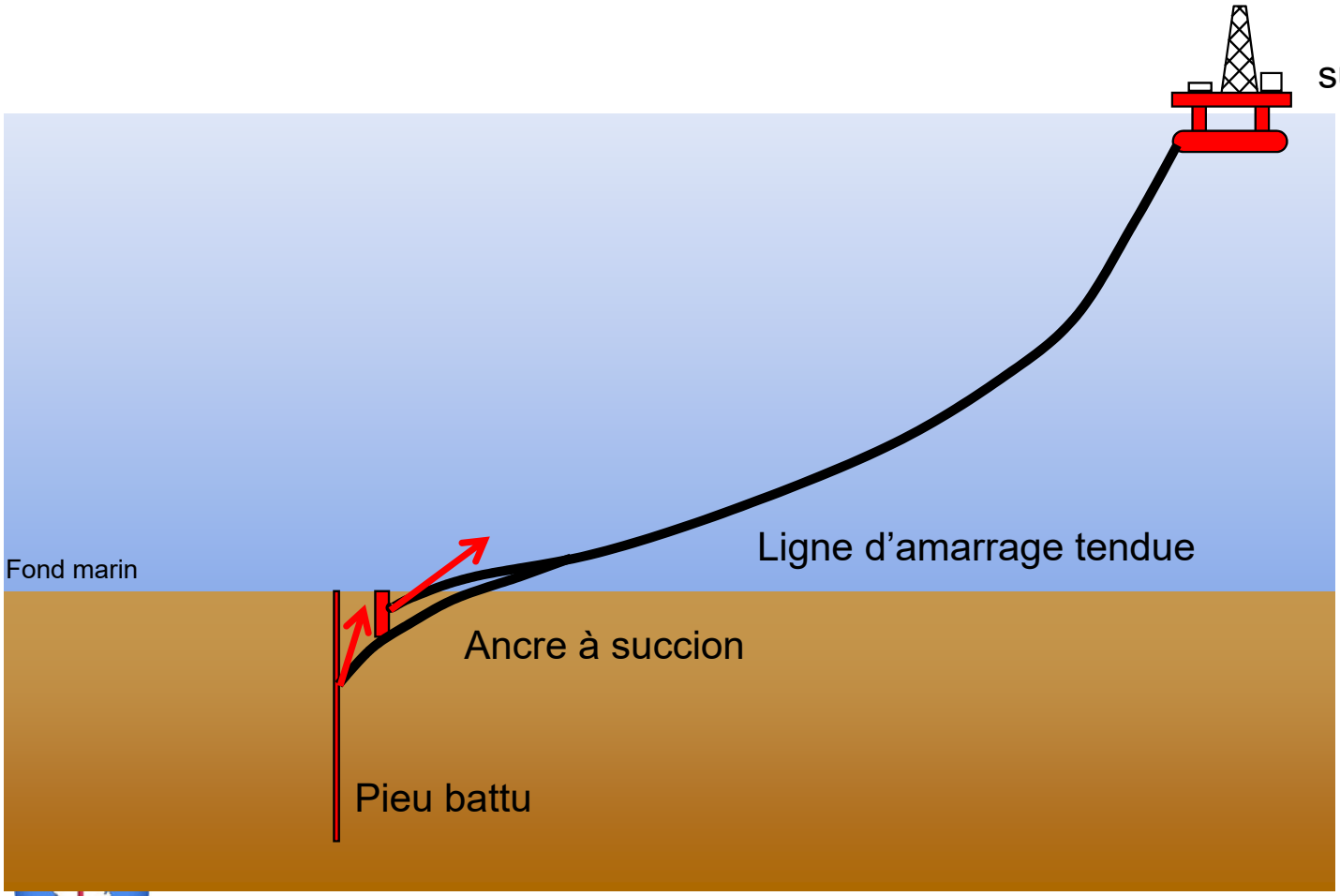
Installation des pieux de la TLP *Marlin*



Pieux de la TLP *Olympus*

Crédit photo: Shell

Plates-formes flottantes à lignes d'amarrage latérales

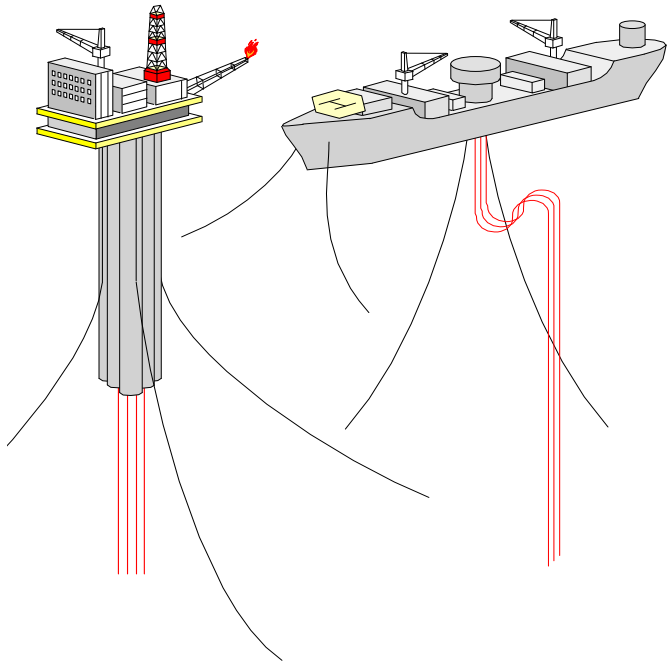


Semi submersible

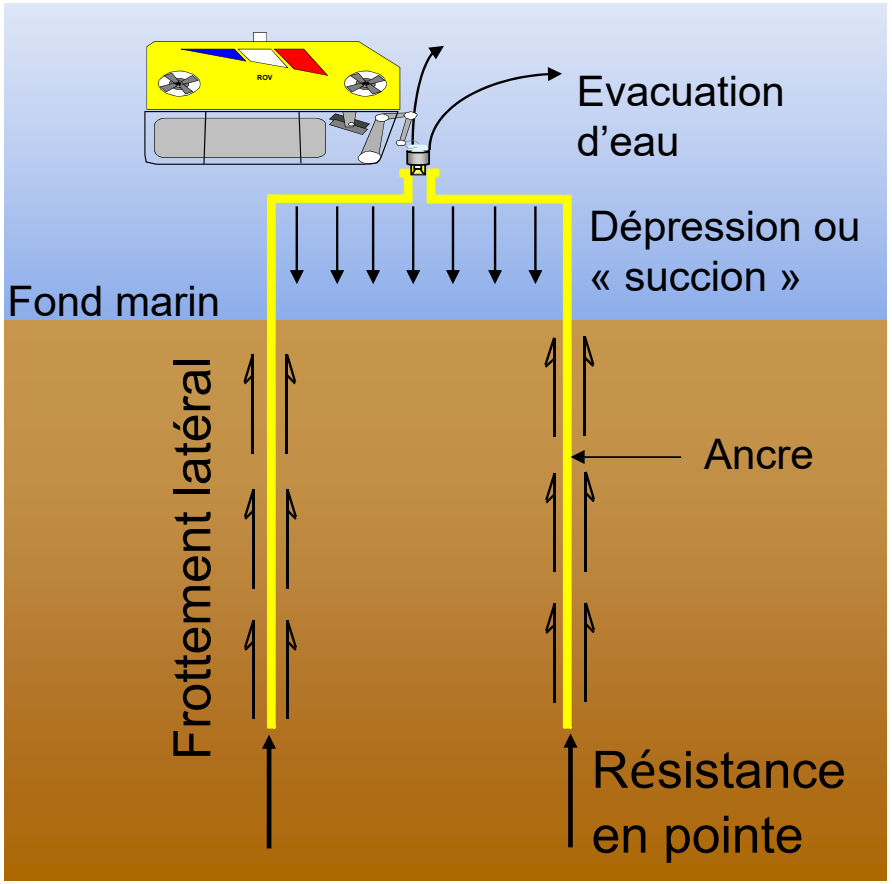
Types de coques

Spar

Bateau de production avec stockage



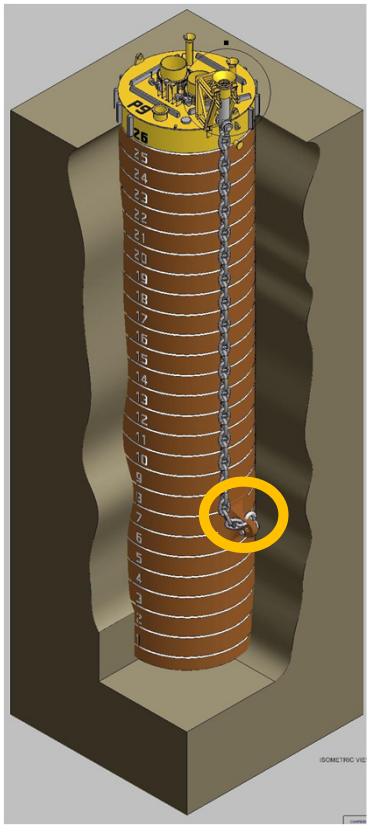
Principe des ancres à succion



Force de pénétration =
poids + succion

Résistance à la pénétration =
frottement latéral externe
+ frottement latéral interne
+ résistance en pointe

Elancement maximal
dans les argiles: L/D ≈ 7



Ancres à succion pour spar

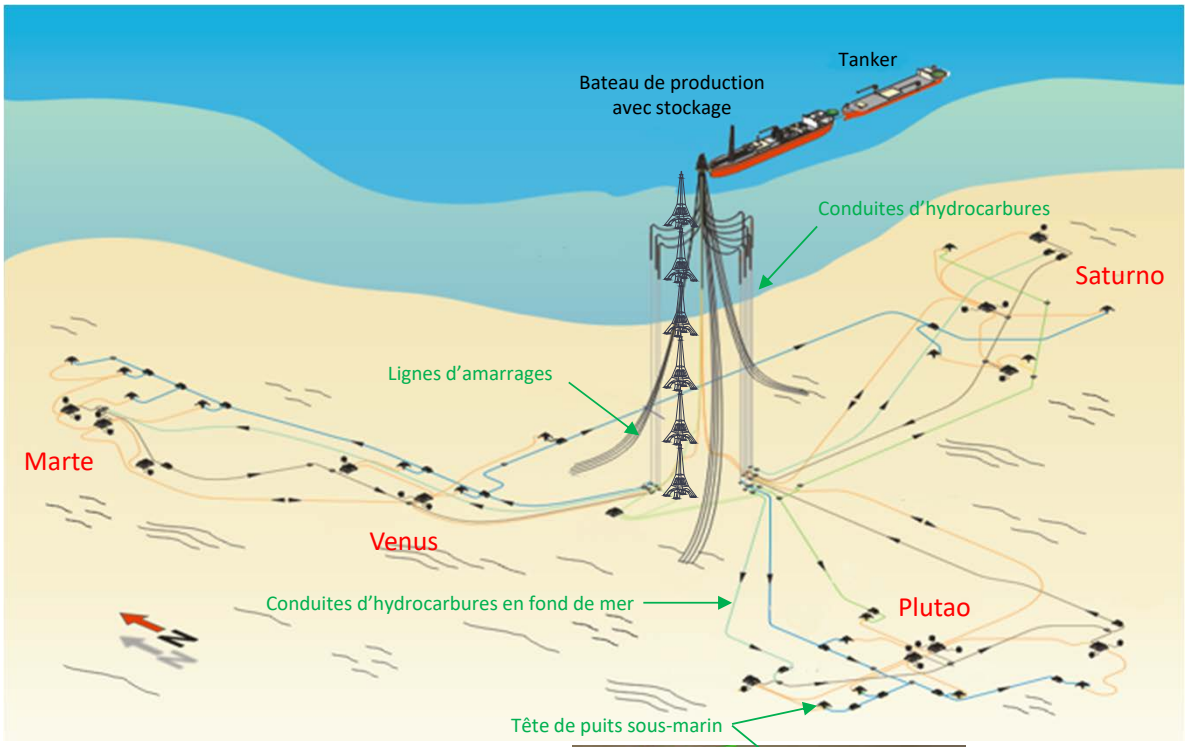
Spar *Mad Dog* – Golfe du Mexique:

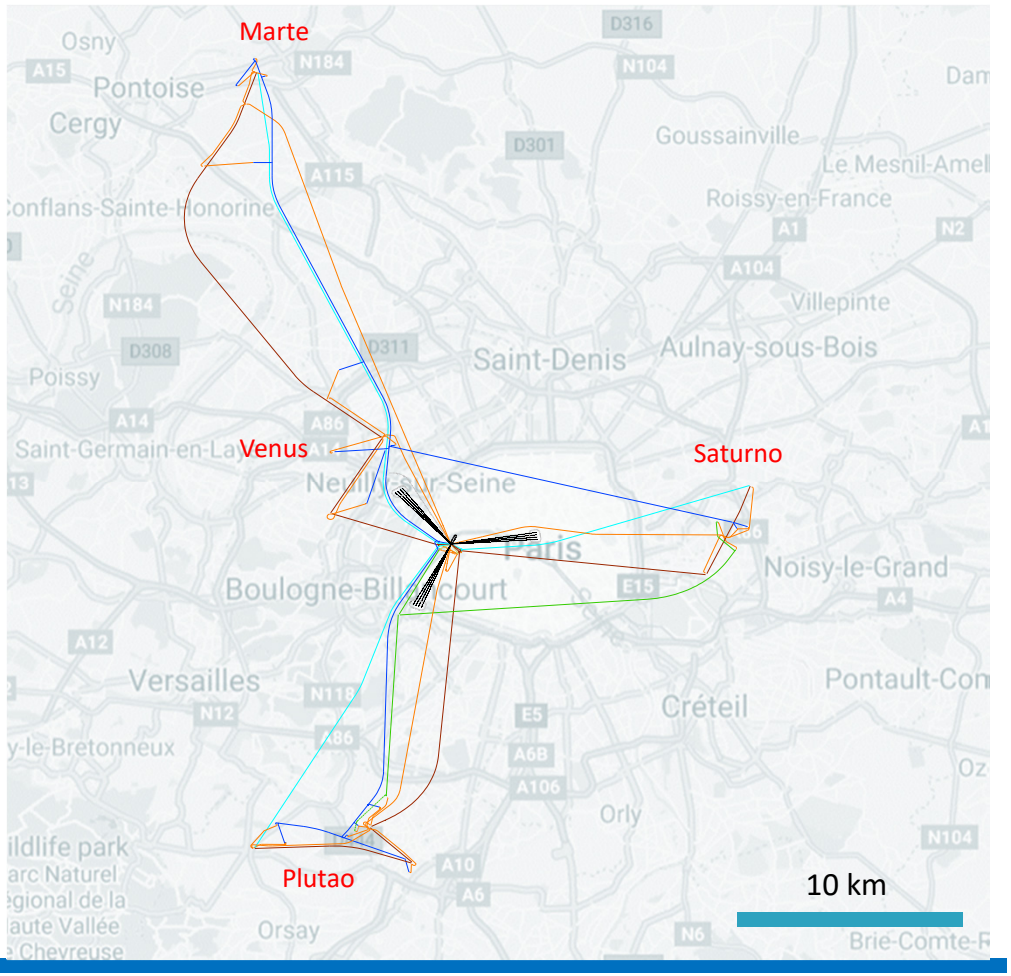
Diamètre: 5,5 – 7,6 m - Longueur: 14 – 26 m

Spar *Holstein*

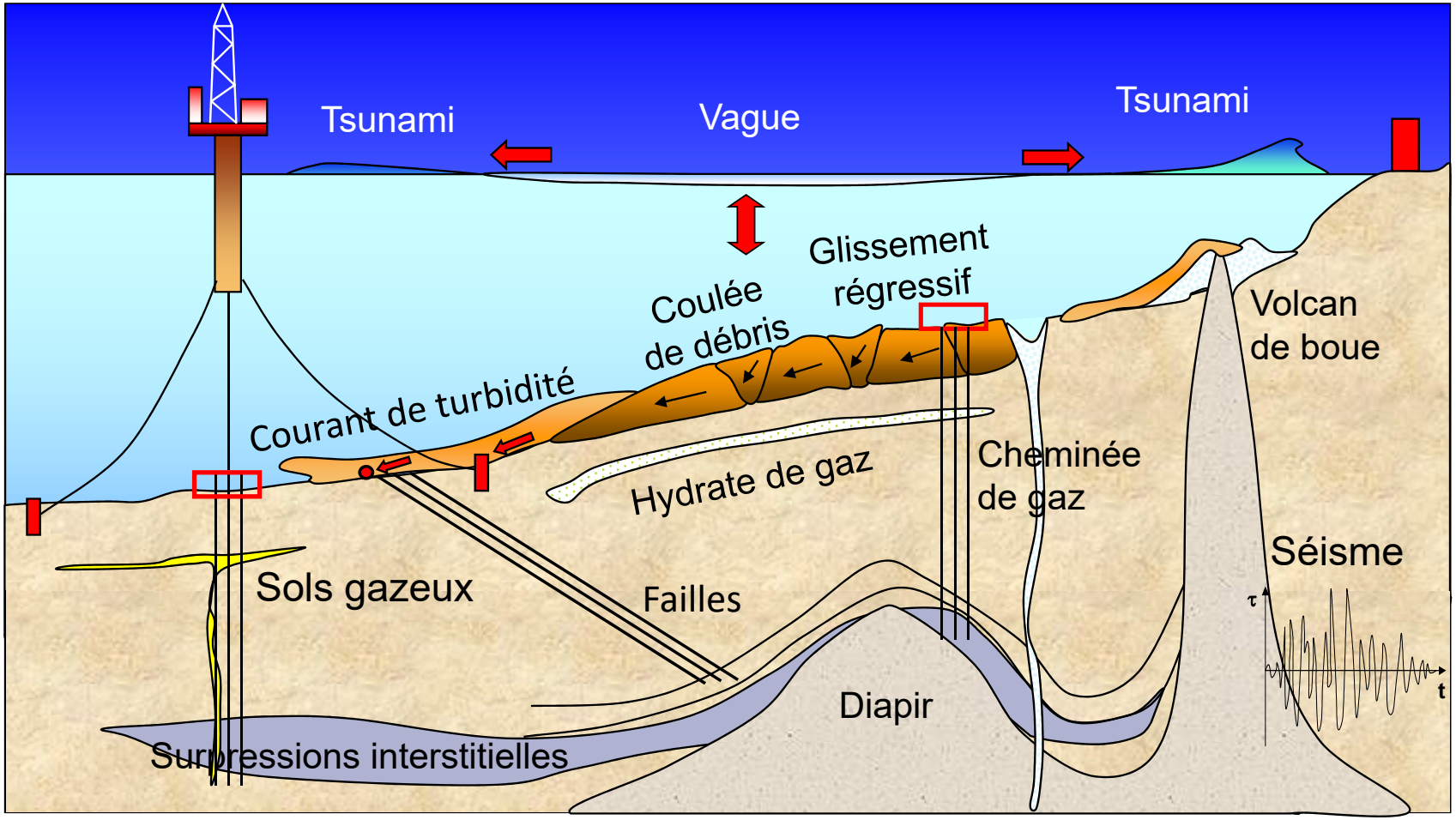
Golfe du Mexique

Plate-forme flottante avec puits sous-marins - Angola



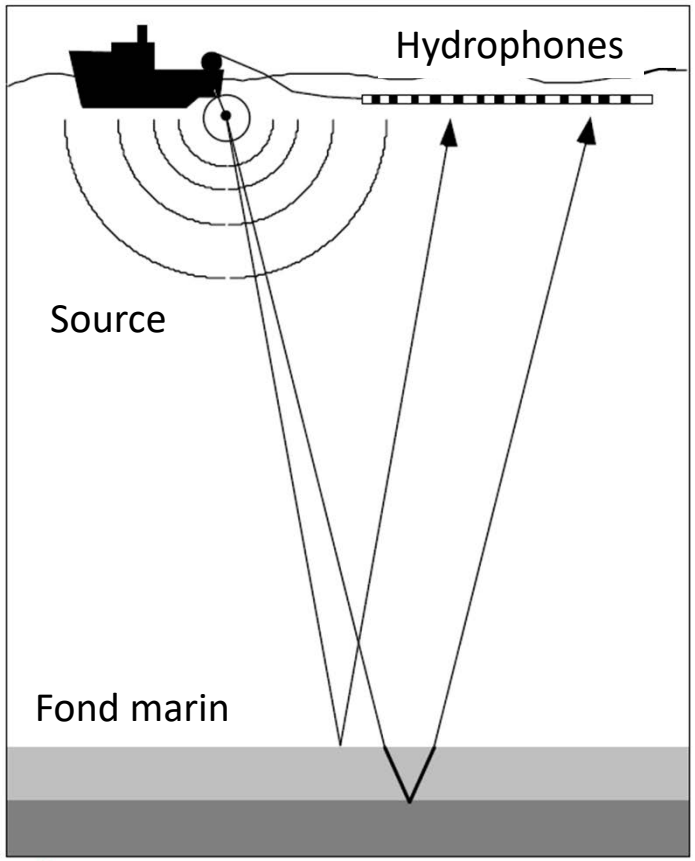


Phase Conceptuelle: Etude des géo-aléas



Crédit illustration: K. Kvalstad (2007)

Les reconnaissances sismiques réflexion



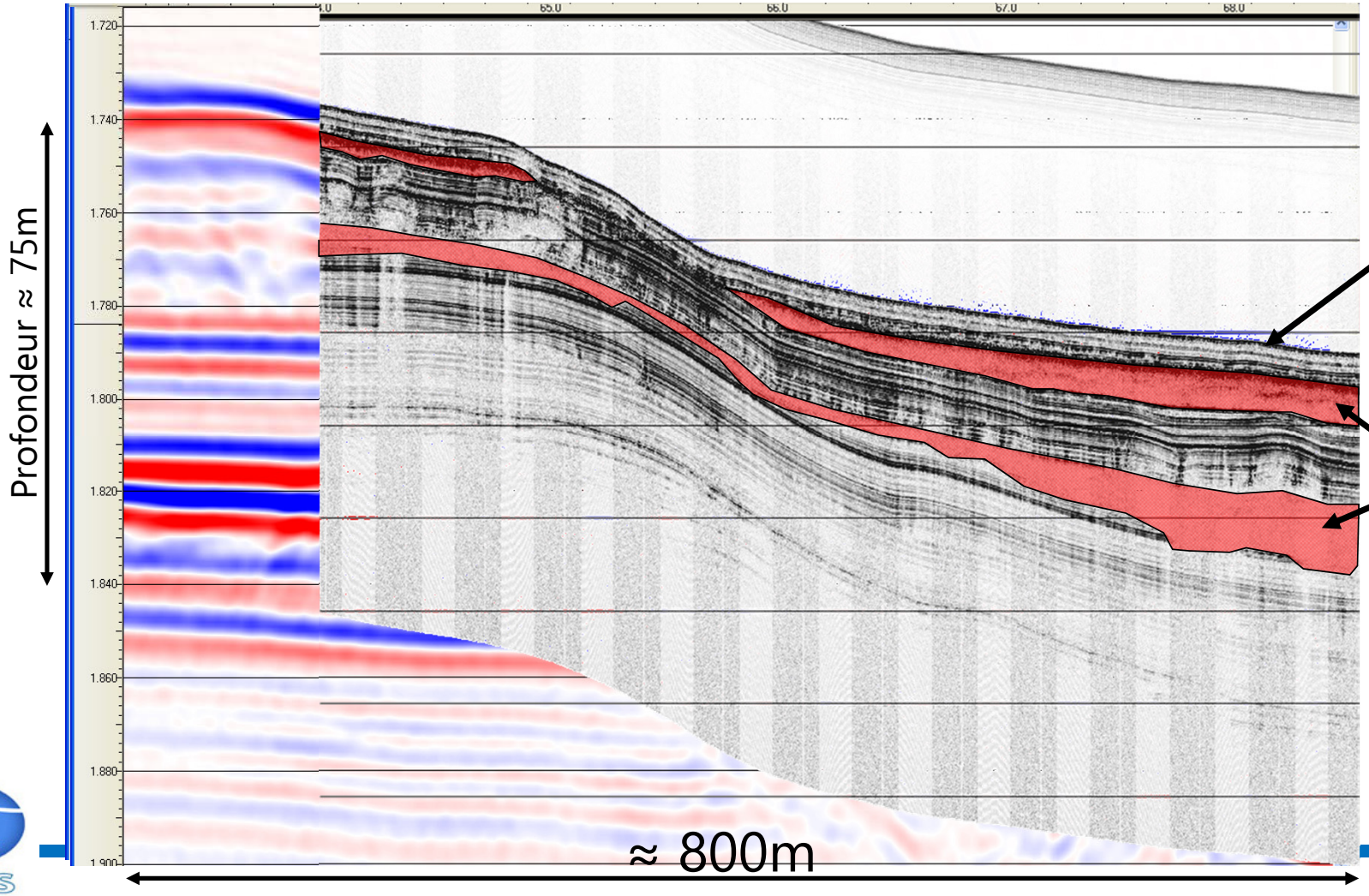
Objectif	Prospection d'hydrocarbure	Forage	Développement des champs
Type de données	3D	HR Haute Résolution	UHR AUV UUHR Ultra Haute Résolution
Estimation de la résolution verticale	12 m	6 m	0,5 m
Estimation de la profondeur de pénétration	5 000 m	1 500 m	60 m

Reconnaissances Ultra Ultra Haute Résolution: AUV

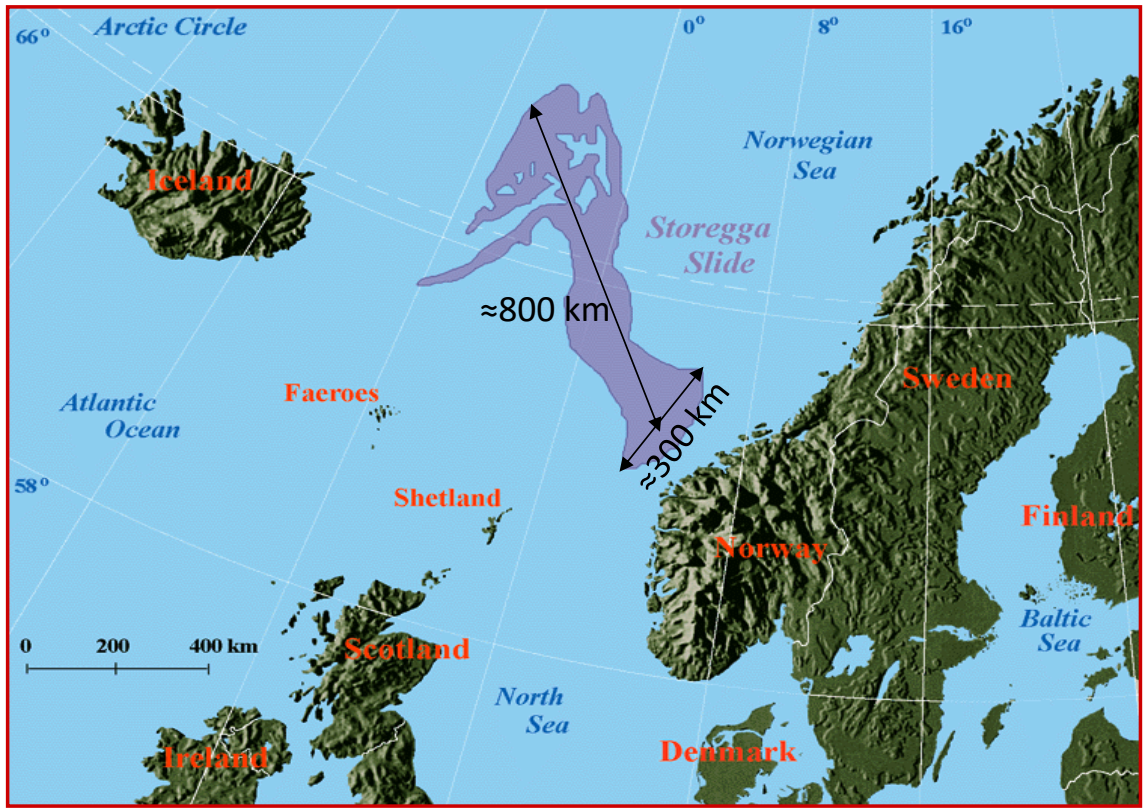
- AUV:
  - Autonomous Underwater Vehicle
- Sonar frontal pour évitement des obstacles
- Altimètre: mission à ≈ 40 m
- Sonar latéral:
  - Image du fond marin
- Echosondeur multi-faisceaux:
  - Relevé bathymétrique
- Sismique monotrace:
  - Source piézoélectrique ou Chirp:
  - Image ≈ 60 m sous le fond marin

Crédit vidéo: Fugro

Relevés sismiques: 3D, HR, et UUHR avec AUV



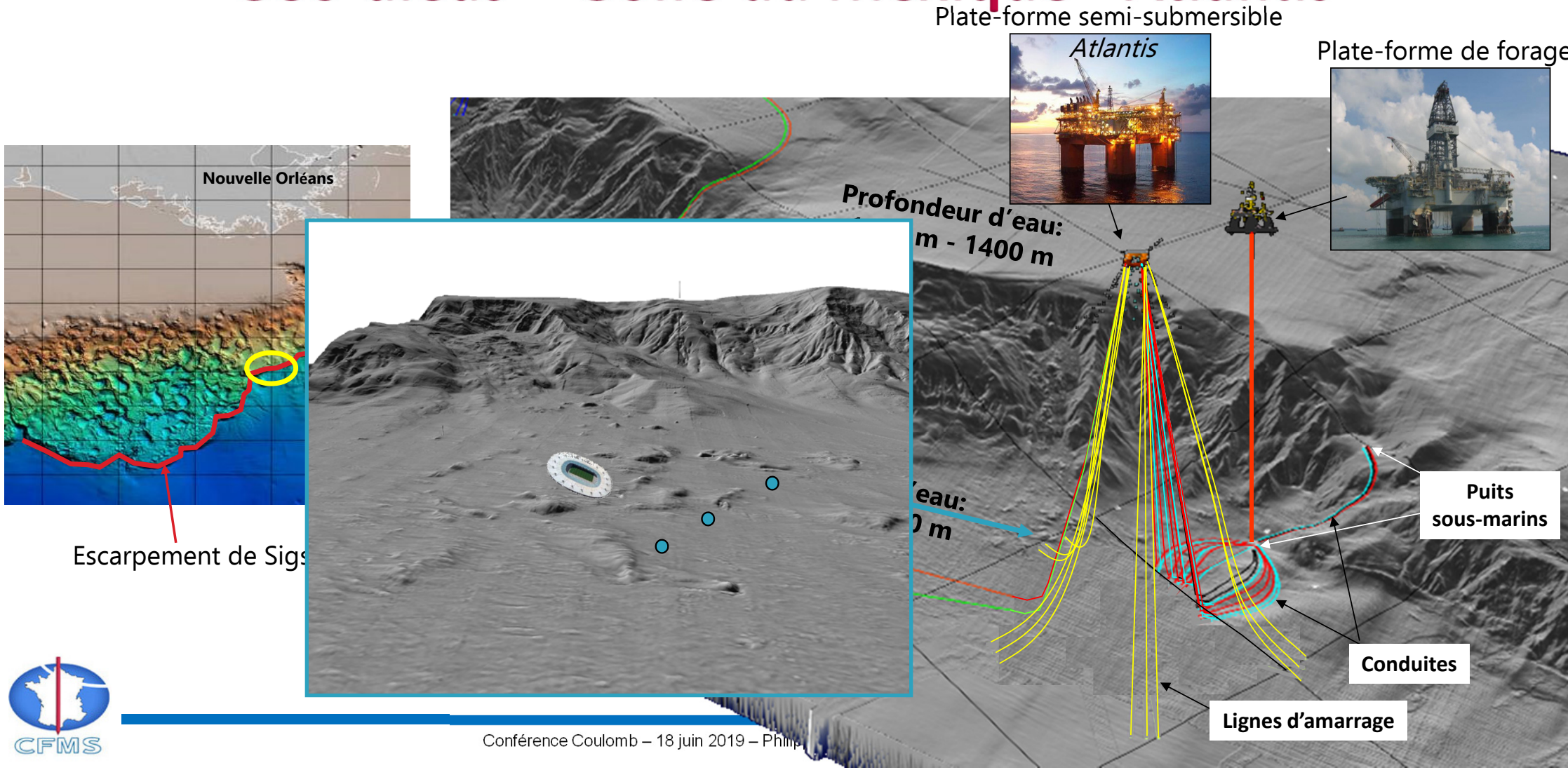
Glissement de Storegga – Mer de Norvège



Crédit illustration: Institut Norvégien de Géotechnique (NGI)

- Largeur de tête ≈ 300 km
- Longueur d'écoulement ≈ 800 km
- Volume ≈ 5 600 km^3
- Surface ≈ 34 000 km^2
- Age: 8100 BP
- Déstabilisation: Sédiments sous-consolidés + séisme (?)

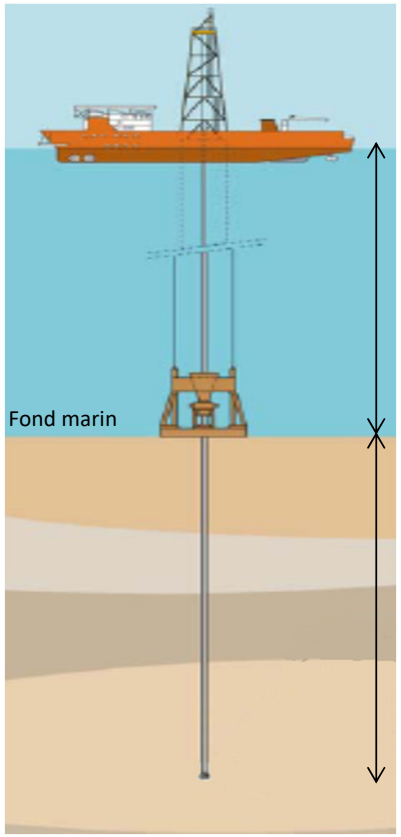
Géo-aléas – Golfe du Mexique - Atlantis



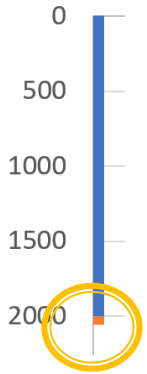
Sondage géotechnique en grands fonds

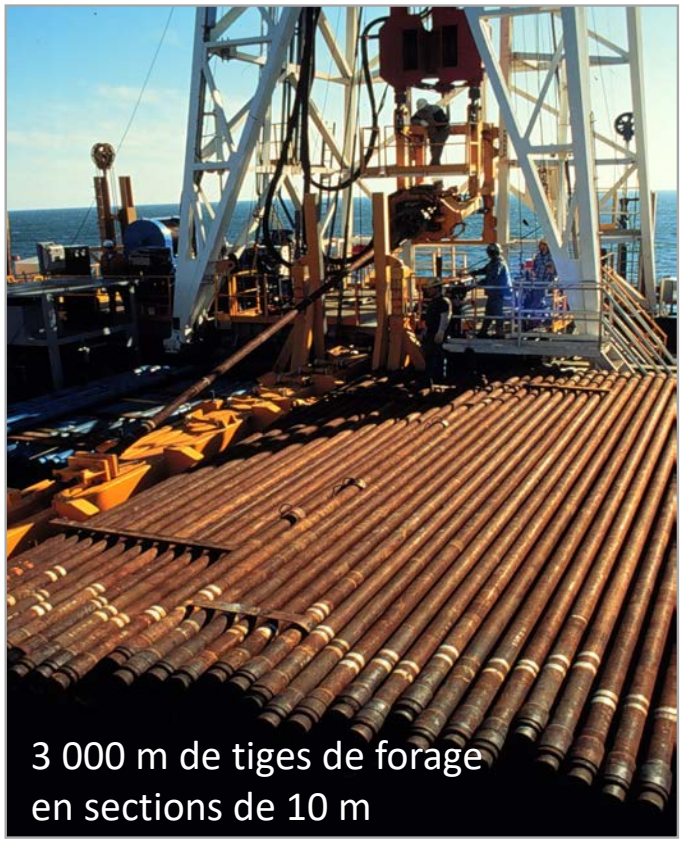
- Forage avec installation sur pont de bateaux

Installation de forage



A l'échelle:
Forage de 60 m
dans 2 000 m d'eau

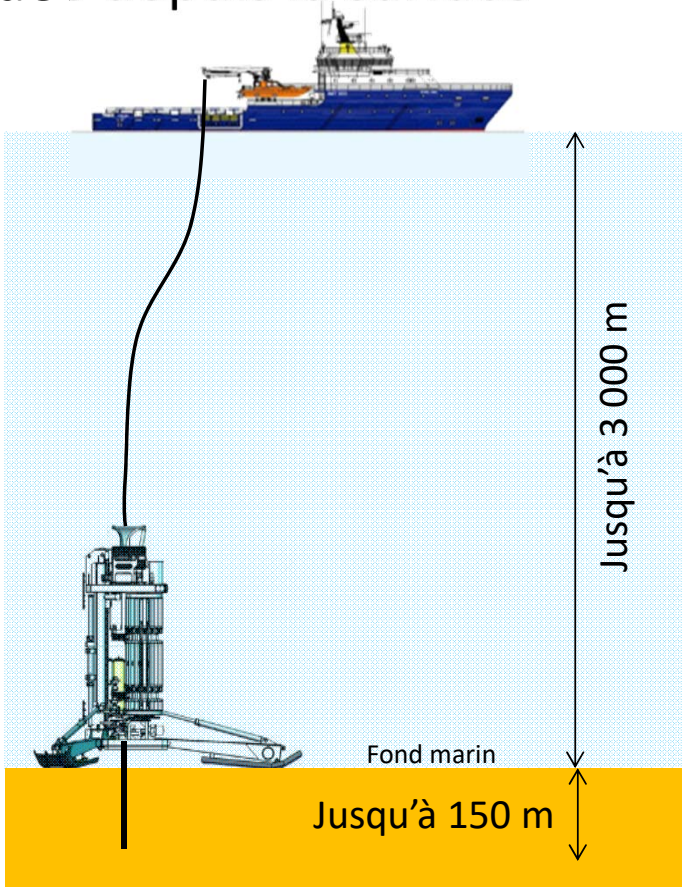




Crédit photos et illustration: Fugro

Sondage géotechnique en grands fonds

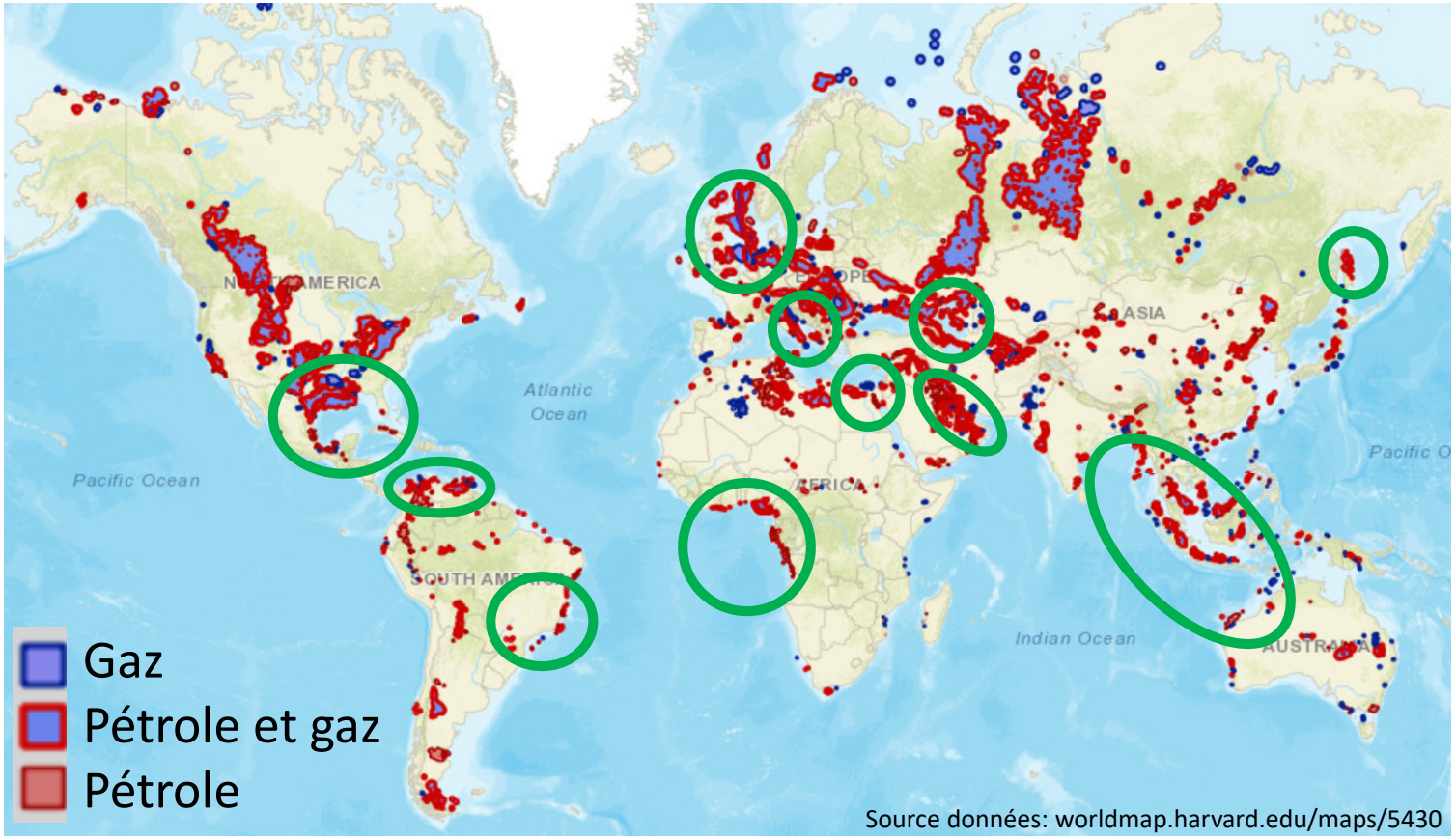
- Forage avec installation en fond de mer, télécommandée depuis la surface



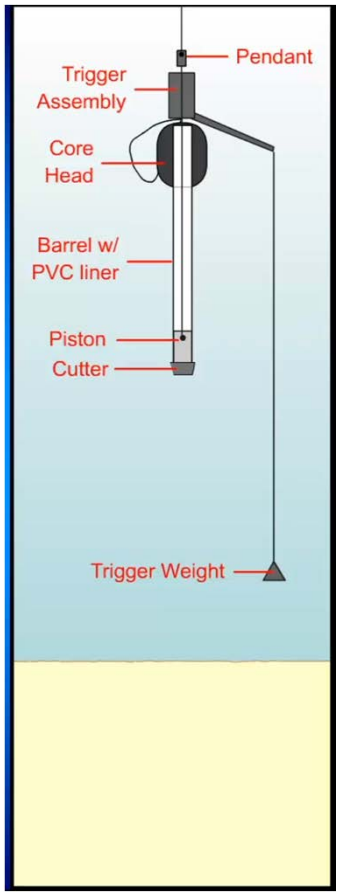
Crédit photos et illustration:
Benthic

Forage géotechnique en grands fonds

- Moyens navals importants – peu de choix – planification très à l'avance



Carottage géotechnique en grands fonds

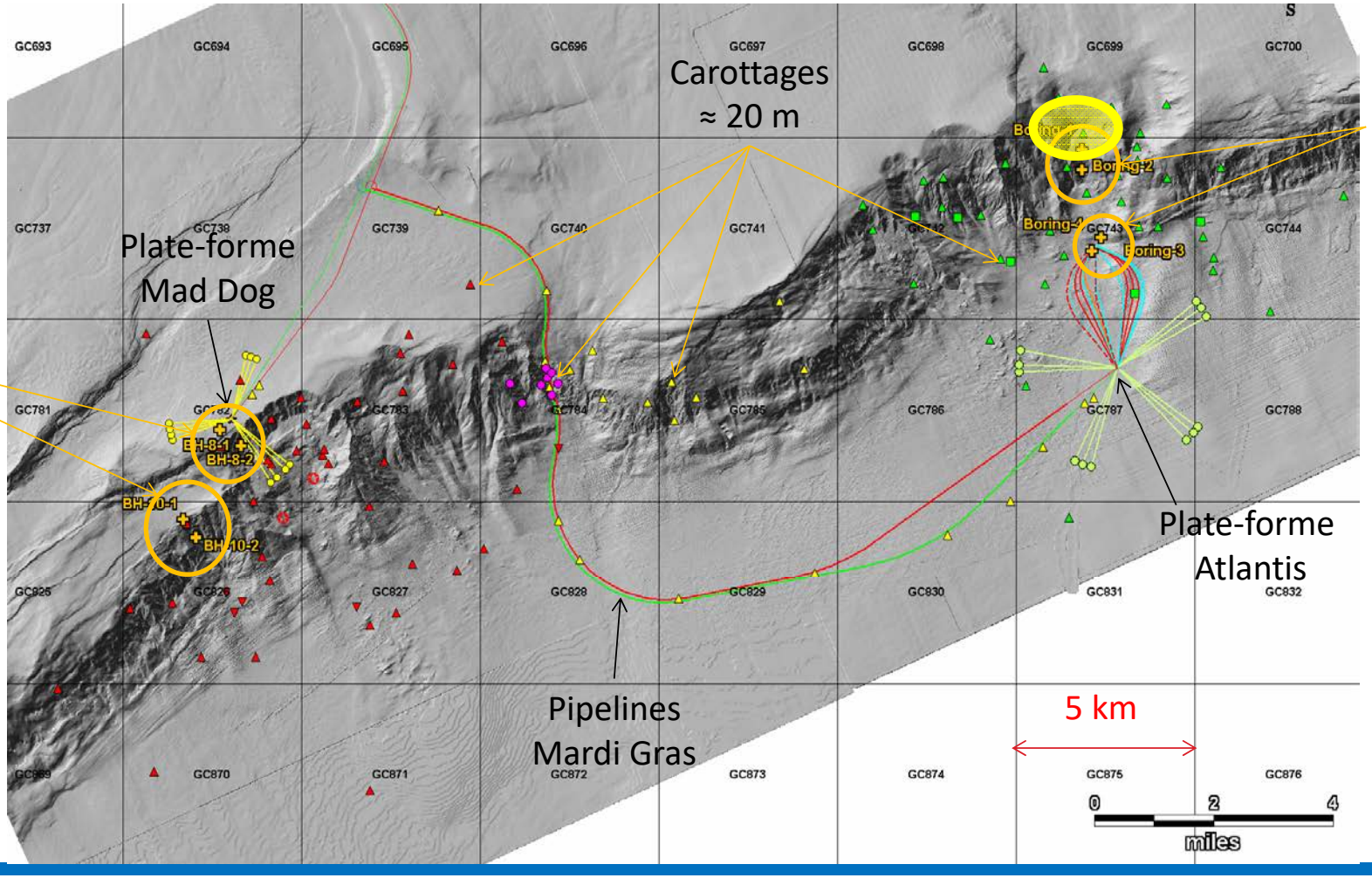


Crédit animation: TDI Brooks

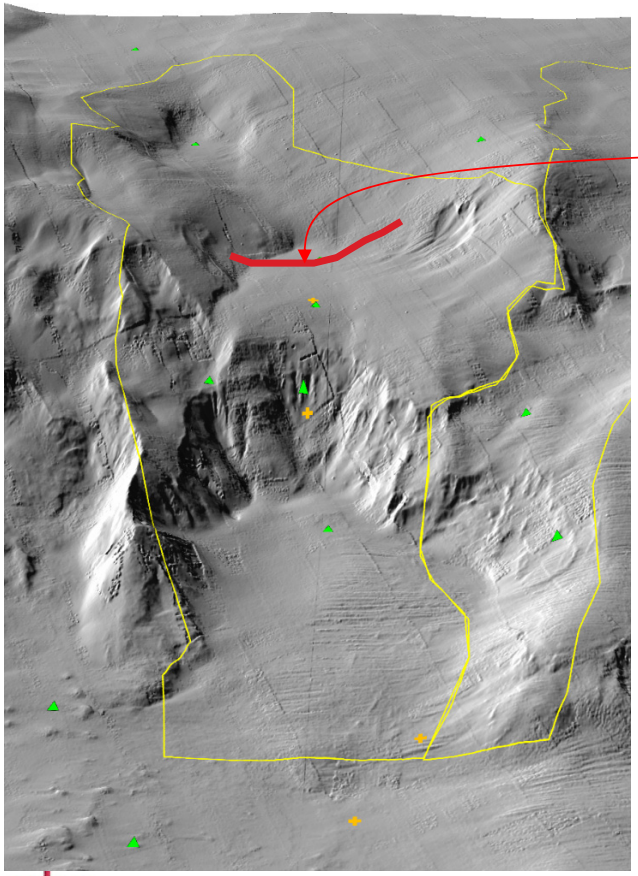
- Diamètre: 100 mm
- Longueur: < 20 m

Crédit photo: Fugro

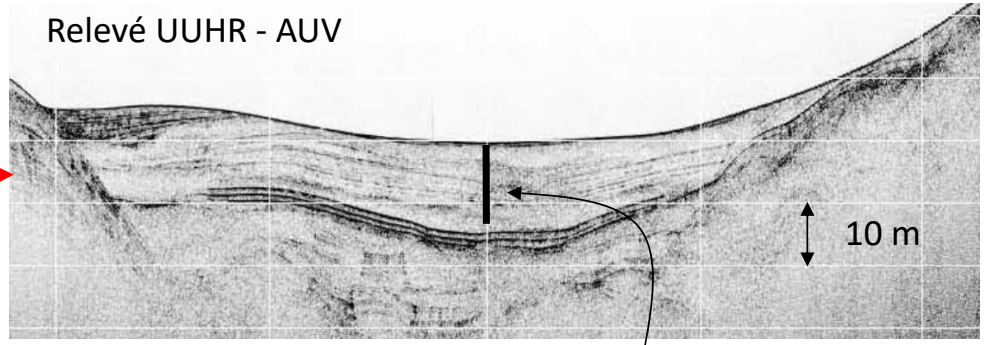
Reconnaissance géotechnique – Mad Dog et Atlantis



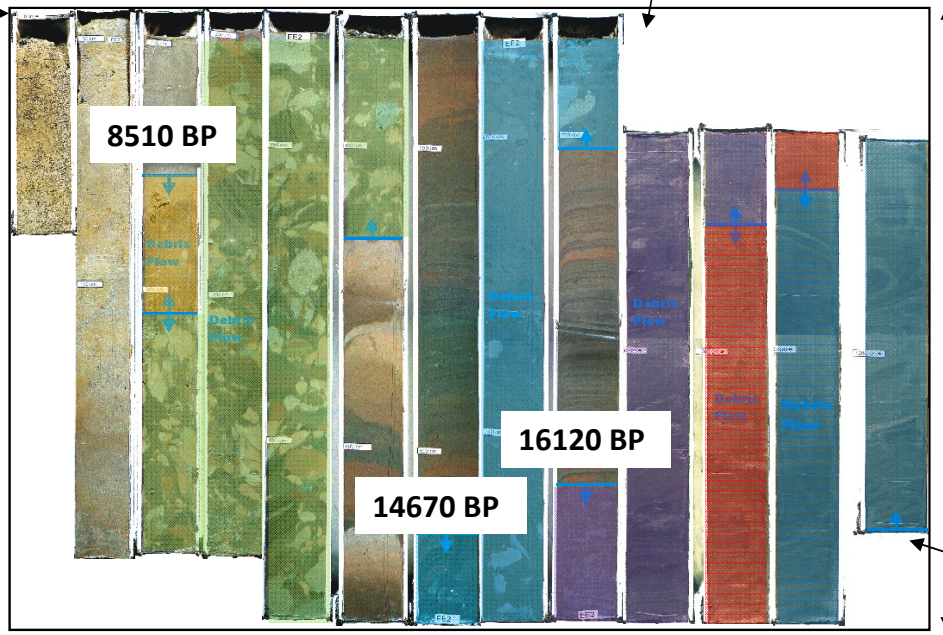
Intégration des données géophysiques et géotechniques



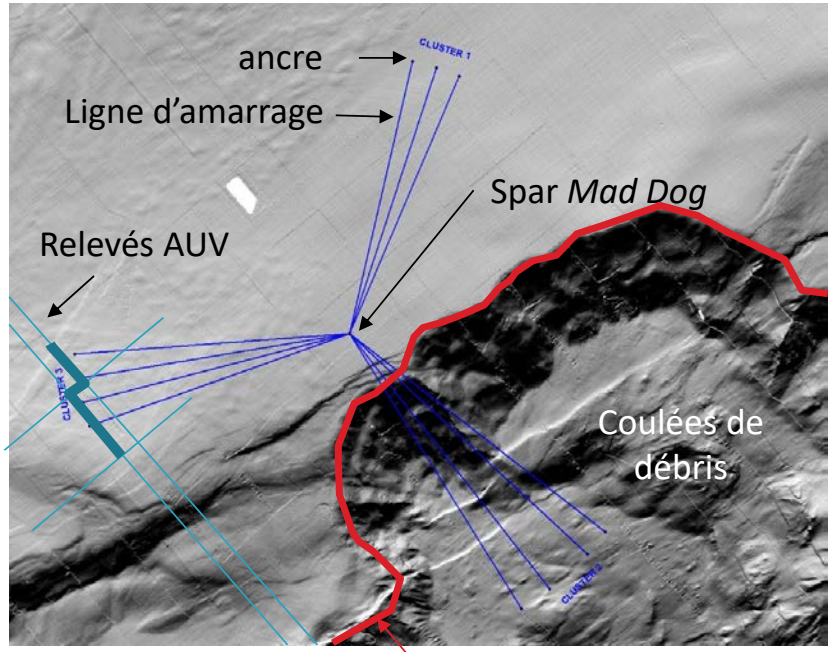
Relevé UUHR - AUV

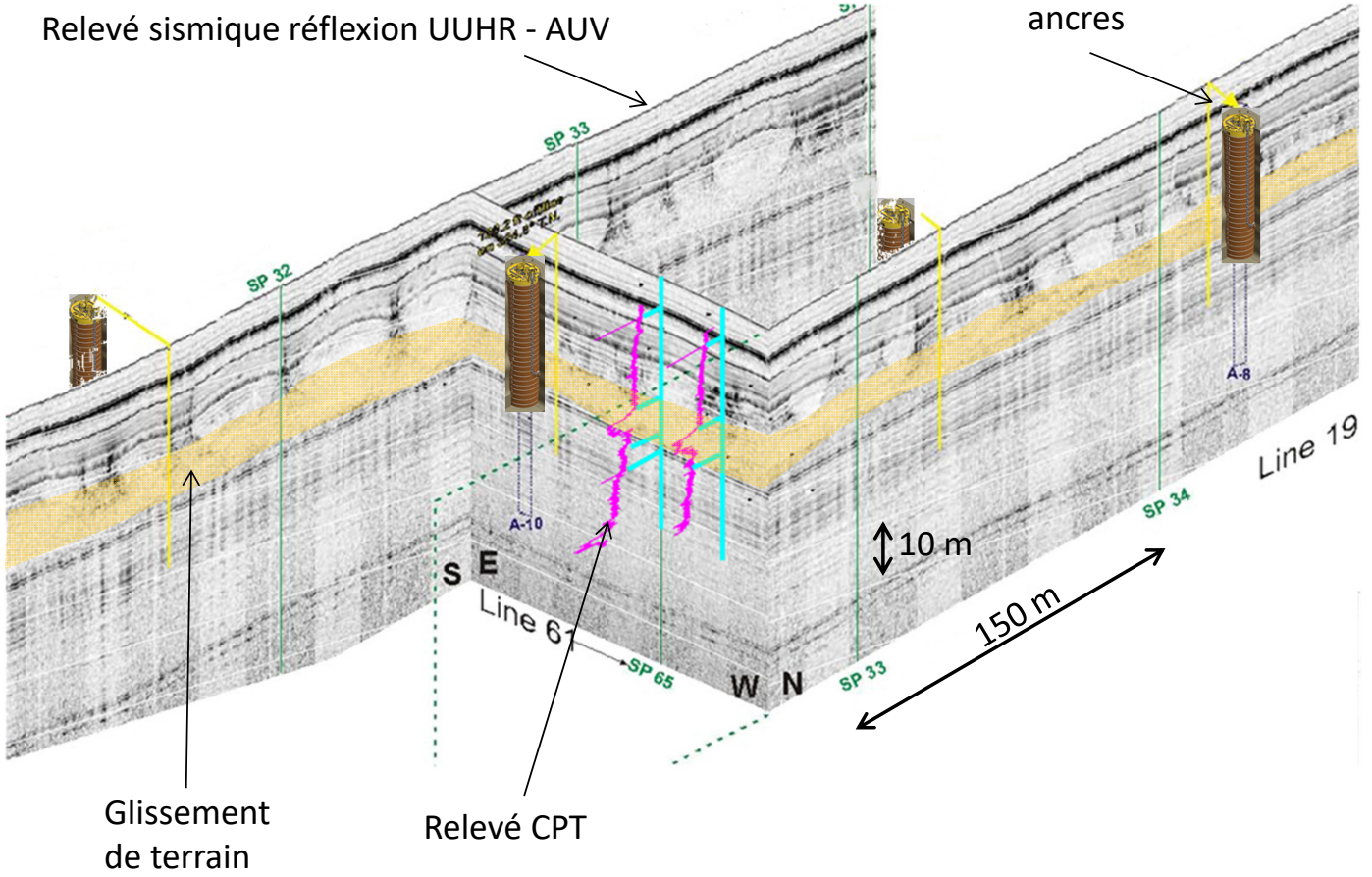


Fond marin

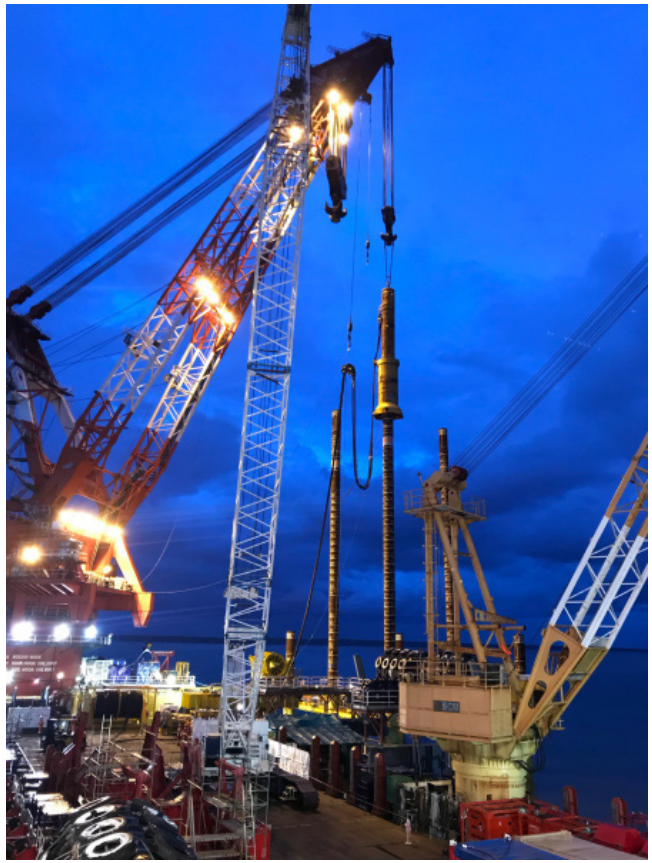


Intégration des données géophysiques et géotechniques



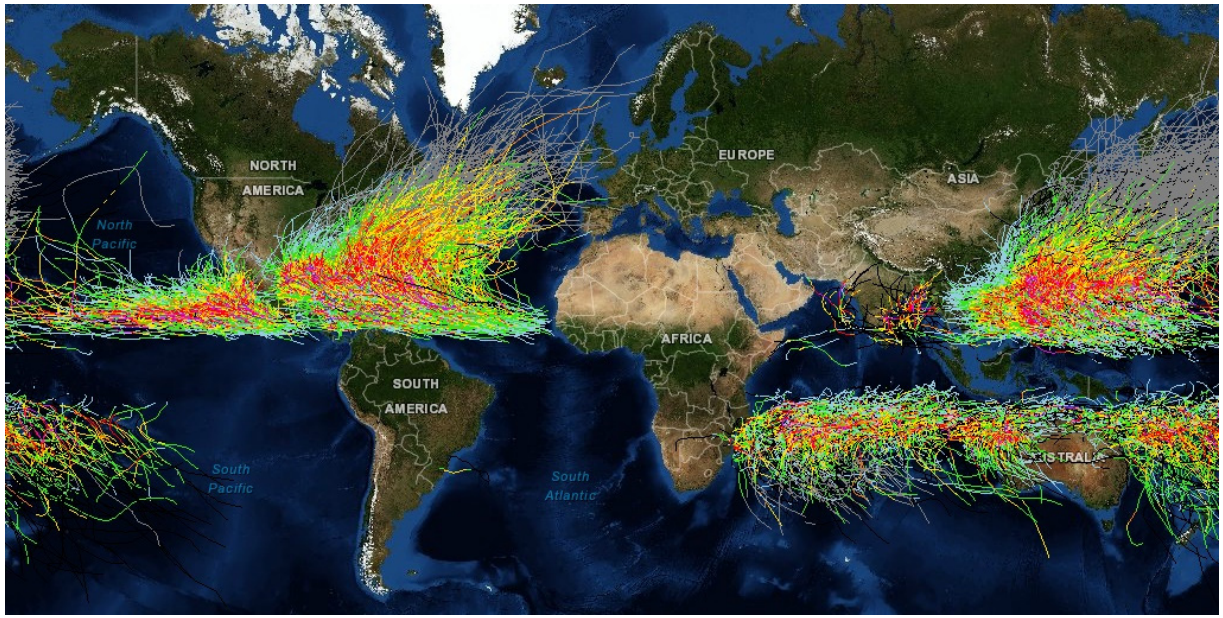


Défi: Dimensionnement des pieux battus



Dimensionnement: Ouragan – Typhon - Cyclone

- Hauteur typique de vague avec période de retour de 100 ans: H_{100} > 30 m

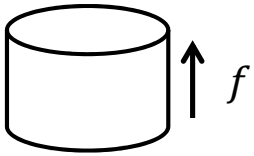


Chemins des ouragans-typhons-cyclones des 50 dernières années

Données: https://coast.noaa.gov/hurricanes/

Pieux sous charges axiales dans les sols cohérents

- Frottement unitaire, f : méthode en contraintes totales ou effectives ?



$$f = \alpha\, s_u \qquad \text{ou} \qquad f = \beta\, \sigma'_v \quad ?$$

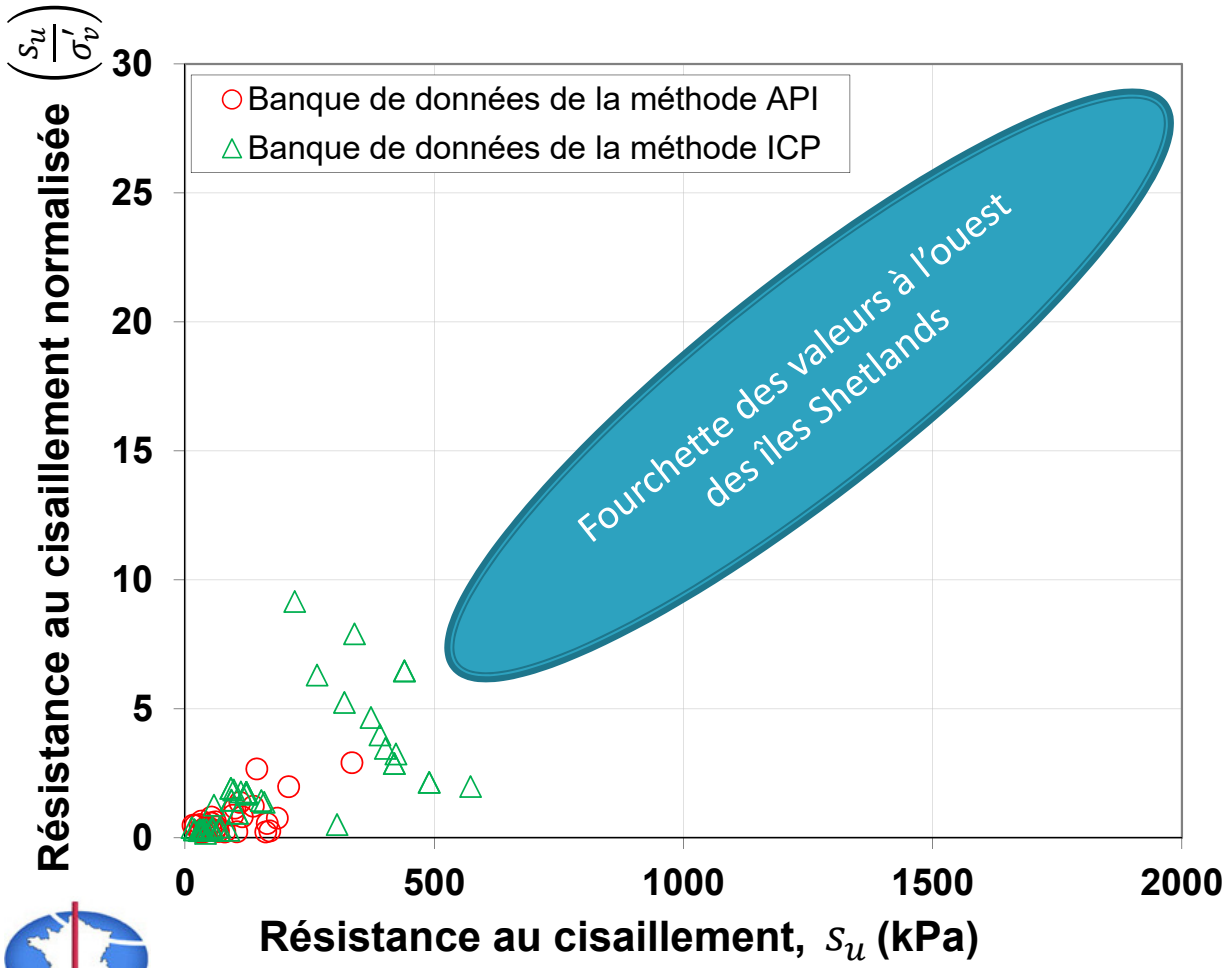
s_u : Résistance au cisaillement

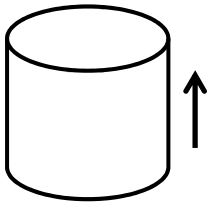
σ'_v : Contrainte effective verticale

- Méthode de l'API (American Petroleum Institute) et de l'ISO:

$$f = \alpha\, s_u$$

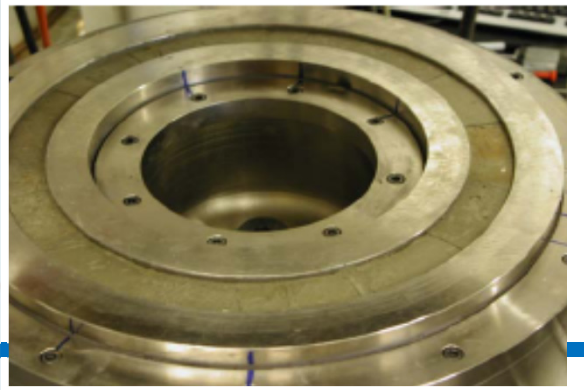
Méthode Imperial College (ICP) en contraintes effectives





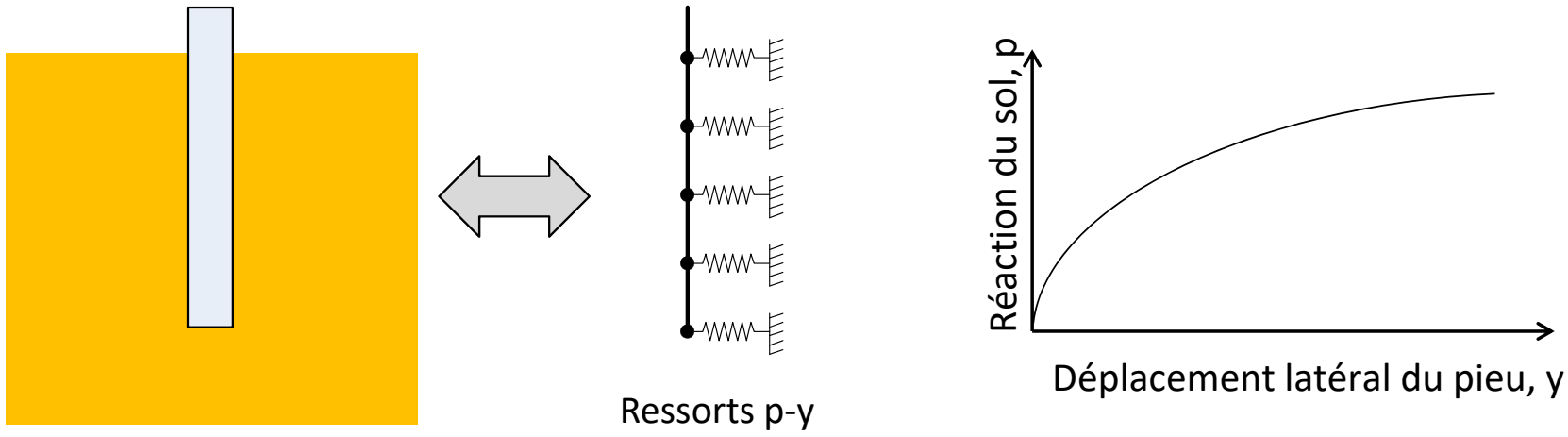
$$f = 0{,}8 \cdot \sigma'_{rc} \cdot tan(\delta_f)$$

- σ'_{rc} : contrainte effective radiale après équilibre (Jardine *et al.*, 2005)
- δ_f : angle de frottement à l'interface sol-pieu ($\delta_{résiduel} < \delta_f < \delta_{pic}$) mesuré par essai à la boîte de cisaillement circulaire



Pieux sous charges latérales dans les sols cohérents

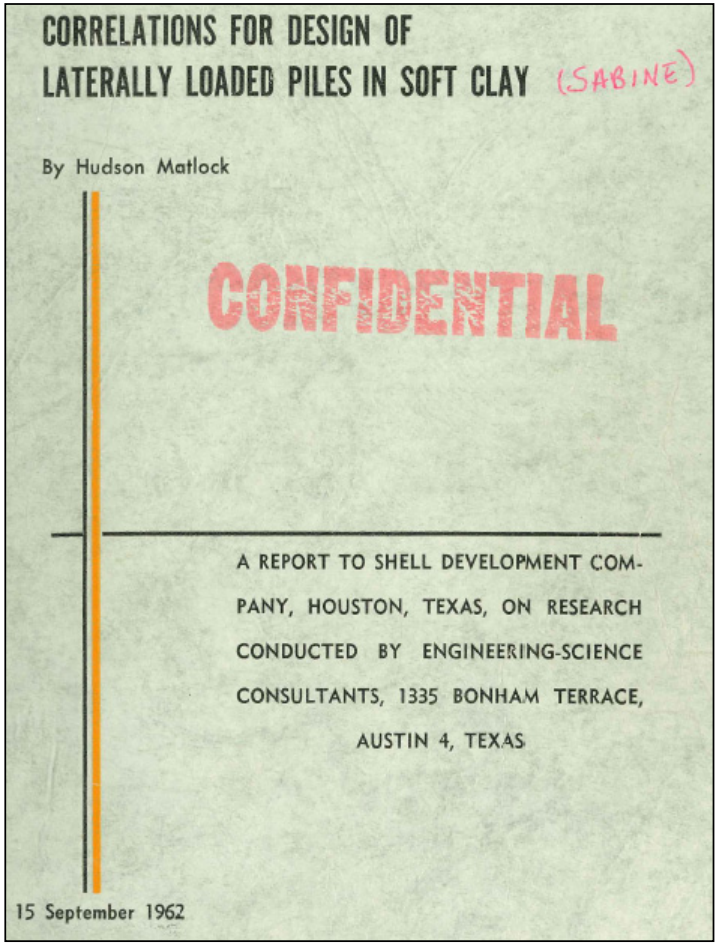
Méthode des poutres – courbes p-y
Instaurée par McClelland et Focht (1956)



Réflexions sur les recommandations de l'API / ISO

- Les courbes de Matlock (1970)
  - Développées en 1962 à partir d'essais limités au site Sabine River en 1961;
  - Publiées en 1970;
  - Recommandées par l'API depuis 1972;
  - Les courbes monotones et cycliques sous-estiment la résistance ultime et la raideur de la résistance du sol;

- Utilisées car elles vont *en apparence* dans le sens de la sécurité (le moment de flexion dans le pieu est, en général, surestimé)


CORRELATIONS FOR DESIGN OF
LATERALLY LOADED PILES IN SOFT CLAY (SABINE)

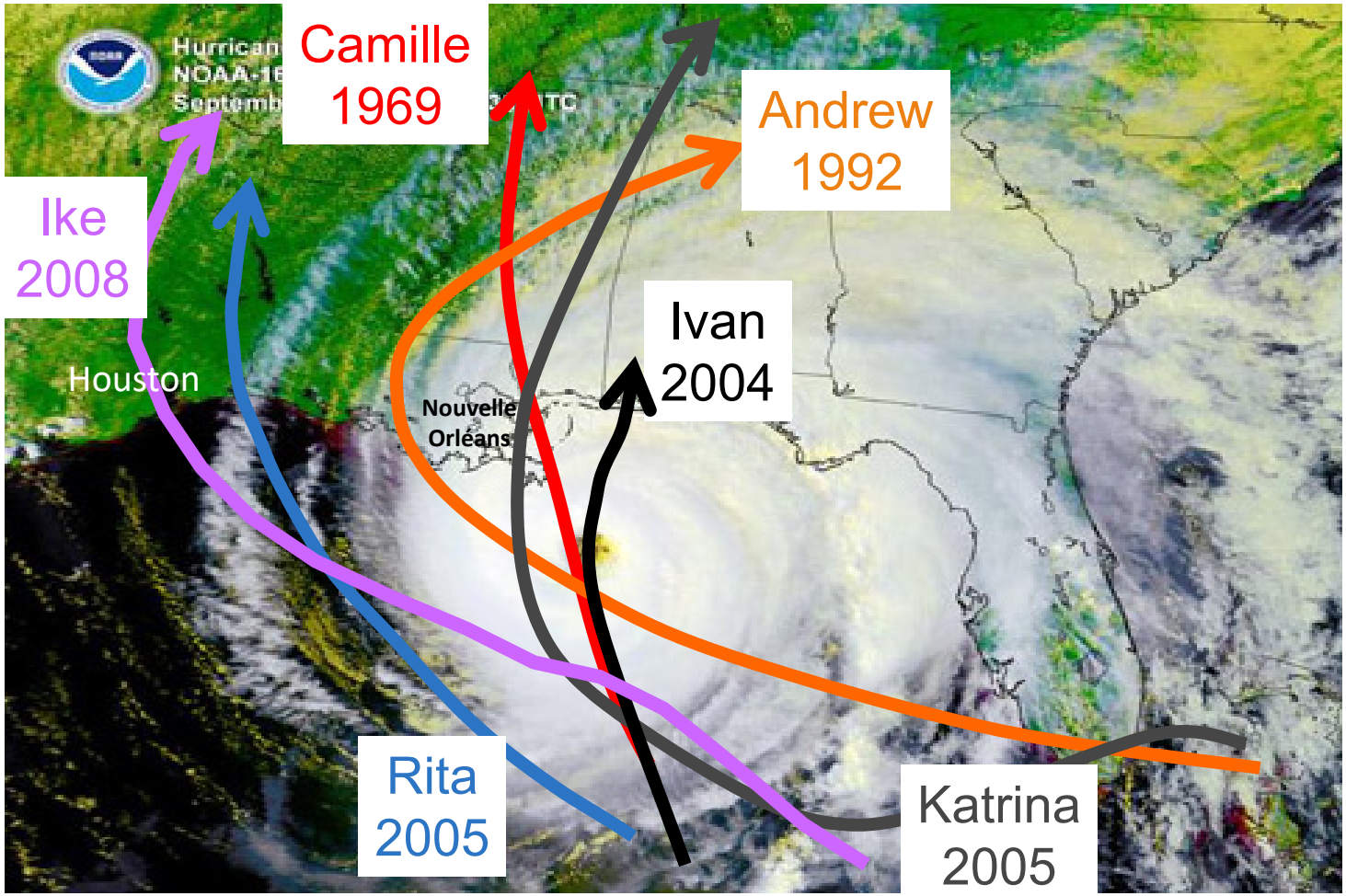
By Hudson Matlock

CONFIDENTIAL

A REPORT TO SHELL DEVELOPMENT COMPANY, HOUSTON, TEXAS, ON RESEARCH CONDUCTED BY ENGINEERING-SCIENCE CONSULTANTS, 1335 BONHAM TERRACE, AUSTIN 4, TEXAS

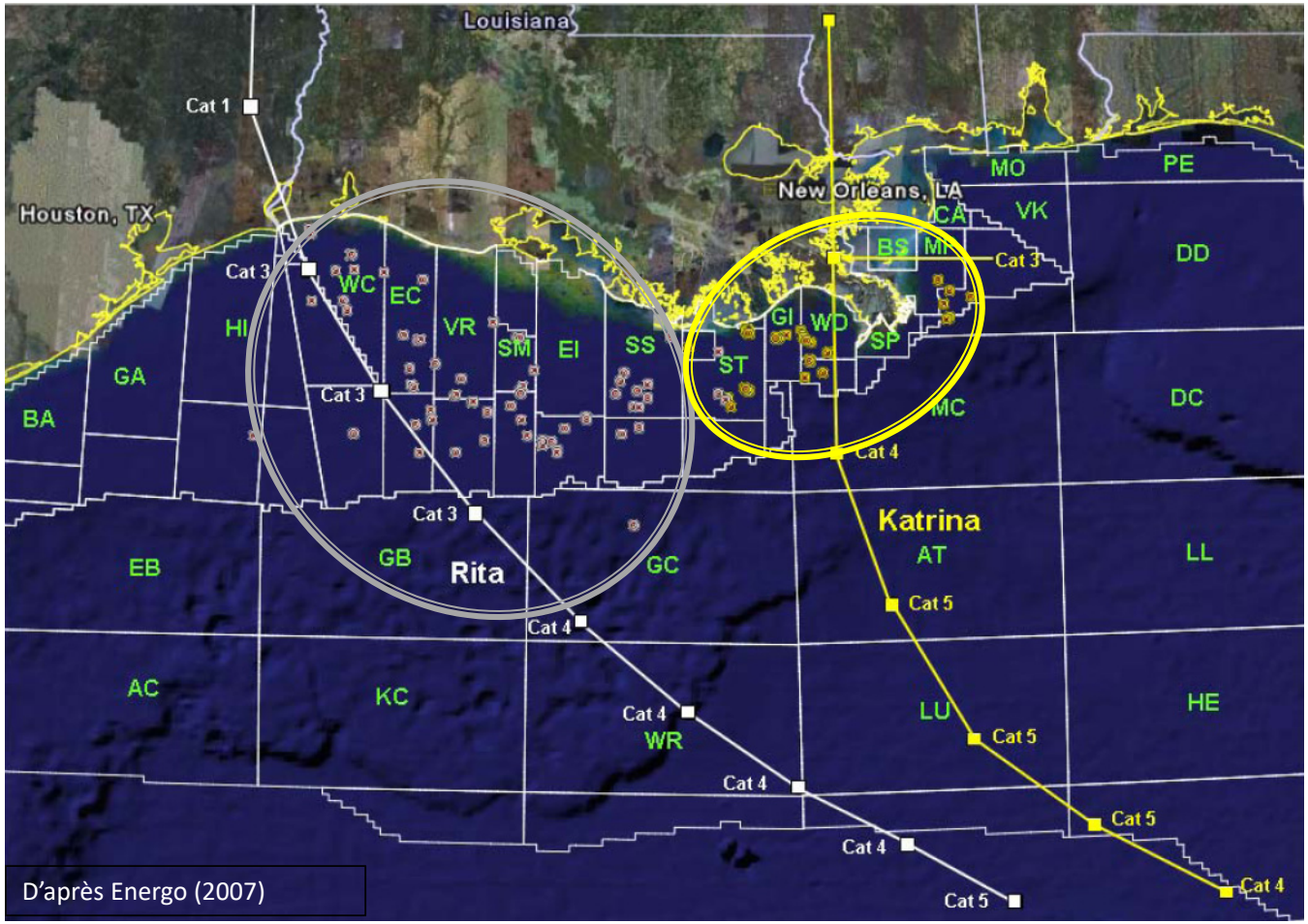
15 September 1962

Retour d'expérience: Ouragans dans le Golfe du Mexique



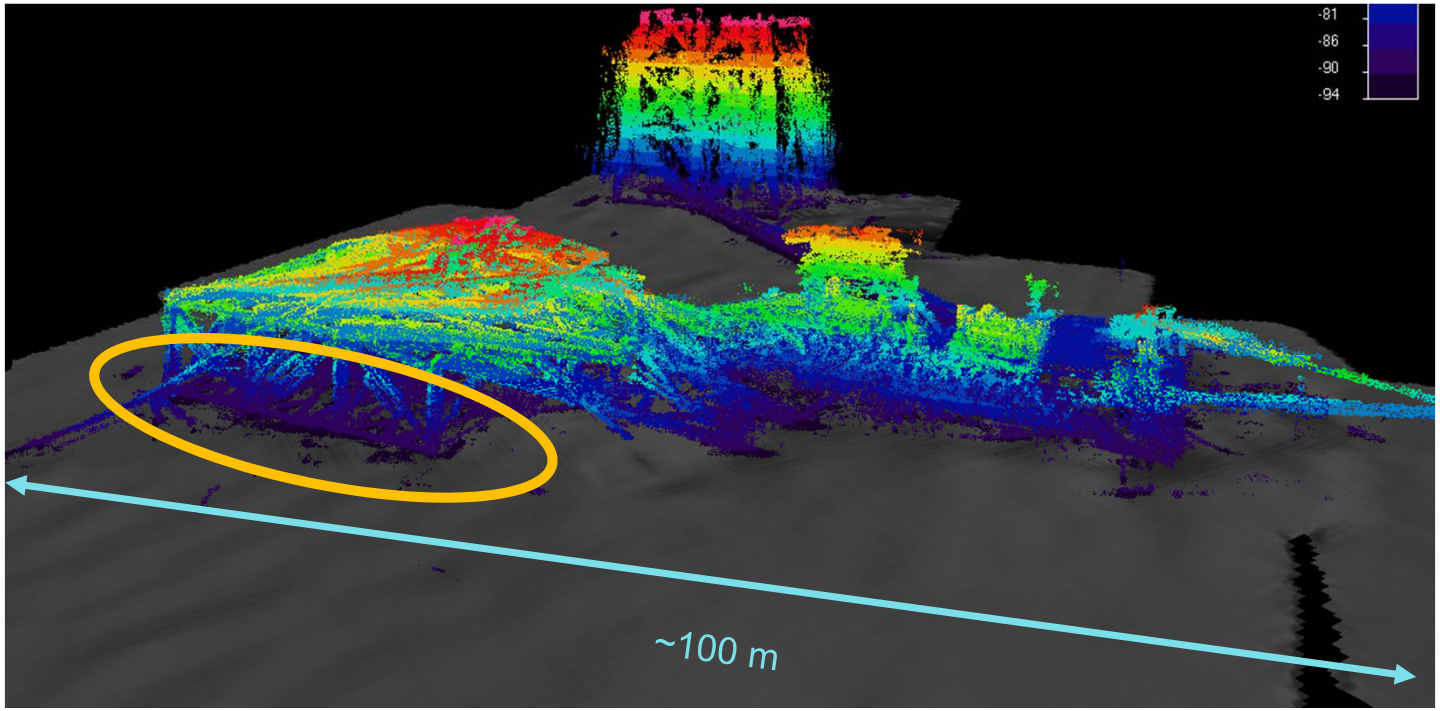
Ouragan Ivan
15 sept. 2004
Crédit: NOAA

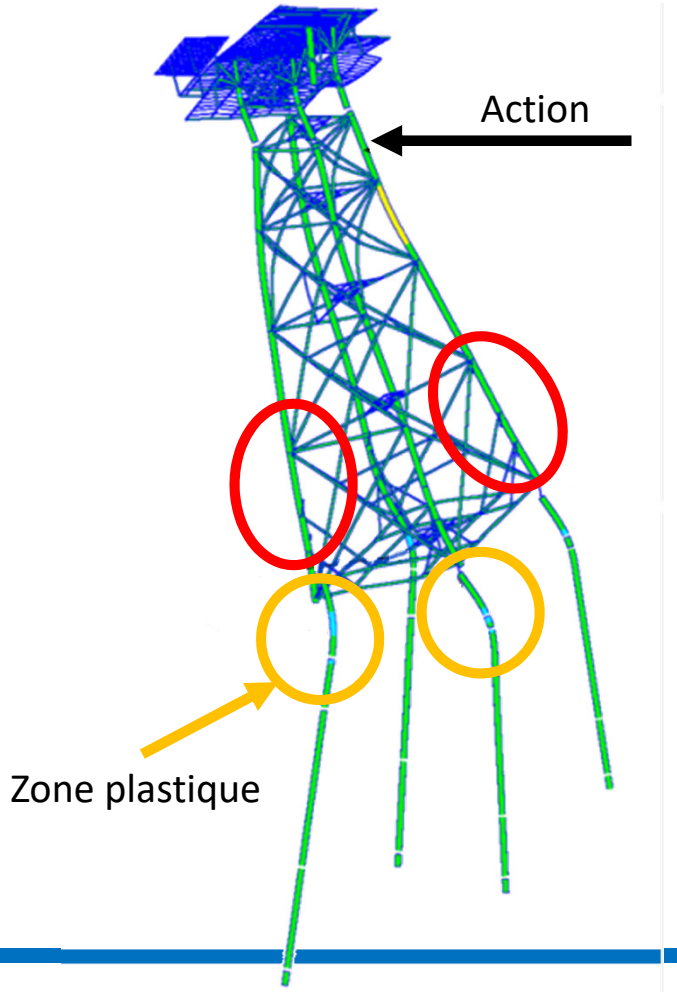
Plates-formes détruites - Ouragans Rita et Katrina



D'après Energo (2007)

Mécanismes de rupture: observations et prédictions





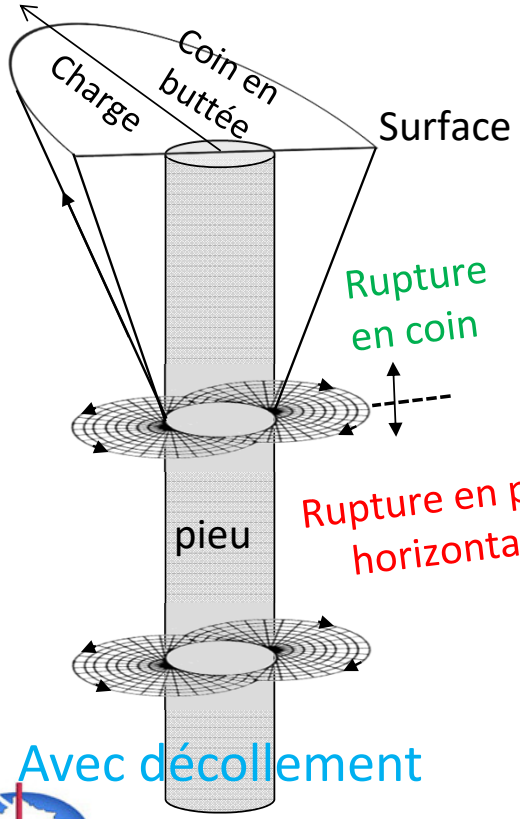
Mécanisme de rupture des pieux longs et flexibles

- Réaction ultime: $p_u = s_u\ D\ N_p$
  - s_u : résistance au cisaillement
  - D : diamètre
  - N_p : facteur de portance latéral

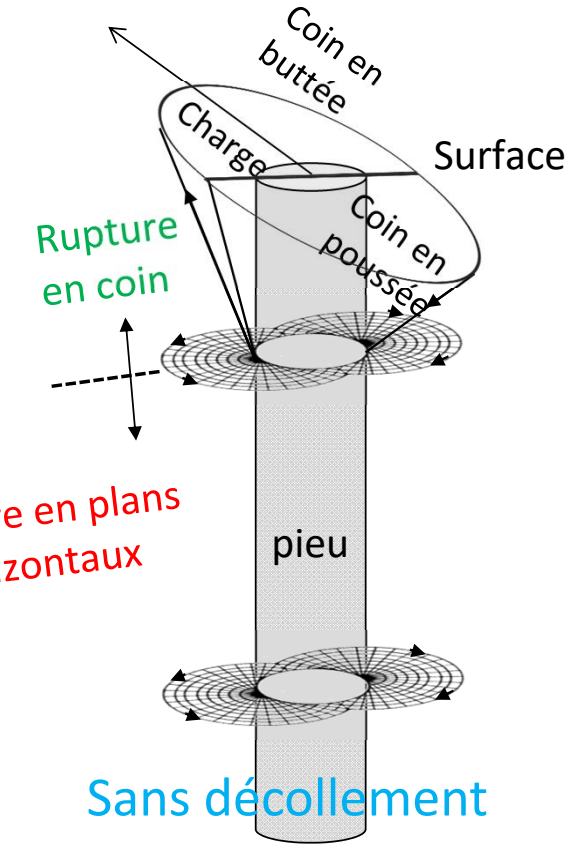
Méthode éléments finis +
Limite supérieure de la théorie de la plasticité
Yu *et al.* (2015); Zhang *et al.* (2016)

Limite supérieure de la théorie de la plasticité
Randolph et Houlsby (1984)

- $N_p > N_p$ de Matlock

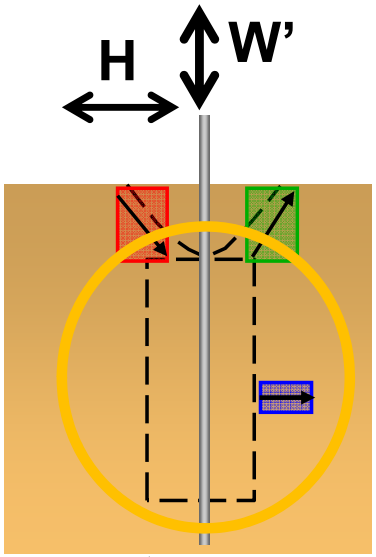


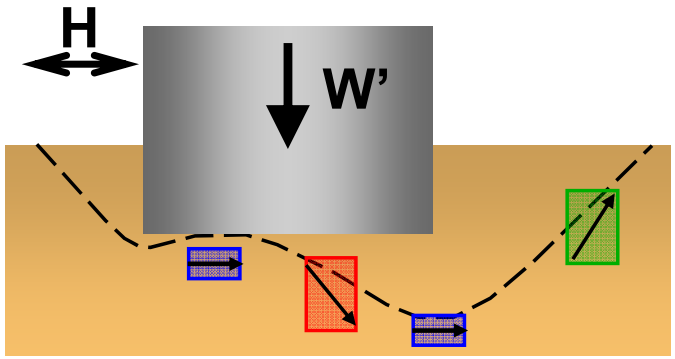
Avec décollement

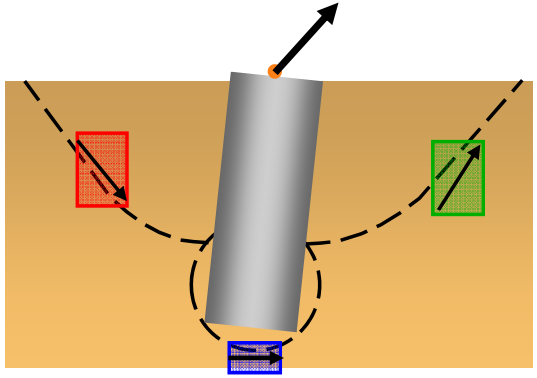


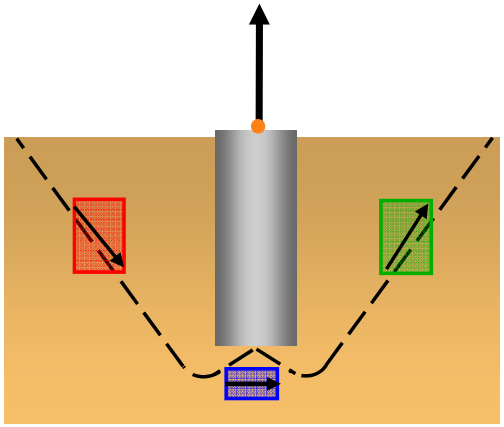
Sans décollement

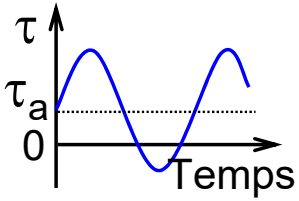
Surfaces de rupture et chemins des contraintes





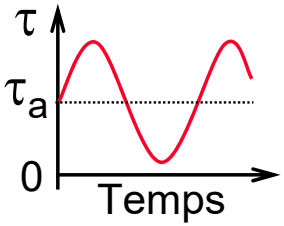




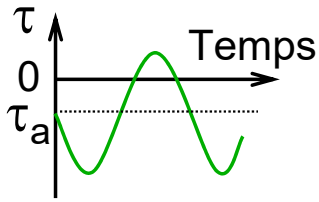


DSS

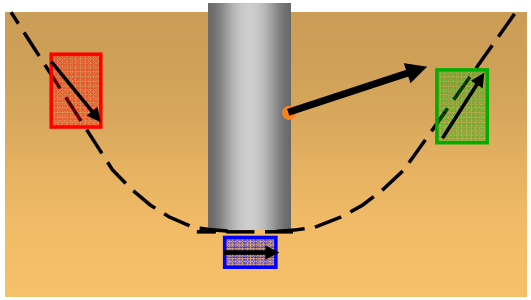
Direct de Cisaillement Simple

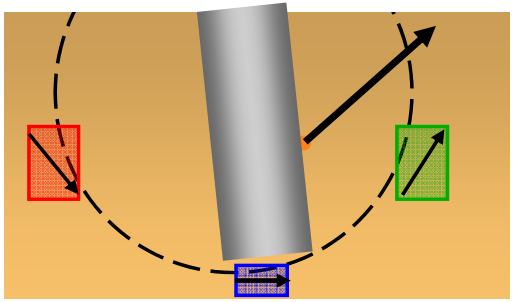


Triaxial compression



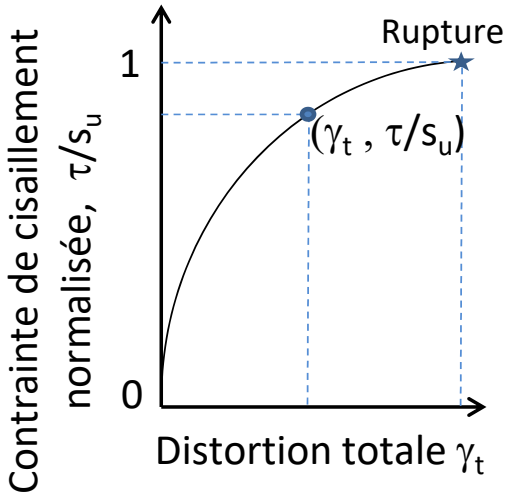
Triaxial extension





Courbe p-y par mise à l'échelle de courbe d'essai DSS

DSS

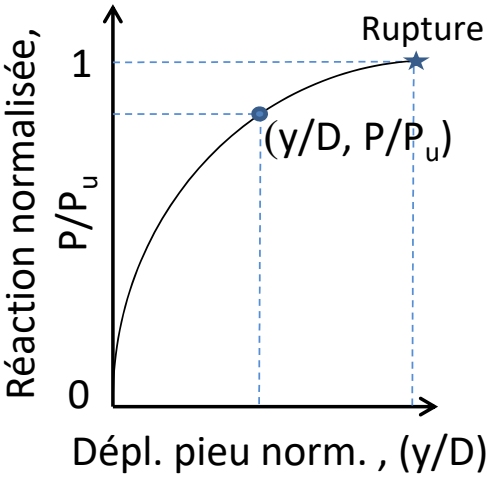


Utilisée pour définir le modèle d'écrouissage cinématique

Mise à l'échelle

Chaque point $(\gamma_t , \tau/s_u)$ sur la courbe DSS normalisée est transformé en un point équivalent $(y/D, P/P_u)$ sur la courbe p-y normalisée (Jeanjean *et al.,* 2017).

p-y



y: déplacement latéral ;
D: diamètre du pieu

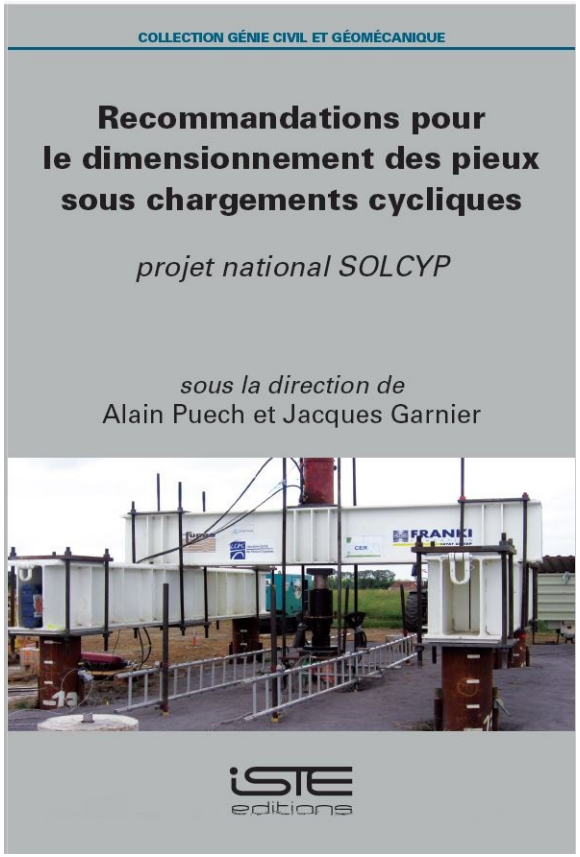
- Courbes p-y par défaut suggérées en l'absence de données DSS: f(I_p; OCR)

Vérification de la méthode par rétro-analyses

- Méthode: développée à partir des propriétés fondamentales du sol, et non sur la base de résultats d'essais sur pieux. Applicabilité vérifiée par rétro-analyses de 11 séries d'essais:

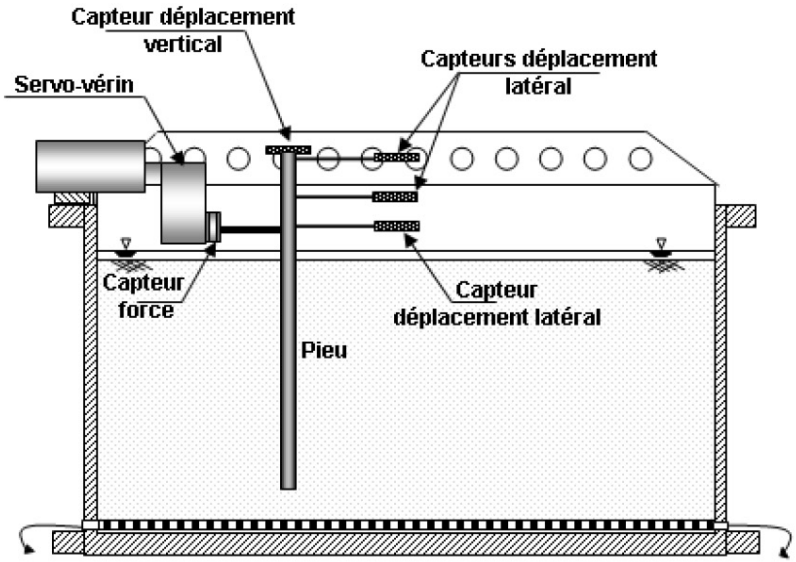
Essai	Type d'essai
Lake Austin (1956)	1-g à petite échelle
Sabine River (1961)	1-g à petite échelle
Manor (late '60s)	1-g à grande échelle
Haga (1983)	1-g à petite échelle
Tilbrook Grange (1988)	1-g à grande échelle
Hamilton & Murff (1995)	Centrifugeuse
Doyle et al. (2004)	Centrifugeuse
Jeanjean (2009)	Centrifugeuse
LCR&A - New Orleans (2010)	1-g à grande échelle
Zhang et al. (2011)	Centrifugeuse
Zakeri et al. (2014)	Centrifugeuse

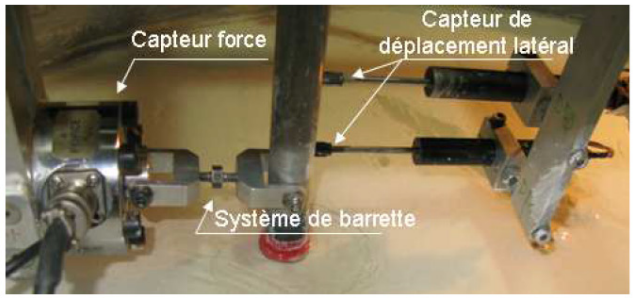
Project SOLCYP: *SOL*licitations *CY*cliques sur *P*ieux



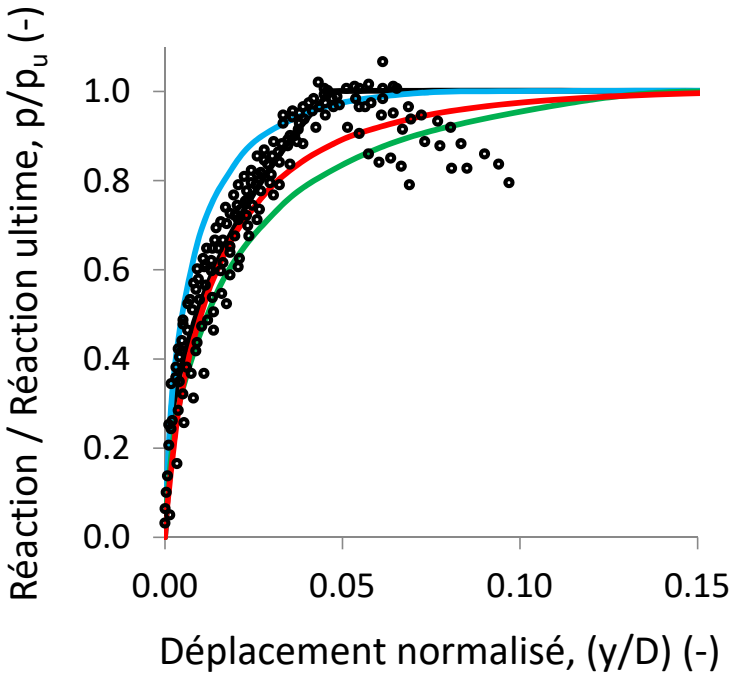
- Thèse de Doctorat de Meriam Khemakhem (2012):

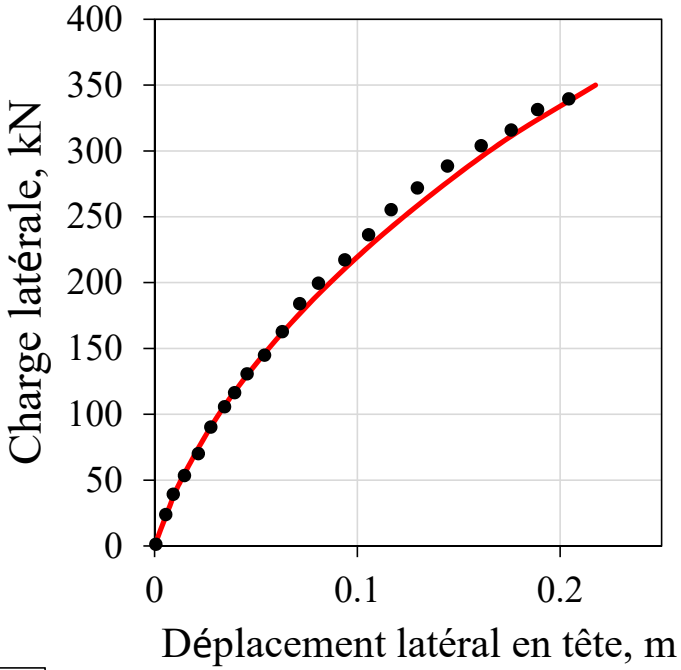
Etude expérimentale de la réponse aux charges latérales monotones et cycliques d'un pieu foré dans l'argile

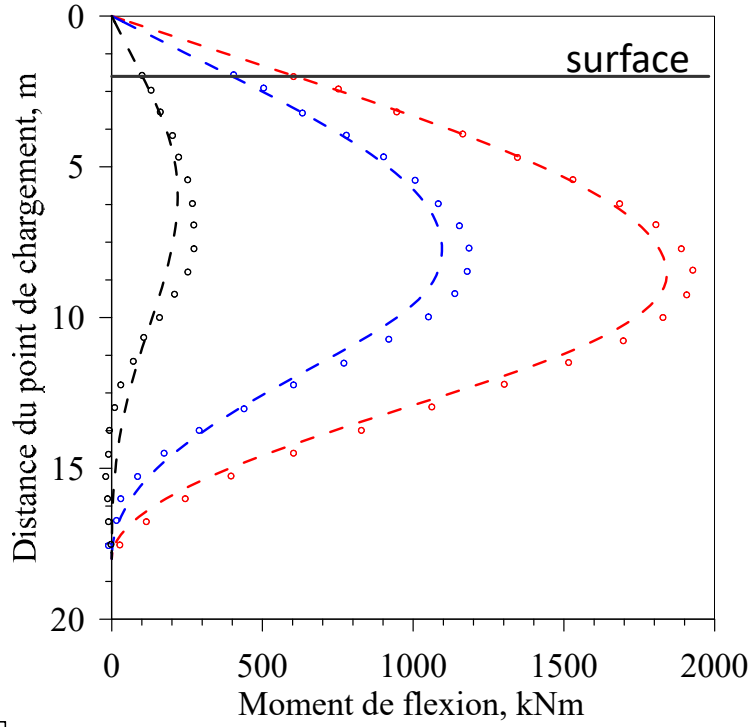




Rétro-analyse – Khemakhem (2012) – essai monotone







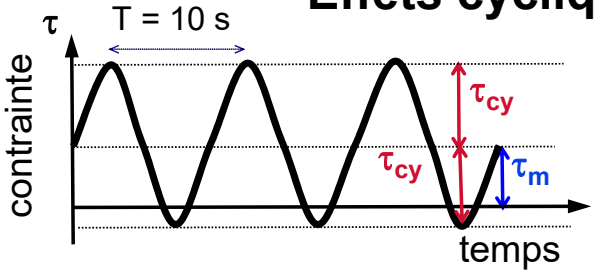
- Khemakhem (2012) - essai C05S1ins
- Proposée par Khemakhem (2012) - Kaolinite Speswhite NC
- Courbe proposée pour l'API - Ip ≤ 30%; OCR ≤ 2
- Courbe proposée pour l'API - Ip ≤ 30%; OCR = 4
- Obtenue par mise à l'échelle d'essai DSS sur kaolinite - OCR<2

- Résultats - Essai C05S1ins
- Rétro analyse (Zhang et al. (2019)

- Rétro analyse, 51 kN
- Rétro analyse, 200 kN
- Rétro analyse, 305 kN
- Mesuré, 51 kN
- Mesuré, 200 kN
- Mesuré, 305 kN

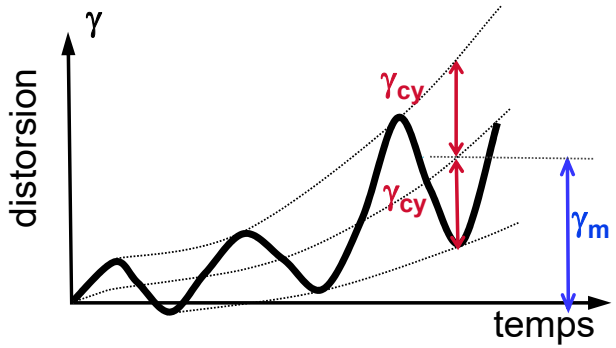
Comportement des argiles sous charges cycliques

Effets cycliques: s_u ↑ si $\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ ↑ et s_u ↓ si le nombre de cycles N ↑



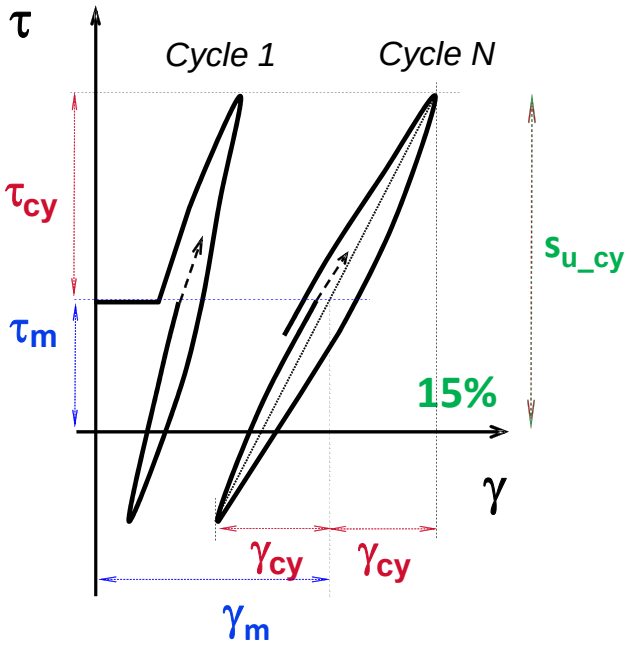
τ_m: contrainte moyenne

τ_{cy}: contrainte cyclique



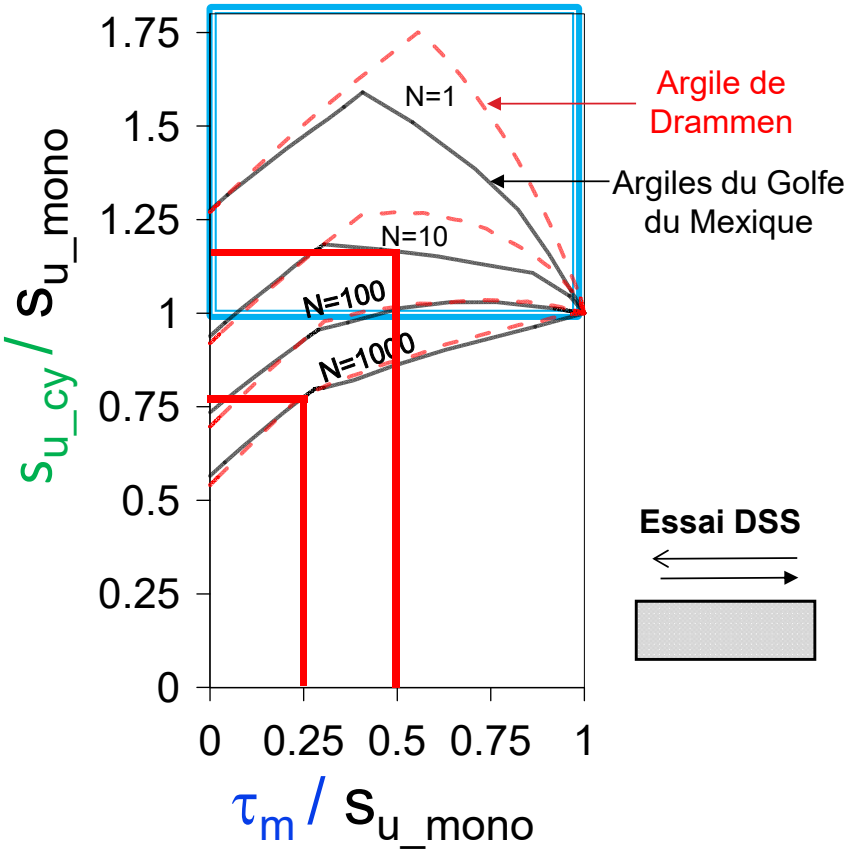
γ_m : distorsion moyenne

γ_{cy} : distorsion cyclique



s_{u_cy} : résistance au cisaillement cyclique

s_{u_mono}: résistance au cisaillement monotone

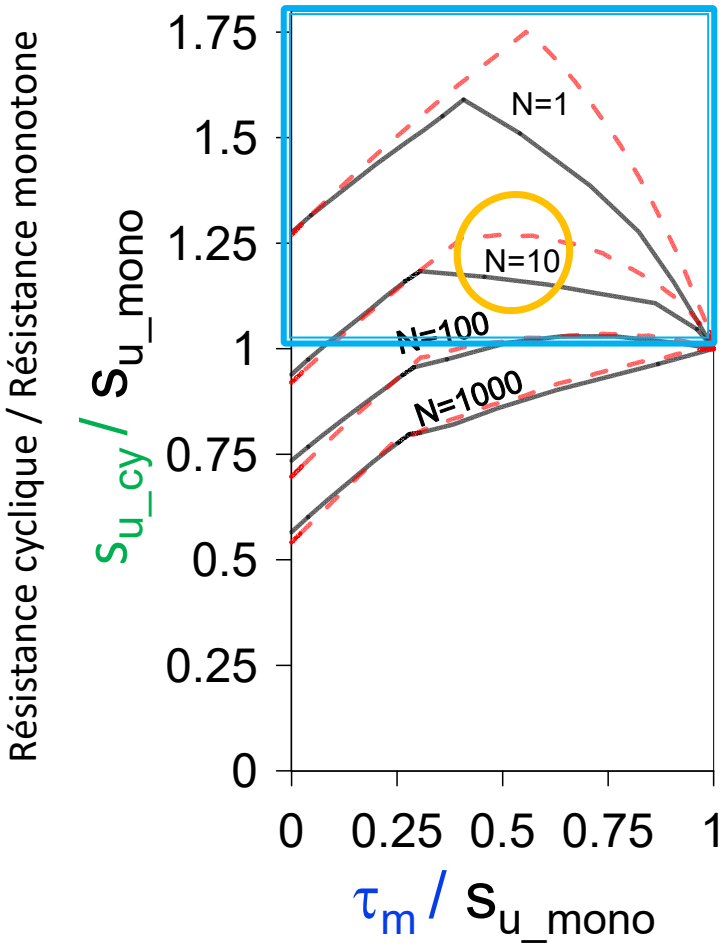


Illustrations d'après Andersen (2015)

Sollicitations cycliques dues aux ouragans

Mesure de s_{u_mono} avec un essai DSS monotone:
Echantillon amené à la rupture en 1 à 3 heures.

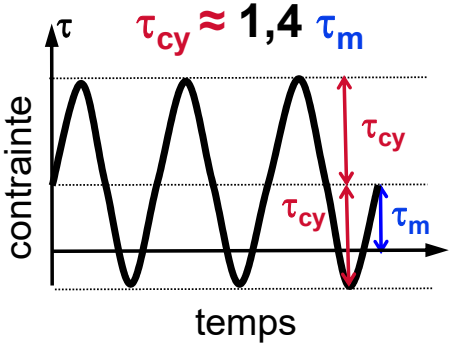
Mesure s_{u_cy} avec un essai DSS cyclique:
Echantillon cisaillé avec une période de charge de 10 s (Rupture en ≈ 2 minutes pour N = 10).



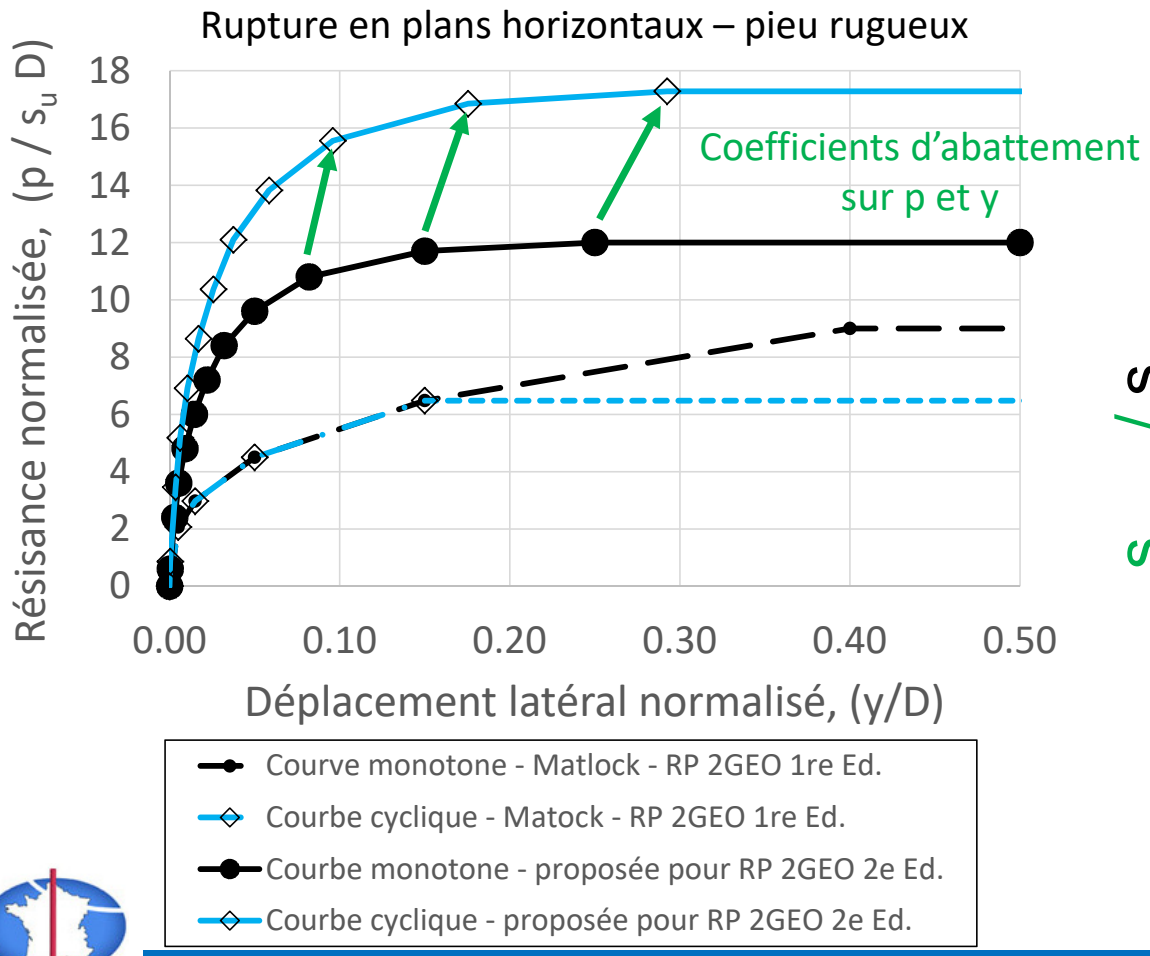
Pour un jacket typique offshore.

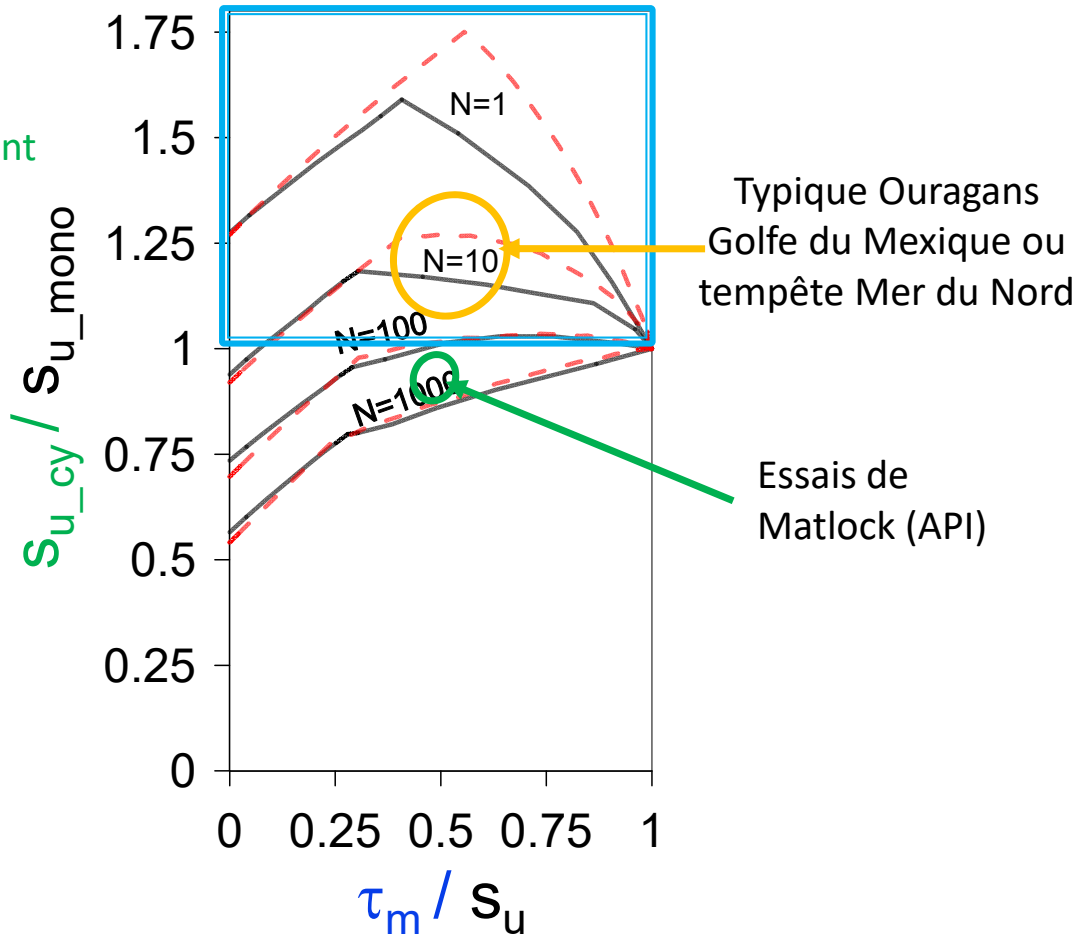
En tête de pieu

$N_{eq} < 25$



Exemple de courbes p-y cycliques présentes et futures (?)





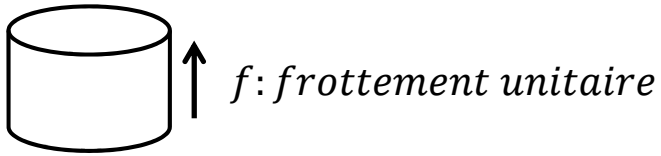
Validation des courbes p-y cycliques par rétro-analyses

Essai	Type d'essai	Consistance de l'argile
Sabine River (1961)	1-g à petite échelle	Très molle à molle
Haga (1983)	1-g à petite échelle	Molle à ferme
Khemakhem (2012) SOLCYP	Centrifugeuse	Très molle
Zakeri et al. (2016)	Centrifugeuse	Très molle

- Chaque essai comprend des rétro-analyses à plusieurs niveaux de charges cycliques

Pieux sous charges axiales dans les sables siliceux

- Méthode API, depuis 1969:



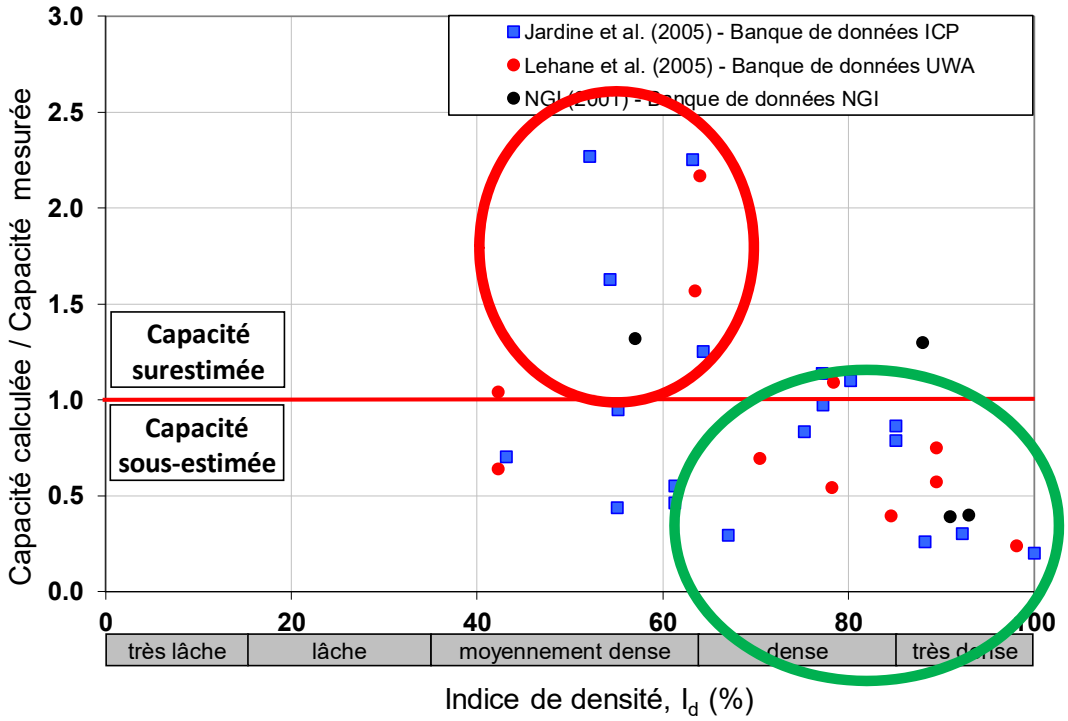
$$f = K \tan\delta \ \sigma'_v \leq f_{lim}$$

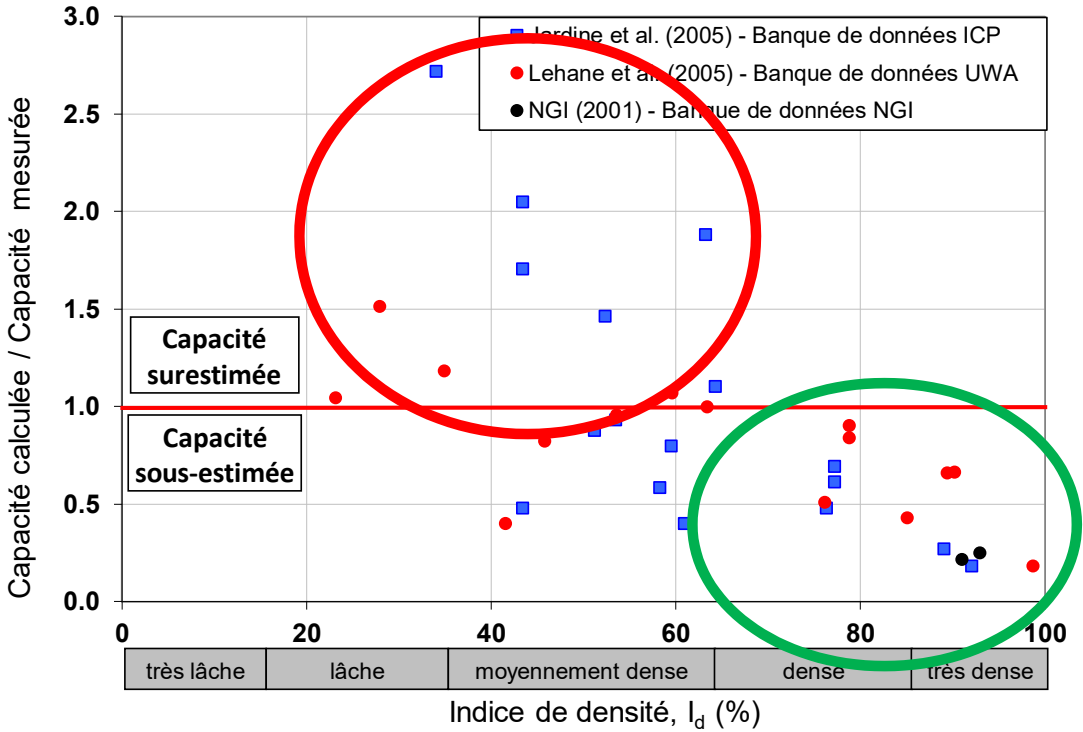
  - K : coef. de pression des terres à la rupture,
  - δ : angle de frottement à l'interface sol-pieu à la rupture,
  - σ'_v : contrainte verticale effective,
  - f_{lim} : frottement unitaire limite.

- Addition de méthodes basées sur l'essai CPT en 2007

Biais de la méthode API – Pieux tubulaires ouverts

- Capacité sous-estimée: sables denses / très denses
- Capacité potentiellement surestimée: sables lâches / moyennement denses





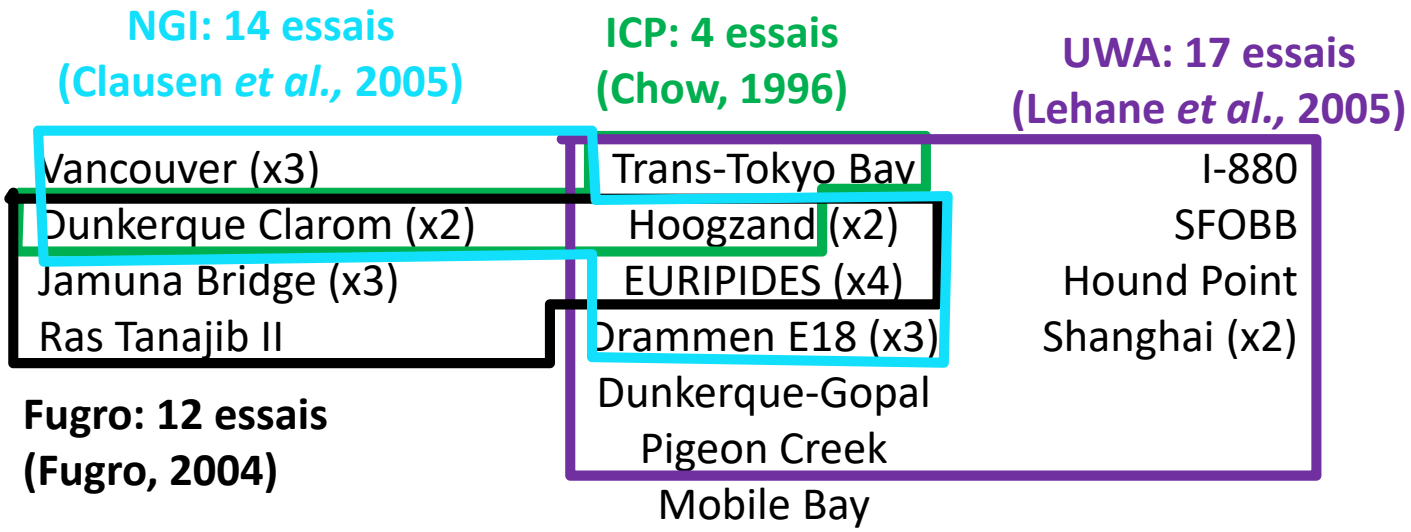
- Pieux en traction
- Pieux en compression

Développement des méthodes CPT

- 4 Méthodes CPT développées par:
  - Fugro;
  - Imperial College (ICP);
  - Institut Norvégien de Géotechnique (NGI);
  - University of Western Australia (UWA)

<u>Banque de données de l'industrie</u>:

Essais sur pieux ouverts, tubulaires, en acier, avec CPT, et chargés en compression



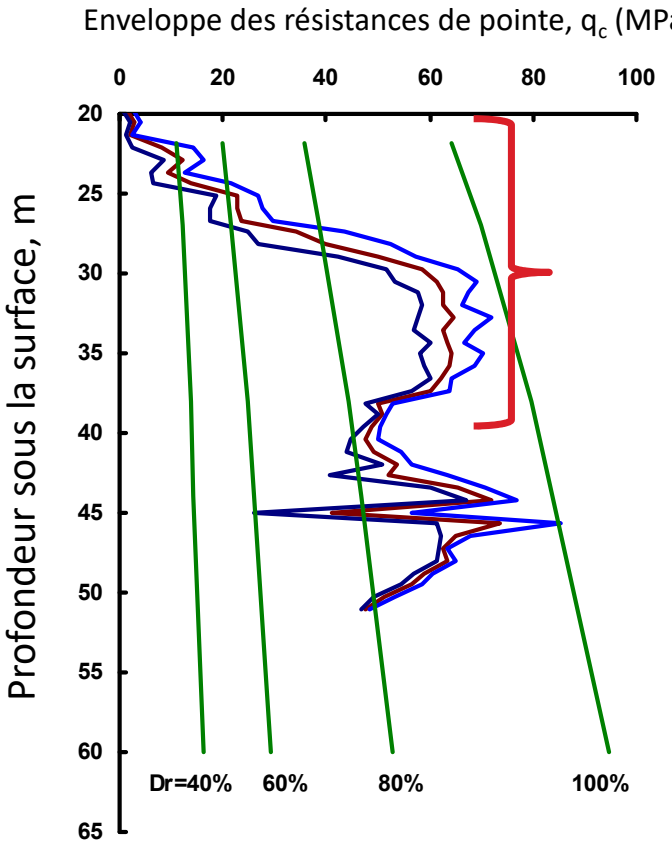
Projet EURIPIDES: Essais en milieu très dense

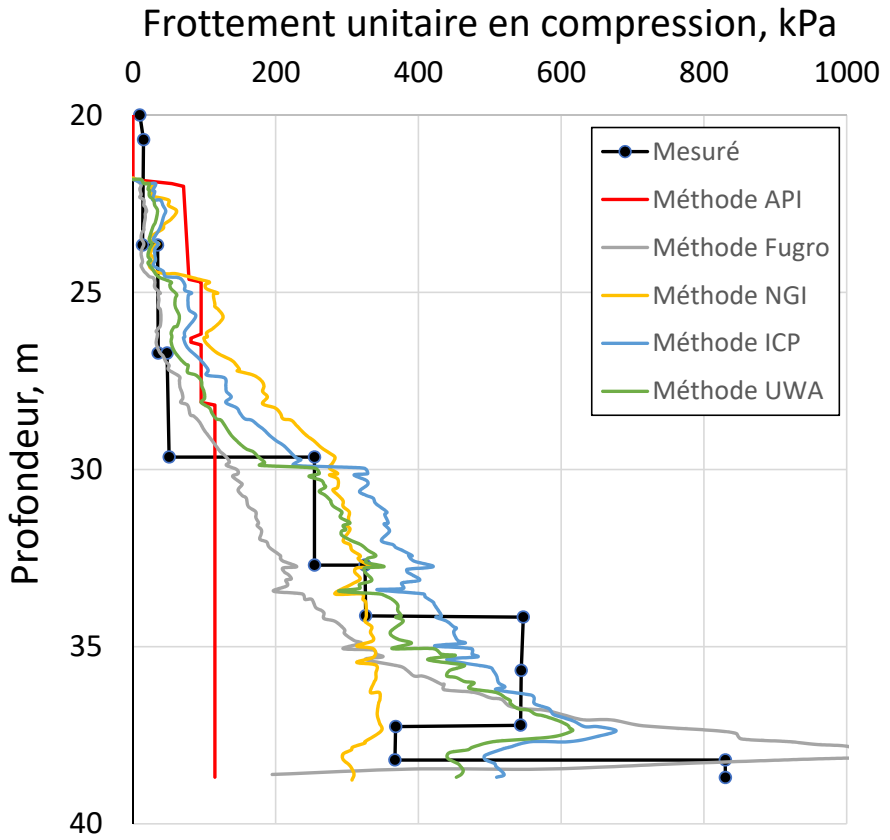
EURIPIDES: EUROpean Initiative on PIles in DEnse Sands

Fugro / Geodia

1992-1996

Example de résultats - Essais au site I; D = 0,763 m – fiche de 38,7 m

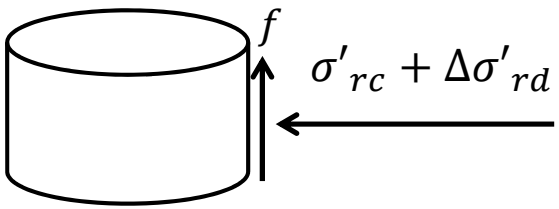




CFMS

Calcul avec les méthodes CPT pour pieu ouvert

- Frottement unitaire, f:



$$f = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$$

Angle de frottement sol-pieu à volume constant:
Valeur par défaut ou mesurée

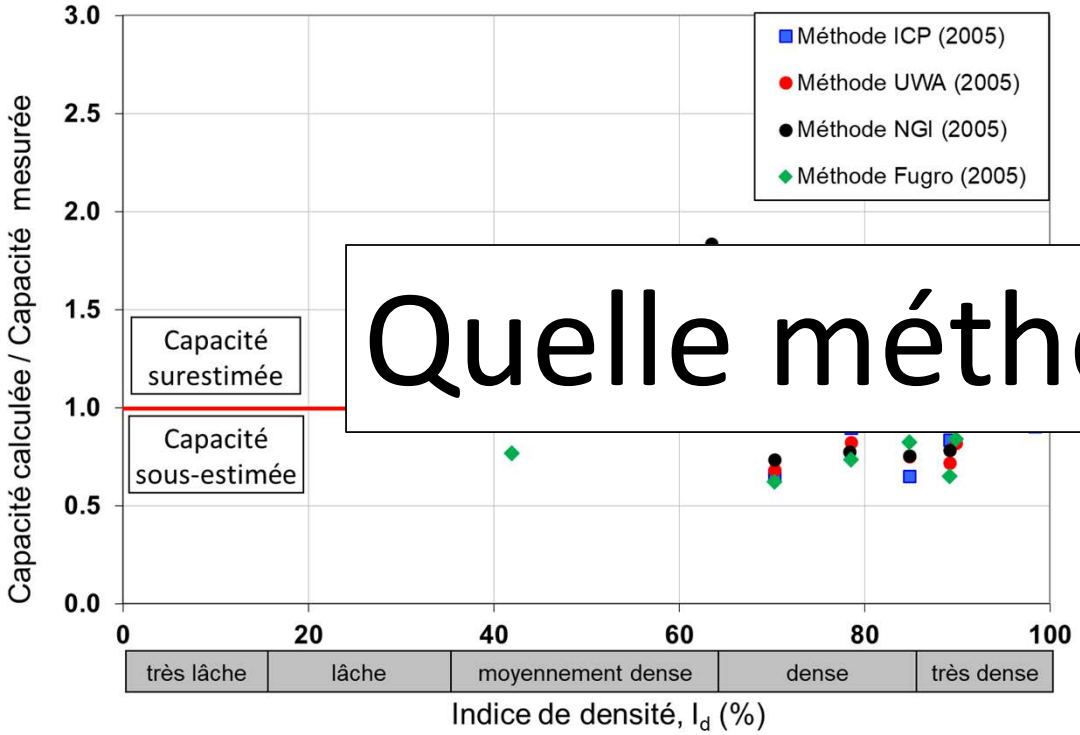
Variation de la contrainte radiale effective durant le chargement due à la dilatation du sable

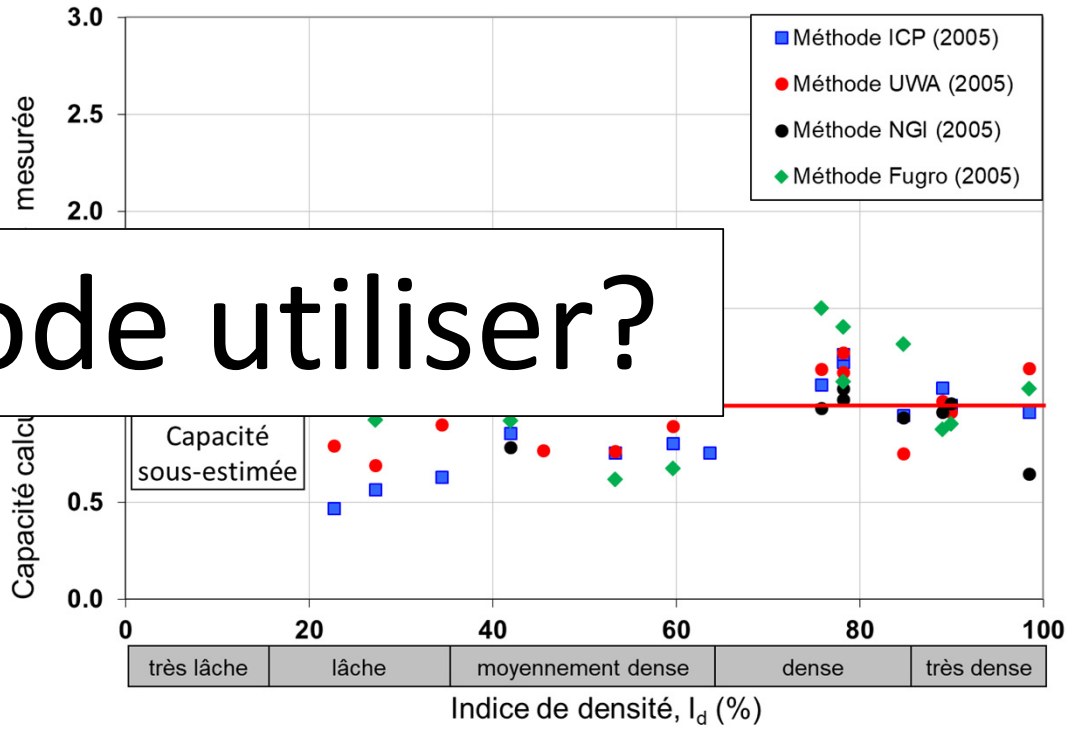
Contrainte radiale effective après installation et équilibre:
Fonction de q_c, σ'_v, et profondeur de battage

- Résistance de base: fonction de q_c, et de la condition du bouchon durant le battage (pieu carottant, partiellement ou totalement bouché)

Biais des méthodes CPT - pieux tubulaires ouverts

- Disparition du biais vis-à-vis de l'indice de densité du sable





Quelle méthode utiliser?

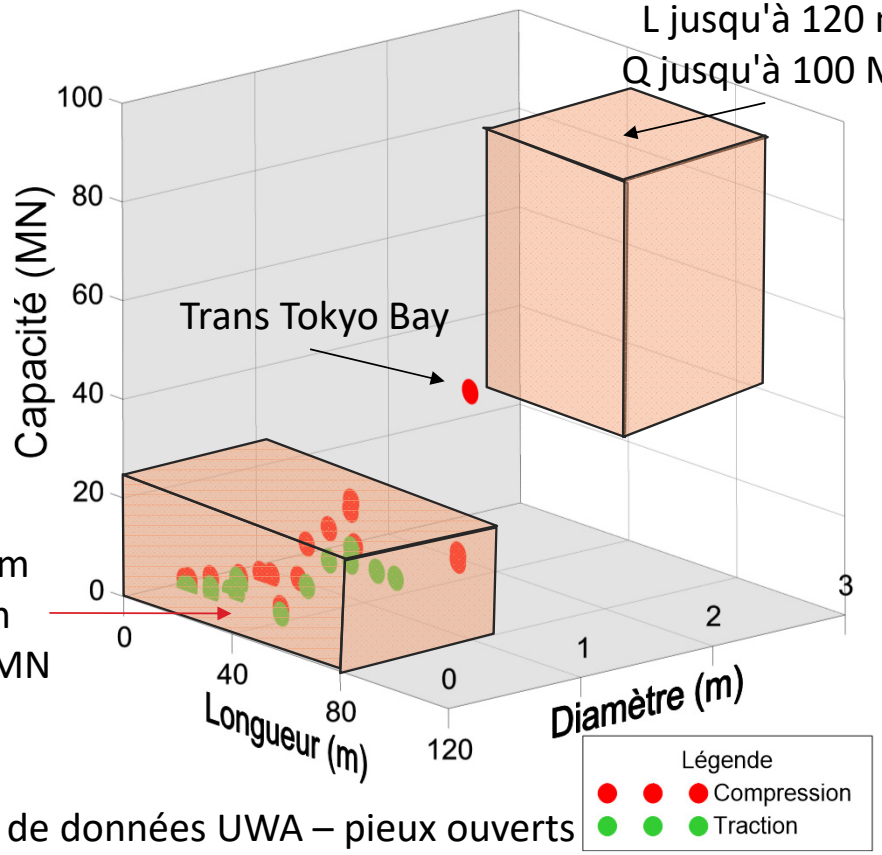
- Pieux en traction — banque de données UWA — Pieux en compression

Extrapolation hors des banques de données

Questions clés:

- Influence du diamètre sur la dilatation;
- Influence du diamètre et du bouchonnement des pieux ouverts sur le frottement latéral et la résistance de base;
- Méthode de pondération de la résistance de pointe du CPT, q_c

Zone de calcul pour jackets typiques:
D jusqu'à 2,5 m
L jusqu'à 120 m
Q jusqu'à 100 MN



banque de données UWA – pieux ouverts

Texte dans les normes API et ISO

- Pas de consensus dans l'industrie sur la "meilleure" méthode à utiliser;
- Les 4 méthodes CPT, adoptées en 2007 dans l'API et l'ISO, sont présentées :
  - Comme préférables à la méthode « K tan δ »,
  - Sur un pied d'égalité, sans préférence.

- En pratique, on utilise :
  - Une méthode préférée,
  - La moyenne de 2, 3, ou 4 méthodes,
  - La méthode qui donne la capacité la plus basse,
  - Etc…

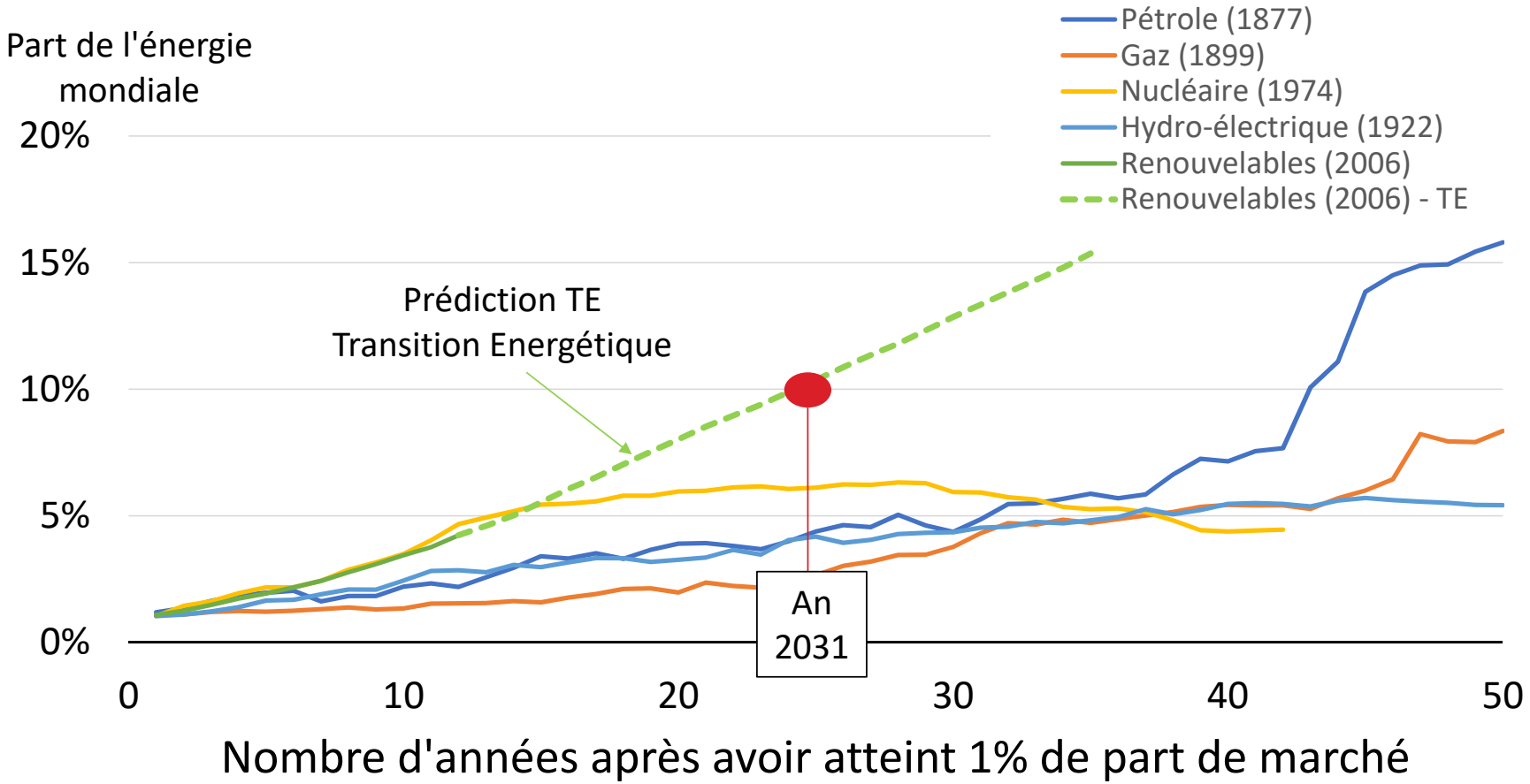
Résumé des défis associés au dimensionnement des pieux

- Extrapolation des méthodes empiriques de dimensionnement :
  - Sensibilisation aux limites des banques de données qui ont servi à leur calibrage,
  - Compréhension des phénomènes physiques pour avoir confiance dans l'extrapolation des méthodes aux conditions offshore.

- Méthodes CPT pour les pieux dans les sables :
  - Sensibilisation aux limites de la méthode « K tan δ » ,
  - Harmonisation des banques de données d'essais sur pieux,
  - Harmonisation des méthodes.

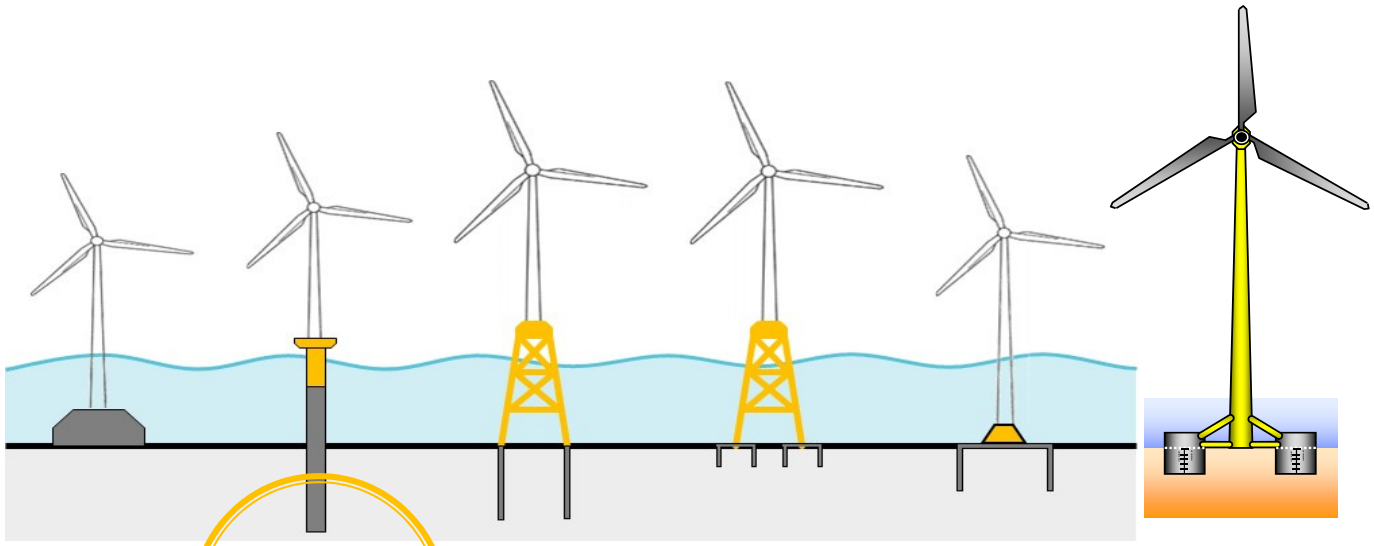
- Amélioration des prédictions des mécanismes de rupture des jackets:
  - Comportement du composant (pieu) contre comportement du système (jacket)

La transition énergétique – les énergies renouvelables



Les ressources éoliennes offshore

L'éolien fixe – profondeurs d'eau < 60 m



Gravitaire | Monopieu (80%) | Jacket Multi-pieux | Jacket sur ancres à succion | Mono-caisson | Tripode sur ancres à succion

Types de fondations pour l'éolien fixe (Page *et al.*, 2019, et Per Sparrevik)

Projet Alpha Ventus - Borkum West:
jackets multi-pieux et monopieux
1er projet éolien offshore en Allemagne
Crédit photo: Gary Norton

Projet Dudgeon – 2017

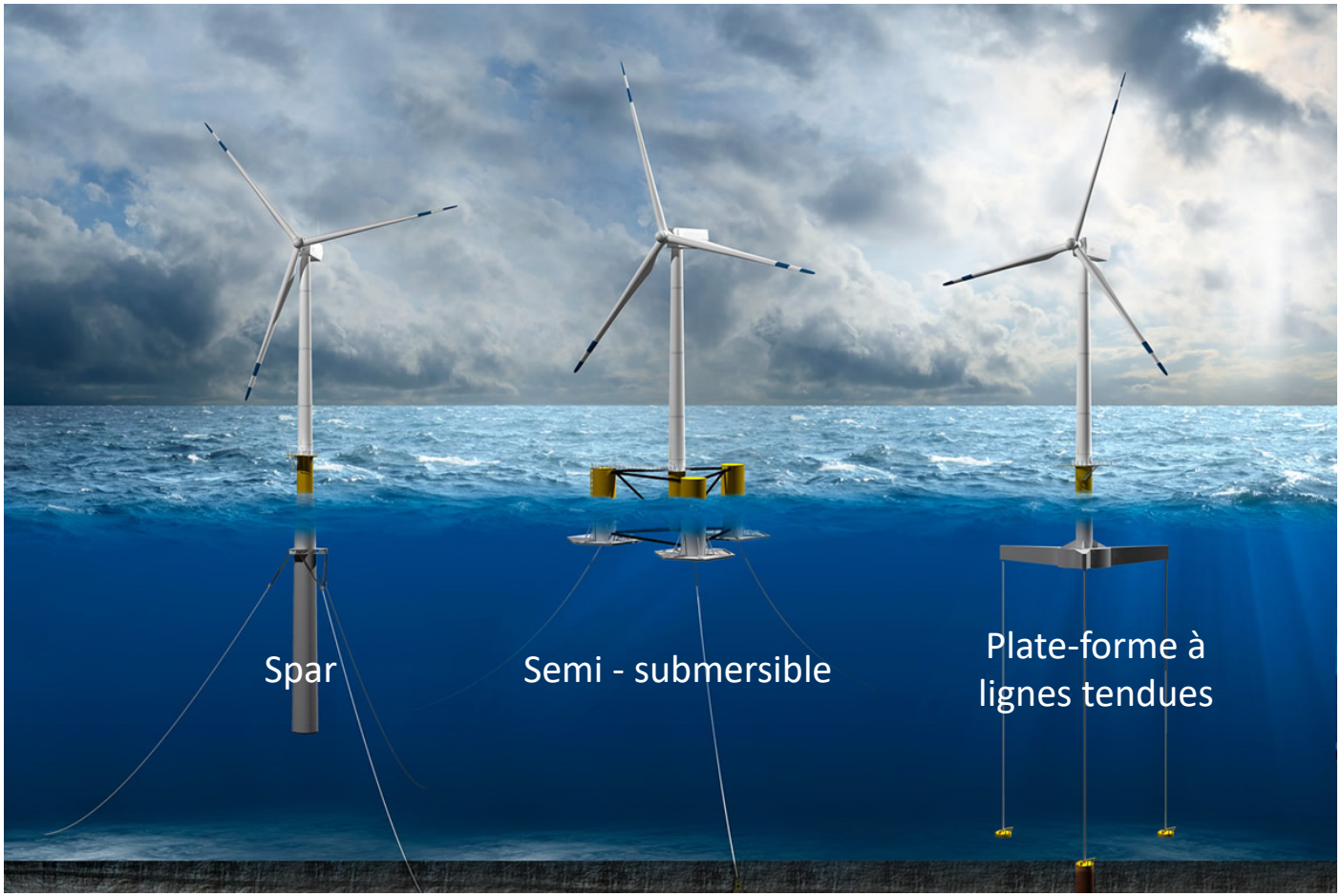
- 32 km des côtes de Great Yarmouth, R.U. - profondeur d'eau: 18 - 25 m
- 67 turbines sur monopieu - 1 station relai offshore (jacket sur ancres à succion)

(Crédit Photos: Jan Arne Wold - Woldcam / Equinor ASA)

Installation d'un jacket avec ancres à succion

Crédit vidéo: Framo et Institut Norvégien de Géotechnique (NGI)

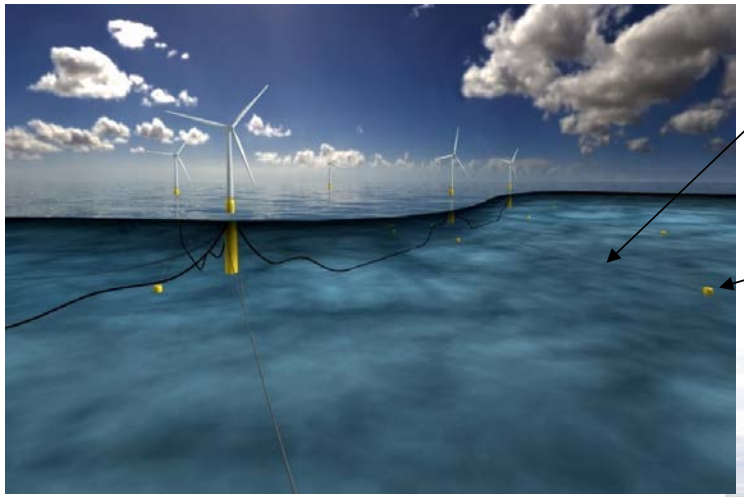
L’éolien flottant – profondeurs d’eau > 60 m



Crédit illustration: DNVGL

1er projet éolien flottant: Hywind – 2009

- spar: hauteur totale: 254m; tirant d'eau: 75 m.

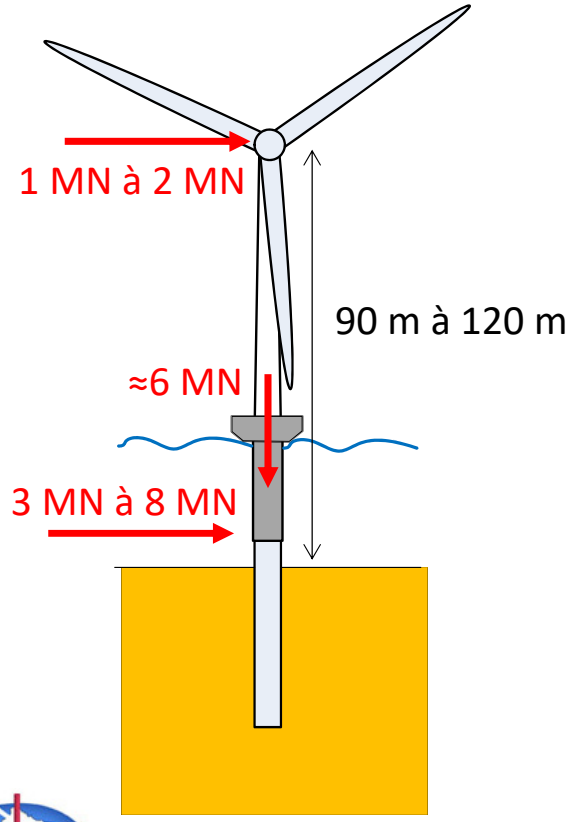


Crédit - Illustration - Equinor

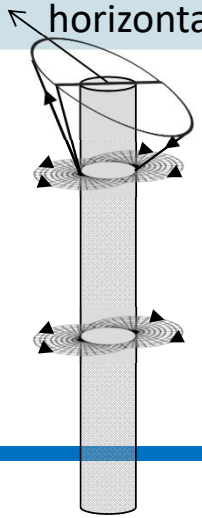
Crédit photo: Olaf Nagelhus_Woldcam - Equinor

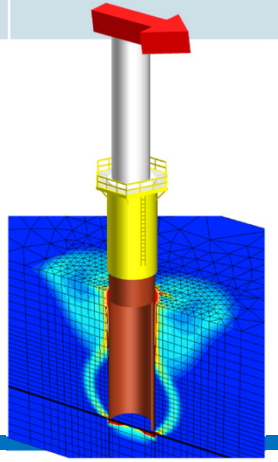
Crédit photo: Institut Norvégien de Géotechnique (NGI)

Charges typiques: secteur pétrolier contre éolien



Secteur	Pétrolier	Eolien
Diamètre (m)	< 2,5	3 à 8
Elancement	L/D > 30	L/D <10
Charge axiale critique	Compression	Traction
Comportement sous charge latérale	Flexible	Rigide
Mécanisme de rupture latérale	Coin et plan horizontal	Coin et boule





Crédit illustration: NGI

Projet PISA (2013 – 2016)
28 essais sous charges latérales sur 2 sites

- Diamètre, D = 0, 243m - 0,762 m - 2 m
- L/D = 3 - 5,25 - 10

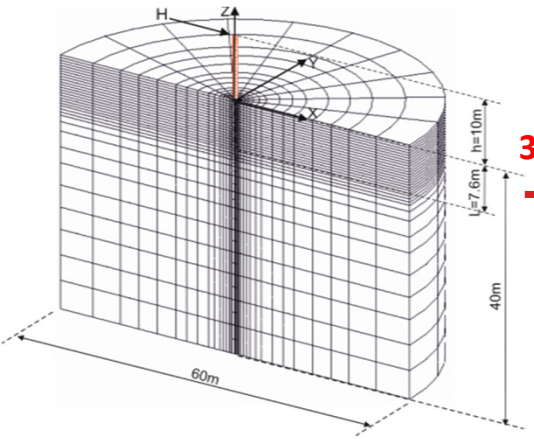
Site de Cowden: moraine raide

Site de Dunkerque:
sable marin moyennement dense à très dense

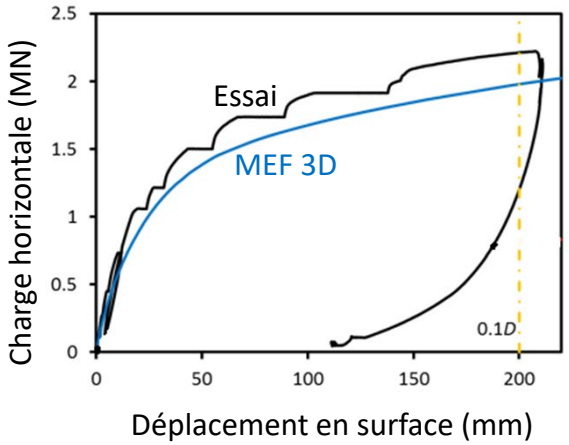
Copyright: Byron Byrne
byron.byrne@eng.ox.ac.uk

Méthode proposée par le projet PISA - charges monotones

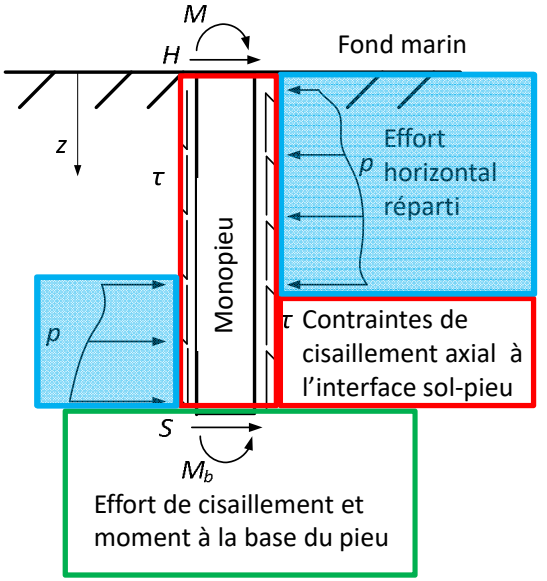
Modélisation 3D par Eléments Finis



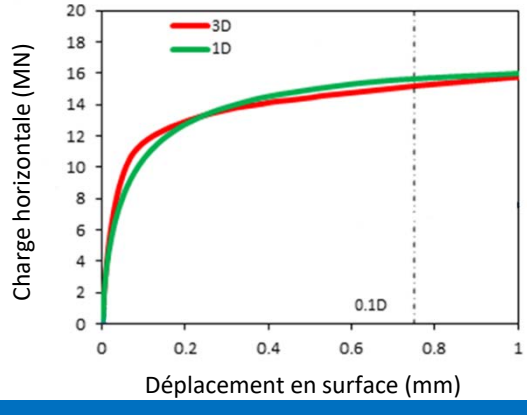
Calage 3D vs Essai



Modèle simplifié 1D

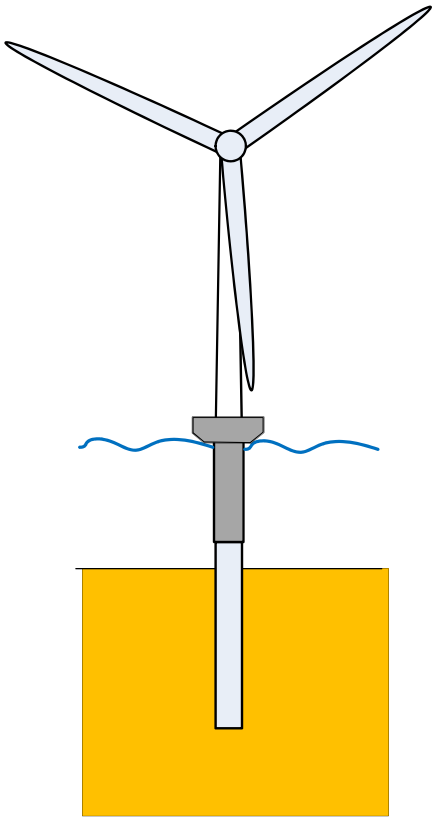


Calage 3D vs 1D

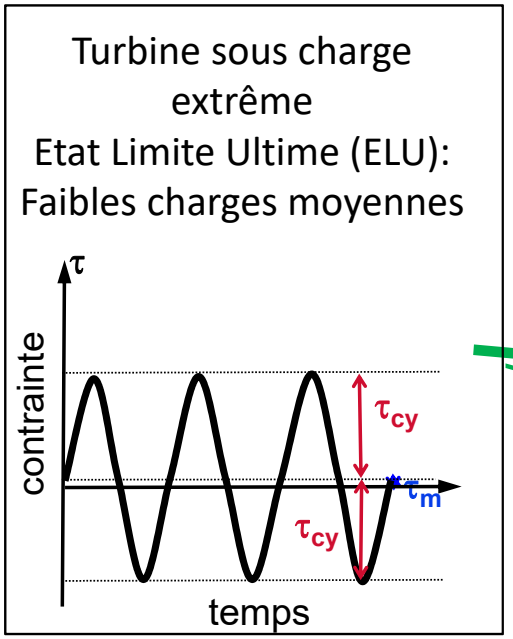


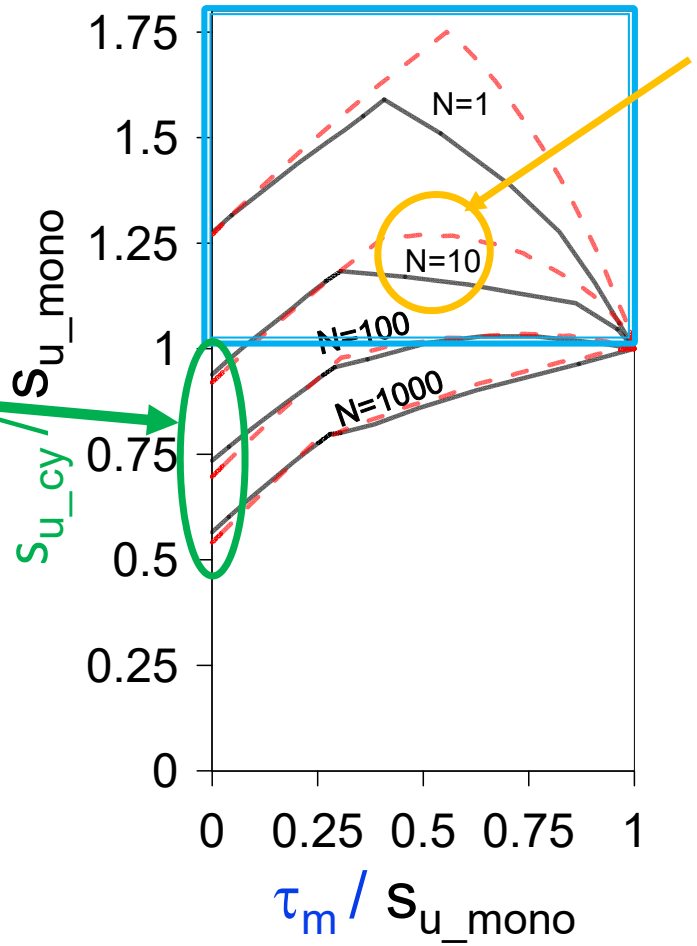
D'après Byrne et al. (2919)

Courbes p-y cycliques: secteur pétrolier contre éolien



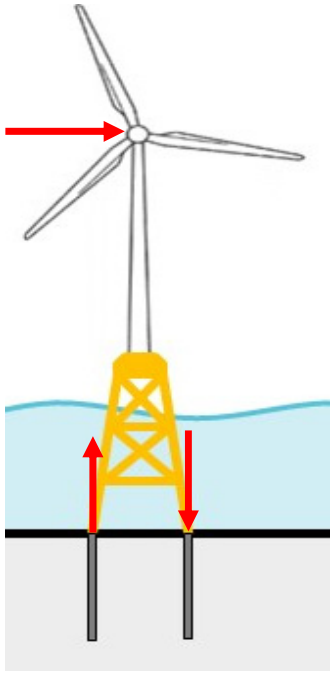
Turbine sous charge extrême
Etat Limite Ultime (ELU):
Faibles charges moyennes

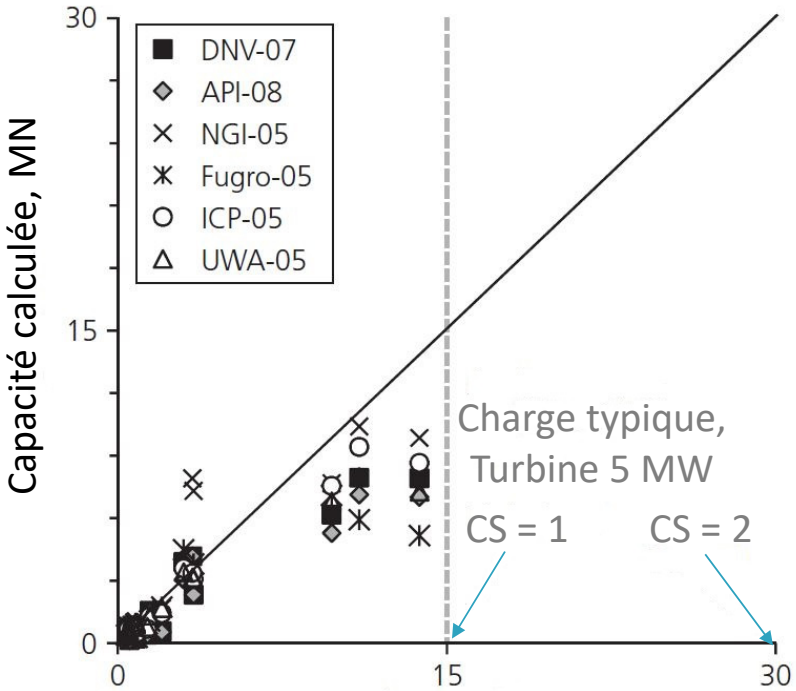




Typique des jackets offshore du secteur pétrolier

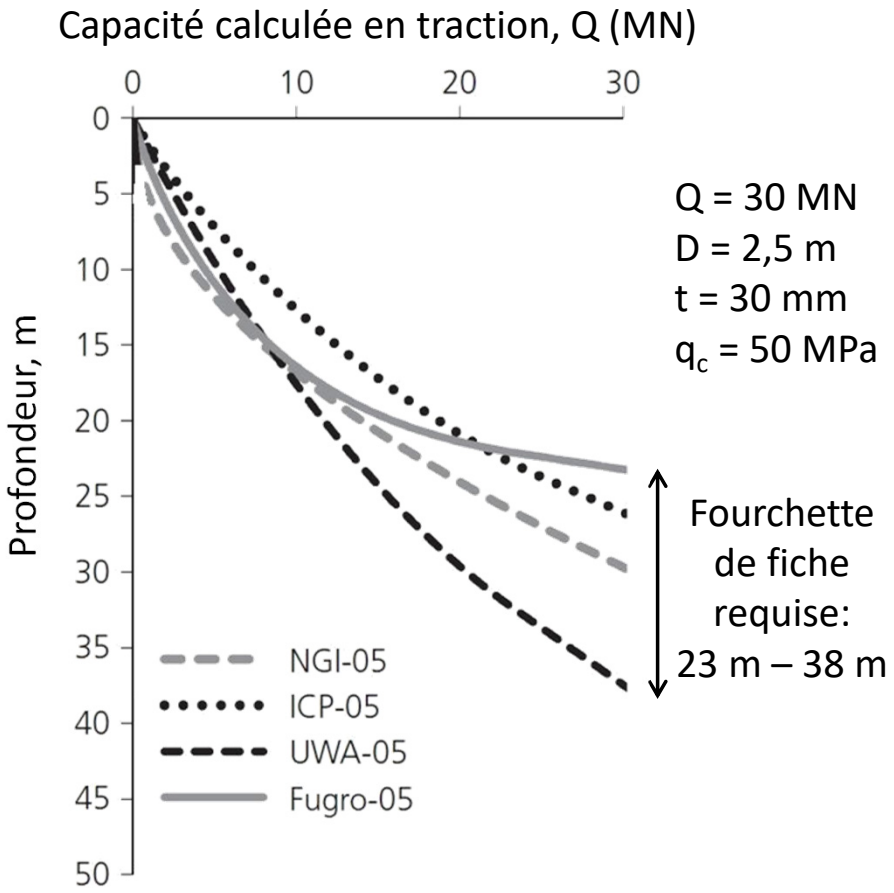
Pieux en traction dans les sables – jacket sur pieux multiples





Pieux tubulaires ouverts

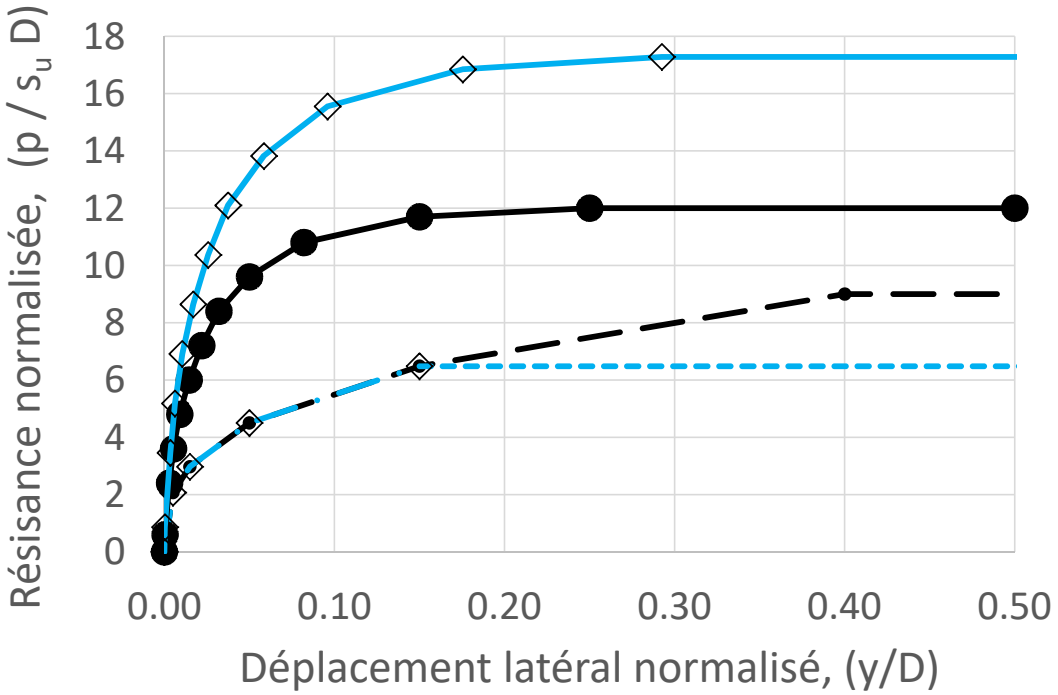
Banque de données de Gavin *et al.* (2011)



D'après Gavin *et al.* (2011)

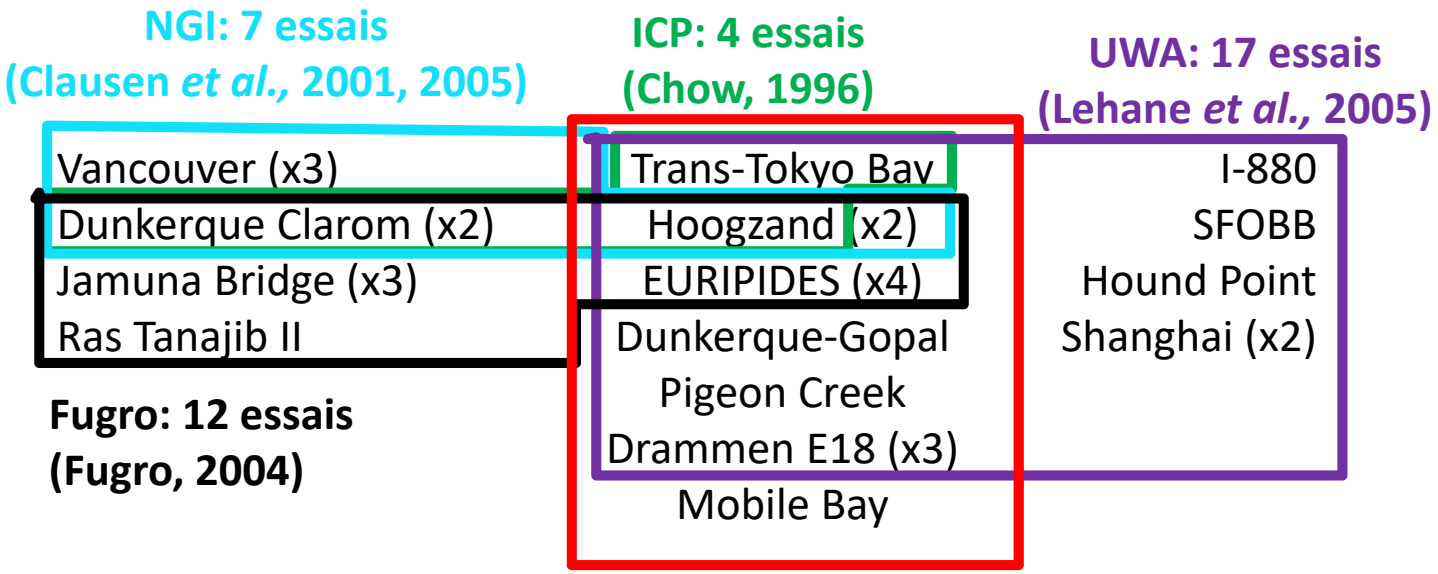
Progrès anticipés: courbes p-y dans les argiles

- Mises à jour dans les codes de l'API RP 2GEO en 2020 et les codes ISO (19901-4) en 2021.



Progrès anticipés: Méthode CPT « unifiée » en 2020

- Programme de recherche en cours: NGI, UWA, ICP, Fugro
- But: développement d'une méthode CPT pour les pieux dans les sables qui soit « non-affiliée »
- 1ere étape: unification des banques de données
- Pieux ouverts tubulaires en acier avec CPT – Charge axiale en Compression



Sondage offshore: hier et aujourd'hui

Crédit photo: Famille McClelland

Crédit illustration: Benthic

Remerciements

- Comité Français de Mécanique des Sols,
- BP America Inc.,
- Nombreux collègues chez BP et dans l'industrie,
- Parents et famille.

Une dernière pensée

"(…) les plus grandes avancées en géotechnique sont venues (…) du besoin d'entreprendre des projets dans des environnements entièrement nouveaux tels que l'arctique, les océans, et l'espace où il n'y a pas ou peu d'expérience et où les risques sont élevés (…)"

Prof. James K. Mitchell (2009)
Conférence H. Bolton Seed

Crédit photo: Jan Arne Wold _ Woldcam - Equinor - Hywind Scotland - 2017

Symposium ISFOG 2020
Austin, Texas
16 – 19 août 2020

www.isfog2020.org