

Recommandations relatives à la conception, au calcul, à l'exécution et au contrôle des fondations des structures photovoltaïques au sol

Justification des fondations par essais

JST DU 03/04/2025

Sommaire

- 1 - Principe général de dimensionnement
- 2 - Données d'entrée
- 3 - Ebauche dimensionnelle
- 4 - Mode opératoire des essais
- 5 - Dimensionnement par essais
- 6 - Exemple

1 - Principe général de dimensionnement

1 - Principe général de dimensionnement des fondations

Un type de fondation :

Une zone
géotechnique
homogène

Un type de
profilé (même
section)

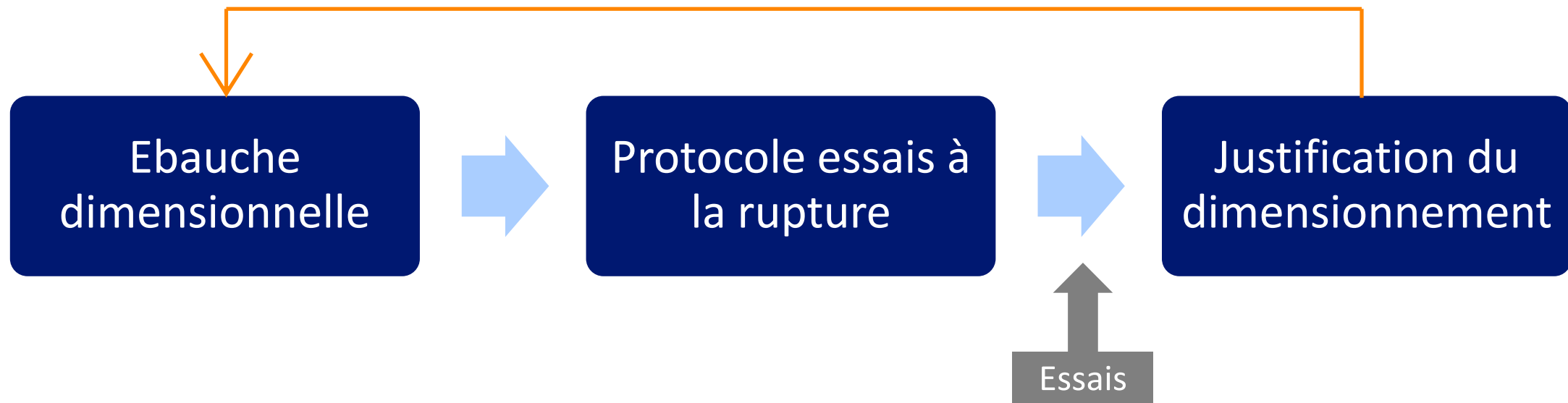
Une longueur
d'ancrage du
profilé dans le
sol

Une
méthodologie
de mise en
œuvre

Un torseur
d'efforts
mobilisables

1 - Principe général de dimensionnement des fondations

Pour chaque type de fondation :



2 – Données d'entrée

2 – Données d'entrée

Données nécessaires à l'ébauche dimensionnelle et au dimensionnement

Études géotechniques de conception :	➤ Risques et aléas géotechniques ➤ Zonage + Modèle(s) géotechnique(s) ➤ Détermination de l'épaisseur dégradée (mini 0,5m)
BE Structure :	➤ Descentes de charge en tête de fondation profonde (appui N/S, ELS, ELU) ➤ Déformations admissibles
NF P 94-262 / Recommandations :	➤ Coefficients partiels à appliquer
MOA / BE Structure / normes :	➤ Protection des fondations contre la corrosion
Adaptation de la protection :	➤ Abrasivité des profilés galvanisés
Analyse spécifique pendant la conception :	➤ Agressivité des sols et des eaux vis-à-vis du béton

2 – Données d'entrée

Données nécessaires à l'ébauche dimensionnelle et au dimensionnement

Profilé :

- Géométrie en plan du profilé : largeur / périmètre / section / produit d'inertie
- Caractéristiques du matériau utilisé

Modèle
géotechnique :

- Pression limite P_l
- Pression fluage P_f
- Module pressiométrique Ménard EM et/ou Résistance en pointe q_c
- Coefficient rhéologique α

3 - Ebauche dimensionnelle

3 - Ebauche dimensionnelle

Ebauche dimensionnelle (GEO) sur la base des investigations géotechniques

**RECOMMANDATIONS : ancrage de 1m
au minimum sous l'épaisseur de sol
dégradé**

Sous effort
horizontal et
moment

- Epaisseur dégradée = réaction frontale réduite
- Vérification de la déformation du terrain vis-à-vis des critères fixés par le maître d'ouvrage
- Détermination des sollicitations ELU de flexion/effort tranchant + vérification des contraintes STR
- Principes de vérifications décrits dans la NF P 94-262
- Vérifier l'absence de plastification sous les sols dégradés, à l'ELS
- Anticiper les déplacements (comparaison au seuil d'acceptabilité donné par le maître d'ouvrage / son BET)

Sous effort vertical

- Calculs menés selon l'approche « *modèle de terrain* » de la NF P 94-262
- Epaisseur dégradée = frottement neutralisé
- Type de pieu : le plus proche de la méthodologie envisagée
- Possibilité d'utiliser les méthodes basées sur les essais pressiométriques Ménard ou pénétromètres statiques

3 - Ebauche dimensionnelle

Justification dimensionnelle (STR)

- Justification en référence à l'Eurocode du matériau constitutif de la fondation
- Protection contre la corrosion du profilé métallique par épaisseur sacrificielle (NF EN 1993-5 §4.4 tableaux 4.1)
- Protection du profilé par galvanisation (NF EN ISO 1461)
- Précautions transport/manutention/mise en place
 - Attention à l'abrasivité du sol

3 - Ebauche dimensionnelle

Résultats de l'ébauche dimensionnelle

- Au moins un type de fondation répondant aux attentes pour chaque zone géotechnique



Choix des types de pieux à tester

- Différentes profondeurs?
- Différents profilés?
- Différents diamètres?



Rédaction du protocole d'essais à la rupture

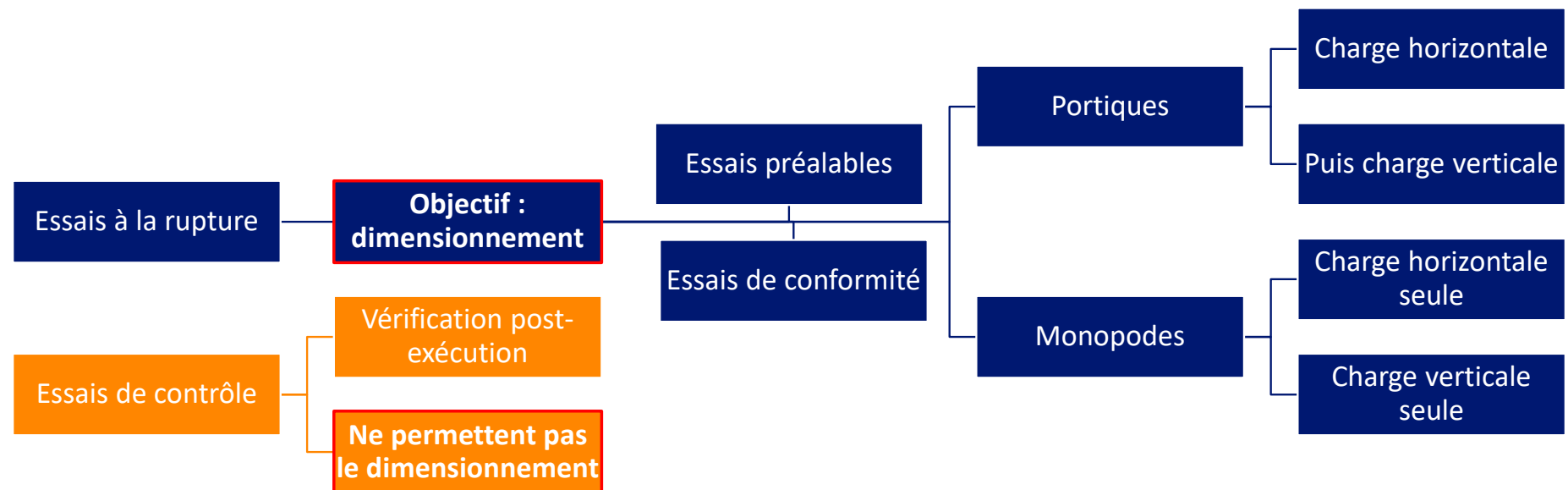
- Présentation des types de pieux à tester
- Valeurs des paliers de chargement H et V
- Durée des essais
- Méthodologie de réalisation de l'essai



Réalisation des essais à la rupture

4 - Mode opératoire des essais

4 - Mode opératoire des essais



4 - Mode opératoire des essais

Matériel d'essai

- Massif de réaction
- Système de mesure de l'effort appliqué
- Système de chargement de la fondation
- Système de mesure

Points de vigilance :

- Sécurité (engins, mise en tension du dispositif),
- Stabilité et masse du massif,
- Eviter les interférences (massif de réaction hors zone de cône d'arrachement).



4 - Mode opératoire des essais

Matériel d'essai

➡ Système de chargement : généralement peson taré + palan + élingues + matériel de liaison.

1

2

3

4

Points de vigilance :

- Appliquer des paliers d'efforts et les maintenir stables,
- Effort strictement vertical/horizontal,
- Atteindre l'arrachement des pieux (ou minimum 200% ELU).



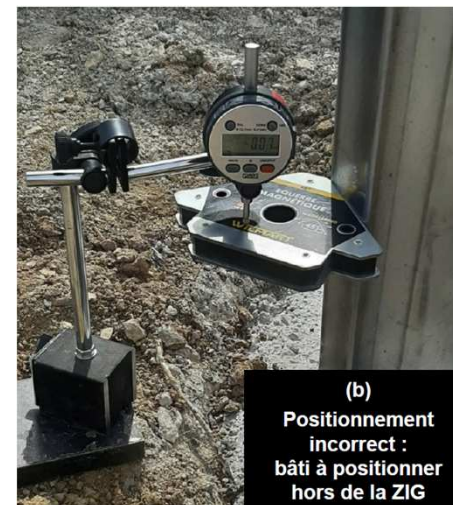
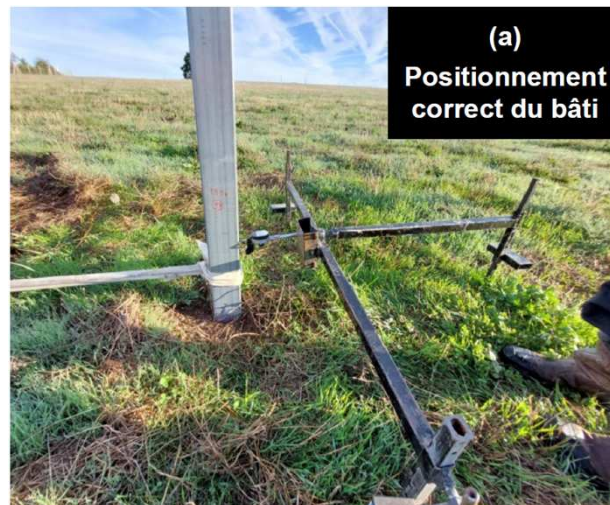
4 - Mode opératoire des essais

Matériel d'essai

➡ Système de mesure : déplacement du profilé dans la direction exacte de l'effort + valeur de l'effort

Comparateur micrométrique + dispositif de maintien

peson taré



4 - Mode opératoire des essais

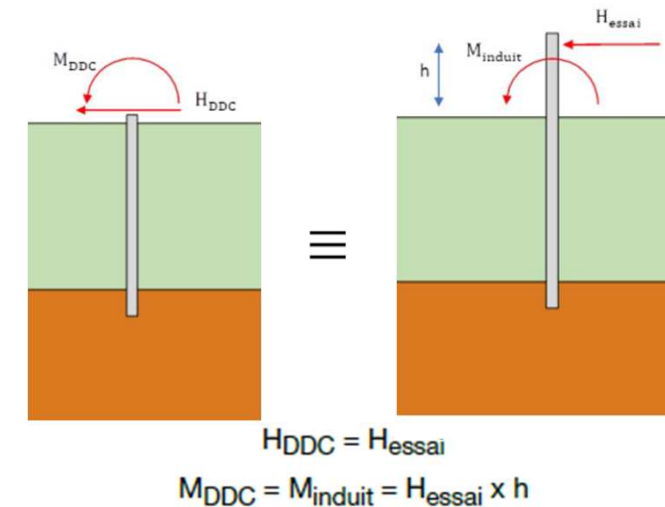
Essais à la rupture

- Epaisseur de sol dégradé : à matérialiser in situ par remaniement avant l'essai
- Enveloppe du torseur ELU : charges verticales + charges horizontales + moment si possible
- Même fondation (profilé, section, longueur) que pendant le chantier
- Mise en place des fondations : même procédure que pendant le chantier

Suivi d'exécution des pieux d'essai

Rapport d'exécution :

- Enregistrement des paramètres d'exécution
- Informations pratiques
- ...

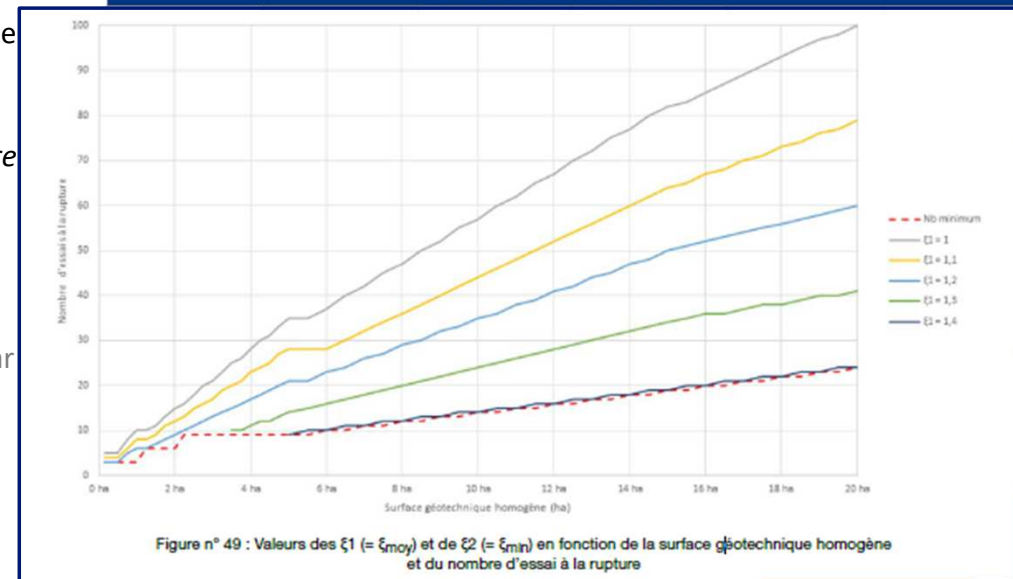


4 - Mode opératoire des essais

Essais à la rupture – *Nombre d'essais*

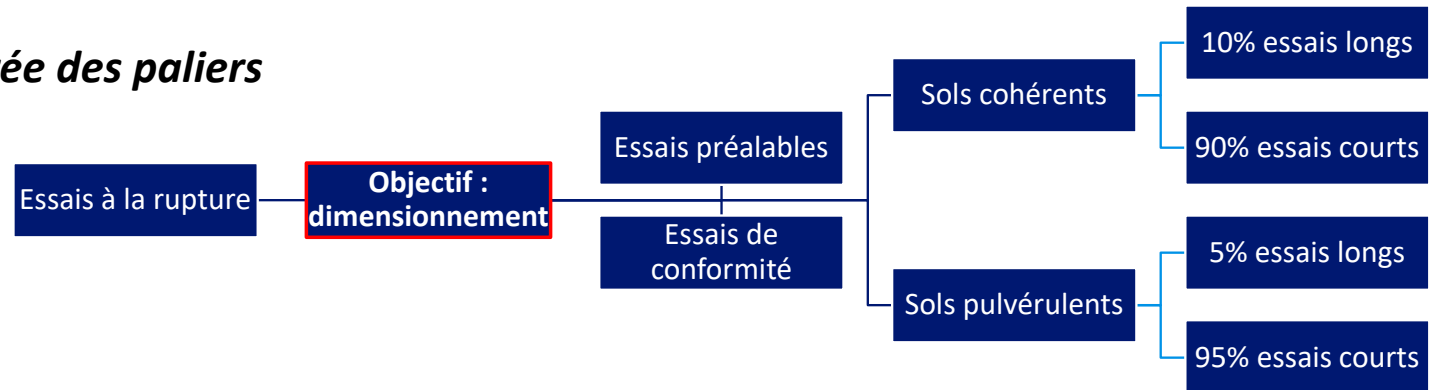
- Un essai = 1 type de fondation + 1 zone géotechnique homogène
- 1 type de fondation = 1 section (profilé) + 1 longueur de pénétration + 1 technique de mise en œuvre
- Tableau : Détermination de la valeur de ξ en fonction du nombre d'essais
 - Prise en compte essais préalables possible
 - Préforage -> plus (+) d'essais : entre +20 à +50%
 - Mesures particulières pour les zones hétérogènes par nature

Surface géotechnique homogène ≤ 2500m²					
Densité des essais			1/833m²	1/625m²	1/500m²
$\xi_1 = \xi_{moy}$			1,2	1,1	1
$\xi_2 = \xi_{min}$			1,05	1	1
Surface géotechnique homogène ≤ 1Ha					
Densité des essais			1 essai + 1 essai pour 1666m²	1 essai + 1 essai pour 1250m²	1 essai + 1 essai pour 1000m²
$\xi_1 = \xi_{moy}$			1,2	1,1	1
$\xi_2 = \xi_{min}$			1,05	1	1
Surface géotechnique homogène ≤ 3,5Ha					
Densité des essais			1 essai + 1 essai pour 2500m²	1 essai + 1 essai pour 1875m²	1 essai + 1 essai pour 1500m²
$\xi_1 = \xi_{moy}$			1,2	1,1	1
$\xi_2 = \xi_{min}$			1,05	1	1
Surface géotechnique homogène ≤ 5Ha					



4 - Mode opératoire des essais

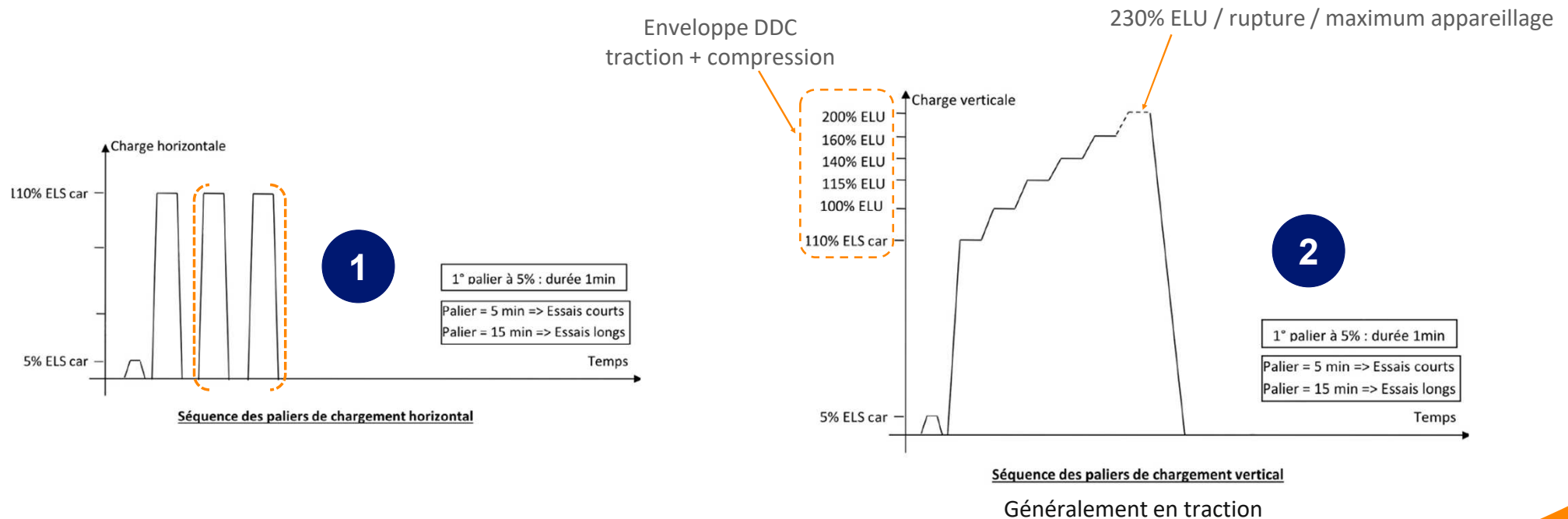
Essais à la rupture – *Durée des paliers*



- Essais longs = essais de référence → réalisés au début. Au moins 1 / zone géotechnique homogène
- Si comportement différent entre essais courts et essais longs → essais longs
- Palier sous charge **horizontale** : **5** minutes
- Palier sous charge **verticale** – essais **longs** : **15** minutes
- Palier sous charge **verticale** – essais **courts** : **5** minutes
- Décharge ≥ 15 secondes
- Mesure déformation : **chaque minute** jusqu'à 5 minutes, puis **toutes les 5 minutes + après la décharge**

4 - Mode opératoire des essais

Essais à la rupture – *Protocole d'essai (structure type « portique »)*



4 - Mode opératoire des essais

Essais à la rupture – *interprétation*

➤ Résistance utilisée dans le dimensionnement : R_{mes}

➤ $R_{mes} = \min (\text{charge au seuil de déplacement admissible ; valeur d'arrachement total de la fondation})$

Défini par le maître d'ouvrage / son BET

Déplacement théorique $\approx B/10$

4 - Mode opératoire des essais

Essais de contrôle

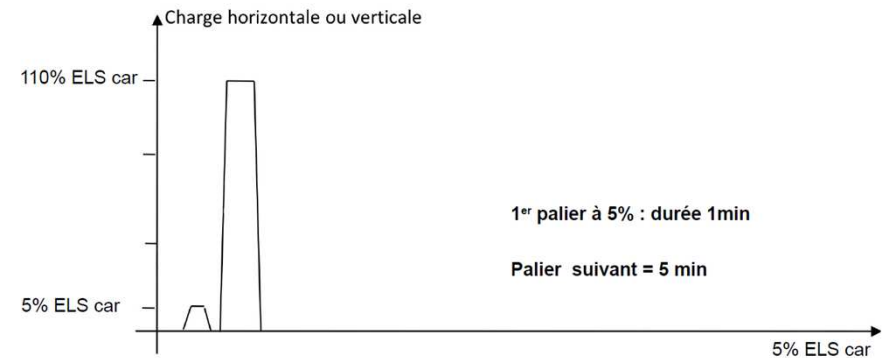
- **N'ont pas pour objectif de valider ou confirmer un dimensionnement.**
- Menés sur des fondations définitives, en H et V
- Avant montage de la structure
- Au moins 1% des fondations exécutées sont testées, minimum 1 essai par hectare

- Nombre d'essais augmenté :

- ☐ Si contexte géotechnique hétérogène
- ☐ À la demande du géotechnicien / du MOA
- ☐ En l'absence d'enregistrement (de forage / de battage)
- ☐ En cas de suspicion d'anomalie

- Un palier = 5 minutes / remise à zéro = 1 minute
- Déplacement mesuré toutes les minutes + après la décharge

Accroche



4 - Mode opératoire des essais

Essais de contrôle - *interprétation*

➤ Critère de déplacement :

- ✓ Déplacement du même ordre de grandeur que celui mesuré lors des essais à la rupture
- ✓ Déplacement inférieur à la valeur admissible fixée par le MOA ou son BET
- ✓ Déplacement résiduel ≤ 5 mm

➤ Critère non vérifié → fiche de non-conformité

4 - Mode opératoire des essais

	Type d'essai	Phase	But	Type	Effort maximal	Conclusion	Nombre d'essai minimum
Essai à la rupture	Préalable (*)	Etude (avant/pendant conception)	Faisabilité / prédimensionnement de conception	Rupture : fondation profonde hors ouvrage	Résistance limite géotechnique estimée	Définition de la valeur R_{mes}	Voir ANNEXE 5 : Détermination de la valeur de ξ en fonction du nombre d'essais
	conformité (*)	Etude (au plus tard au début du chantier)	Justification du dimensionnement	Rupture : fondation profonde hors ouvrage, réalisé dans les mêmes conditions que la fondation de l'ouvrage définitif	$1,6 F_{Ed}$ ou Résistance limite géotechnique	Définition de la valeur R_{mes}	
	Contrôle (**)	Pendant et après réalisation	Valider l'exécution de l'entreprise	Sur fondation profonde d'ouvrage (avant montage de la structure)	$1,1 F_{ELS}$; car	Non-conformité si critère de déplacement non respecté	1% des fondations profondes installées avec un minimum de 1 par hectare

Charge verticale
Charge horizontale

	Type d'essai	Phase	But	Type	Effort maximal	Conclusion	Nombre d'essai minimum
Essai à la rupture	Préalable	Etude (avant/pendant conception)	Faisabilité / prédimensionnement de conception	Rupture : fondation profonde hors ouvrage	$1,1 F_{ELS}$; car	Validation des justifications selon §6.5. soit un déplacement résiduel : • au maximum de l'ordre de 5 mm • significativement inférieur au déplacement mesuré	Voir ANNEXE 5 : Détermination de la valeur de ξ en fonction du nombre d'essais
	conformité	Etude (au plus tard au début du chantier)	Justification du dimensionnement	Rupture : fondation profonde hors ouvrage, réalisé dans les mêmes conditions que la fondation de l'ouvrage définitif	idem ci-dessus	idem ci-dessus	
	Monopodes (essais complémentaires) Conformité	Etude (au plus tard au début du chantier)	Justification du dimensionnement	Rupture : fondation profonde hors ouvrage, réalisé dans les mêmes conditions que la fondation de l'ouvrage définitif	$1,6 F_{Ed}$ ou Résistance limite géotechnique	Analyse spécifique	
Essai de contrôle	Contrôle	Pendant et après réalisation	Valider l'exécution de l'entreprise	Sur fondation profonde d'ouvrage (avant montage de la structure)	$1,1 F_{ELS}$; car	Non-conformité si critère de déplacement non respecté	1% des fondations profondes installées avec un minimum de 1 par hectare

5 - Dimensionnement par essais

5 - Dimensionnement par essais

Vérification sous effort horizontal et moment

Dimensionnement validé par les POT :

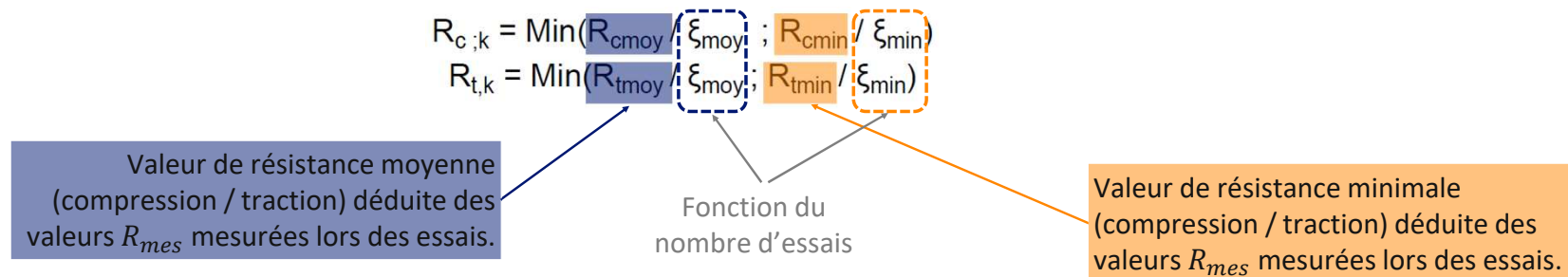
- Déplacement global < valeurs limites fixées par le maître d'ouvrage,
- Domaine pseudo-élastique -> déplacement résiduel au maximum de l'ordre de 5 mm, et significativement inférieur au déplacement maximal mesuré sous chargement.

5 - Dimensionnement par essais

Vérification sous effort vertical

Dimensionnement validé par les POT :

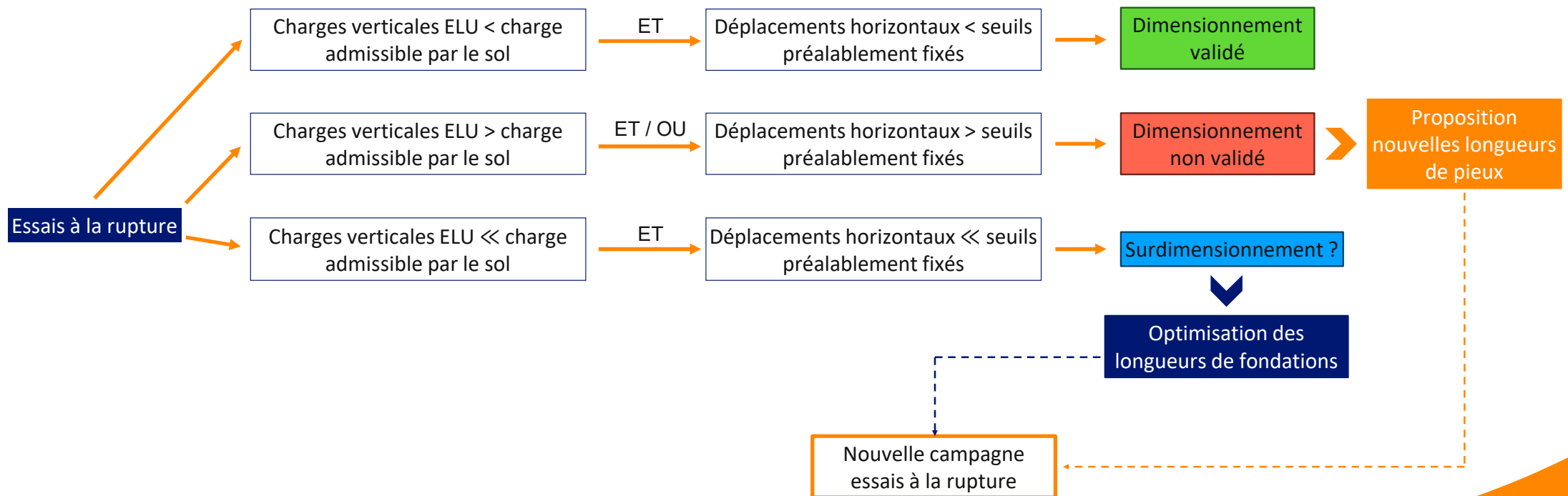
- Vérifications menées à l'ELU et à l'ELS.
- Résistance en compression ($R_{c,d}$) et résistance en compression ($R_{t,d}$) calculées selon la méthode « Essais de pieux » (NF P 94-262).
- Valeur caractéristique de la portance :



- Cas particulier de zones hétérogènes (cf. recommandations – jusqu'à $\xi_1 = \xi_{moy} = \xi_2 = \xi_{1min} = 2$)
- Essais en traction uniquement : $R_{c,k} = R_{t,k}$.

5 - Dimensionnement par essais

Validation de l'ébauche dimensionnelle par la campagne d'essais



6 – Exemple: projet de centrale solaire au sol

6 - Exemple

Etude géotechnique de conception. Projet de 12,8 Ha

Données biblio :

- Géologie = calcaires avec recouvrement d'altération
- Pas de risque identifié
- Pas d'eau
- Hors-gel 0,7m

Investigations géotechniques :

- 5 sondages à 5m/TN avec essais pressiométriques
- 13 pénétromètres dynamiques 5m/TN (refus)
- 12 fouilles à la pelle
- 3 GTR
- 5 Essais agressivité sols/béton

Données ouvrage :

- Pas de DDC → hypothèse de 16 kN aux ELU
- Pas de seuils de déplacement

1 zone géotechnique / 1 modèle géotechnique



N°	Nature du sol	Prof. de la base (m/TA)	Classe de sol (NF P94-262)	p _{LM} * (MPa)	Frottement	
					Courbe type	q _{si} (kPa)
1	Limons argileux	0.7*	Argiles et limons	/	Q1	0*
2	Calcaires	> 6.0	Marne et calcaire marneux	4.7	Q4	164

(*) Formation négligée : mort-terrain – épaisseur hors gel

Méthode de calcul = Modèle de terrain, méthode pressiométrique



Proposition de dimensionnement :
Pieux forés béton (micropieux type II)
Diamètre 150mm – longueur 1,7m

6 - Exemple

Définition des descentes de charge (ELS Car et ELU Fond pour pieu Nord / pieu Sud)
 Profils souhaités = C90 * 1,5mm et C120 * 1,5 mm
 Diamètres forage (machine) = 127 mm ou 160 mm
 Déplacements maximum admissibles = 12 à 16 mm en V, 5mm résiduel en H

N°	Nature du sol	Prof. de la base (m/TA)	Classe de sol (NF P94-262)	p _{LM} * (MPa)	Frottement	
					Courbe type	q _{si} (kPa)
1	Limons argileux	0.7*	Argiles et limons	/	Q1	0*
2	Calcaires	> 6.0	Marne et calcaire marneux	4.7	Q4	164

(*) Formation négligée : mort-terrain – épaisseur hors gel

Ebauche dimensionnelle :

Méthode de calcul = Modèle de terrain, méthode pressiométrique
 Utilisation logiciel FOXTA



Pieux forés béton (micropieux type II)

- **C90*1,5 Diamètre 127mm** - Longueur 1,4m pieu nord - Longueur 1,2 m pieu Sud → **1,7m retenu** (= 0,7m neutralisé + 1m)
- **C120 * 1,5 Diamètre 160mm** - Longueur 1,3m pieu nord - Longueur 1,2 m pieu Sud → **1,7m retenu** (= 0,7m neutralisé + 1m)



Surface géotechnique homogène ≤ 15Ha			
Densité des essais	4 essais + 1 essai pour 10000m²	4 essais +1 essai pour 5000m²	4 essais + 1 essai pour 3333m²
ξ ₁ = ξ _{moy}	1,4	1,3	1,2
ξ ₂ = ξ _{min}	1,4	1,2	1,05

Rédaction protocole d'essais à la rupture (POT) avec :

Pieux forés béton (micropieux type II)

- ~~C90*1,5~~ Diamètre 127mm , longueur 1,7m
- ~~C120 * 1,5~~ Diamètre 160mm , longueur 1,7m
- 40 essais répartis sur le site (soit **ξ₁ = 1,2 et ξ₂ = 1,05**) pour chaque type de pieu

Tests H sur 1 pieu/2, paliers jusqu'à 130% ELS ou 100%ELU

puis tests V sur chaque pieu : paliers jusqu'à 160% ELU puis arrachement (ici maxi 5100 kg / capacité engin)

6 - Exemple

Réalisation des essais à la rupture (POT) :

40 essais attendus
pour chaque diamètre

33 essais réalisés, **mais 29 essais retenus** pour le diamètre 127mm

Paliers respectés (attention H avant V), mais pas jusqu'à l'arrachement (maxi 4300 kg)

Déplacements mesurés : à V_{max} = 0 à 4 mm , à H_{max} = 4 à 15mm et 0 à 3 mm résiduel

ESSAI NON RETENU POUR
L'ANALYSE =

Essai ayant montré une rupture
prématurée **non dimensionnante**
(défaut de bétonnage, rupture
d'élingue...).

6 - Exemple



Interprétation des essais à la rupture (POT) :

Vérification sous efforts
verticaux - Méthode essais
de pieux (NFP 94-262)
D=127mm

$\xi_1 (\xi_{\text{moy}}) = 1,3$ et $\xi_2 (\xi_{\text{min}}) = 1,2$
Rt,moyen = 43 kN → avec épaisseur neutralisée = 25,3kN (non réalisé in-situ)
Rt,mini = 34kN → avec épaisseur neutralisée = 20kN
→ Facteurs de sécurité > 1 pour ELU Perm et ELS Car, et pour pieu N et pieu Sud



Vérification sous efforts
horizontaux et moments
D=127mm

Déplacements inférieurs à 15mm en Maxi et à 3 mm en résiduel



Pieux de 1,7 m, diamètre 127mm, Profilé C90*1,5 → **Dimensionnement vérifié**

Surface géotechnique homogène ≤ 15Ha				
Densité des essais	4 essais + 1 essai pour 10000m²	4 essais + 1 essai pour 5000m²	4 essais + 1 essai pour 3333m²	6 p
$\xi_1 = \xi_{\text{moy}}$	1,4	1,3	1,2	1
$\xi_2 = \xi_{\text{min}}$	1,4	1,2	1,05	1

6 - Exemple

Réalisation des pieux définitifs du projet :

Essais de contrôle

1% des pieux à tester, avec un minimum de 1/Ha

Essais H et V jusqu'à 110% ELS

Les déplacements doivent être similaires à ceux obtenus en POT et inférieurs aux seuils fixés

**Merci pour votre attention
...questions ?**