

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

DONNEES D'ENTREE GEOTECHNIQUES

JST DU 03/04/2025

Données d'entrée géotechniques

Données d'entrée géotechniques

Objectifs des investigations

Objectifs

L'objectif de la campagne de reconnaissances géotechniques est de définir les contextes géotechnique et hydrogéologique à l'échelle du site et de permettre de lever les risques majeurs, principaux et résiduels, progressivement et graduellement à l'avancement des études. Pour traiter de la conception des fondations, cela comprend:

- ➡ de définir des **zones géotechniquement homogènes** au niveau du projet,
- ➡ de préciser la **hauteur de sol neutralisé et dégradé** en surface (gel/dégel, retrait/gonflement, dessouchage, labour, terrassement, ...),
- ➡ d'établir un **pré-dimensionnement des fondations sur la base d'essais géotechniques** (cf. **présentation sur les justifications des ouvrages**).

La finalisation du dimensionnement des fondations se fait sur la base d'essais à la rupture (essais préalables/essais de conformité).

Les études géotechniques comprennent plus largement les terrassements généraux, les pistes d'accès, les fondations des locaux techniques et postes transformateurs; ainsi que la prise en compte d'aléas particuliers (sols évolutifs, zones inondables...) et des problématiques de stabilité générale. Les contenus des investigations et des études sont à adapter par le géotechnicien pour intégrer ces ouvrages et traiter ces aléas.

Données d'entrée géotechniques

Objectifs des investigations

Zones d'homogénéité géotechnique

Les données obtenues doivent permettre d'identifier des **zones d'homogénéité géotechnique** qui se définissent par une surface, et donc un volume de sol, au sein duquel les propriétés

- géologiques,
- géomécaniques,
- hydrogéologiques
- physico-chimiques

sont suffisamment homogènes pour permettre de définir **une solution de fondation et des hypothèses géotechniques uniformes et adaptées**, et d'en assurer le dimensionnement.

La précision de leur délimitation peut imposer une densification des reconnaissances, à évaluer en fonction des incidences sur le dimensionnement des ouvrages.



Données d'entrée géotechniques

Objectifs des investigations

Zones d'homogénéité géotechnique



Les sondages réalisés au droit du projet montrent la présence du substratum granitique très compact à faible profondeur, ainsi que la présence d'une faille remplie par un filon de Quartz (sondage PM9).

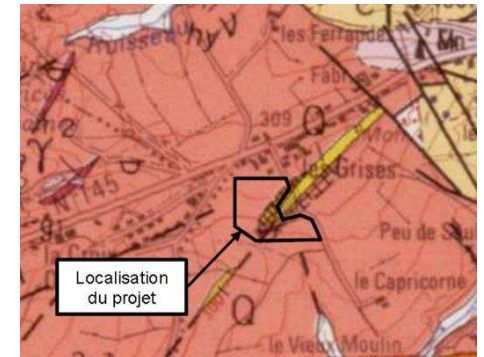
Le granite a été rencontré à des profondeurs comprises entre 0.7 et 2.5 m/TA. Le battage des pieux métalliques comme support des tables de panneaux photovoltaïques est envisageable sur une bonne partie du projet avec une profondeur d'ancrage retenu de 1.5 m/TN. Cependant un zonage a dû être établi (cf plan ci-après) :

- **Zone 0** : granite rencontré à plus de 2.0 m/TA, faible aléa de refus lors du battage des pieux métalliques, battage de pieux envisageable et micropieux forés type II toujours possible ;
- **Zone 1** : granite rencontré à moins de 2.0 m/TA, fort aléa de refus, micropieux forés type II recommandés;
- **Zone 2** : quartz rencontré en proche surface, refus certain, roche très dur et abrasive nécessitant des outils de forage adaptés couteux avec une usure rapide, micropieux forés de type II ou massifs lestés recommandés.

Sur l'ensemble du projet, nous proposons de retenir une solution de micropieux forés de type II, ancrés, en première approche, d'une profondeur minimale de 1.5 m/TN.

Une solution alternative de pieux métalliques battus ancrés à 2.0 m/TN est cependant envisageable dans la zone 0 eu égard des épaisseurs d'arène granitique très altérés. C'est cette solution que nous développerons dans la suite de ce rapport.

De même une solution de massifs lestés semble plus adaptés dans la zone 2 eu égard des complexités de forage dans un filon de quartz.



Données d'entrée géotechniques

Objectifs des investigations

Dégradation des sols en surface

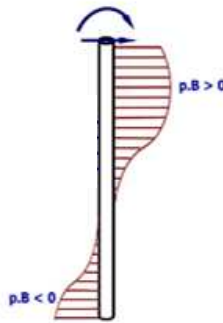
La stabilité et le dimensionnement des fondations sont fortement conditionnés par les **propriétés mécaniques des sols en surface**. Il est donc primordial de tenir compte de **leur évolution possible, et ce durant toute la durée de service de l'ouvrage, par une neutralisation / dégradation de leurs propriétés mécaniques**.

Un sol neutralisé est un sol qui ne montre aucune caractéristique mécanique. Un sol dégradé présente des caractéristiques mécaniques réduites. Le géotechnicien définit les épaisseurs de sol neutralisé et de sol dégradé dans le cadre de l'étude (**cf. présentation sur les justifications des ouvrages**).

La prise en compte systématique d'une épaisseur neutralisée / dégradée de 0,5 m minimum est requise.

Une **épaisseur plus importante** peut être prise en compte dans les cas suivants :

- Gel/dégel
- Aléa retrait/gonflement des argiles (RGA) (on considère au minimum une épaisseur neutralisée/dégradée de 0,8 m pour les terrains F3/F4 selon la GTR 2023)
- Erosion superficielle, en cas de terrains en pente notamment
- Labour passé ou futur (cas des parcs agrivoltaïques), dessouchage, terrassements passés ou futurs
- Zones de rétention d'eau, remontées de nappe
- Etc....

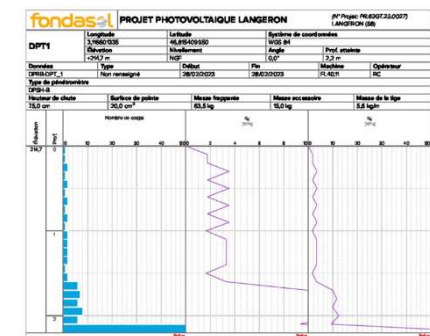


Données d'entrée géotechniques

Moyens de reconnaissance

Types de reconnaissance

- **Sondages lithologiques**, permettant de déterminer visuellement le type de sol rencontré (sondages à la pelle mécanique, à la tarière, au carottier, ...) et d'apprécier les conditions de réalisation (tenue des fouilles, venues d'eau...),
- **Sondages géomécaniques**, permettant d'obtenir par mesure les grandeurs physiques caractéristiques du sol (sondages pénétrométriques dynamiques / statiques (CPT), sondages avec essais pressiométriques Menard (PMT), essais de cisaillement en forage, ...),
- **Essais d'identification en laboratoire** (essentiellement pour étudier le risque de retrait / gonflements des sols argileux et pour les terrassements, y compris extraction et réutilisation),
- **Essais de caractérisation de la corrosivité des sols** pour le choix de la protection des aciers,
- **Essais de caractérisation de l'agressivité chimique du sol et de l'eau** pour le choix des bétons.



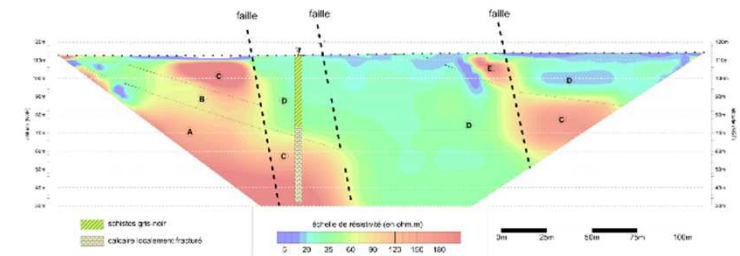
Données d'entrée géotechniques

Moyens de reconnaissance

Moyens complémentaires

Dans certains cas particuliers, le programme d'investigations peut être complété avec :

- Des essais mécaniques en laboratoire,
- Une campagne géophysique (cas d'un substratum rocheux dont le niveau du toit est très variable),
- Des équipements piézométriques, pour l'étude de l'influence des niveaux de nappe, mais aussi pour le prélèvement d'eau pour qualifier l'agressivité sur le béton,
- Des essais de perméabilité pour l'étude des problématiques de drainage par exemple...
- Etc...



Données d'entrée géotechniques

Programmes minimum recommandés

Sondages lithologiques et géomécaniques

Dans la majorité des cas, des investigations descendues jusqu'à 5 m de profondeur s'avèrent suffisantes. Dans certains cas particuliers : sollicitations importantes, terrassement important, épaisseur de remblais importante, zone karstique..., des investigations plus profondes / plus complexes sont nécessaires.

Surface totale S (en Ha)	Nombre minimum total de sondages	SONDAGES LITHOLOGIQUES (Nbre minimum)	SONDAGES GEOMECANIQUES (Nbre minimum)
$S \leq 5$ Ha	10	Au moins 30 %	Au moins 50 %
$S > 5$ Ha	2 sondages / Ha		

L'ébauche dimensionnelle des ouvrages, nécessaire à la définition des protocoles d'essais sur pieux, sera menée par application des recommandations de la norme NF P94-262. **Aussi les investigations géomécaniques devront intégrer des sondages avec essais pressiométriques et/ou essais au pénétromètre statique.**

Données d'entrée géotechniques

Programmes minimum recommandés

Essais en laboratoire

Si des faciès argileux sont observés, ou si l'aléa RGA est mis en évidence sur la carte de risque, il convient de prévoir des analyses GTR par nature et état hydrique, avec des essais et analyses en laboratoire suivantes : teneur en eau naturelle, granulométrie, sédimentométrie et mesure de l'argilosité (Valeur au Bleu ou Limite d'Atterberg).

Surface totale S (Ha)	Identification GTR + Risque RGA (Nbre minimum)
$S \leq 5$	3
$5 < S \leq 15$	4
$15 < S \leq 30$	5
> 30	Minimum de 6, à adapter par le géotechnicien

Les quantités, et type d'essais, sont à adapter en fonction :

- des différentes formations mises en évidence dans chaque zone d'homogénéité géotechnique,
- du linéaire de pistes et de l'ampleur des ouvrages en déblais / remblais.

Données d'entrée géotechniques

Programmes minimum recommandés

Agressivité du milieu

L'agressivité du milieu sur les matériaux constitutifs des fondations est à définir lors de l'étude géotechnique de conception.

➡ Protection contre la corrosion

Les données d'entrée sont définies :

- soit dans l'annexe B de la norme NF EN 14490 Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Clouage,
- soit dans la norme allemande DIN 50 929-3,
- et la NF EN 1993-5 §4.4 concernant l'épaisseur sacrificielle.

➡ Agressivité des sols et eaux vis-à-vis du béton

Dans le cas d'une technique d'exécution avec remplissage béton (ou mortier ou coulis) du forage, et en référence à la norme NF EN206, il doit être pris en compte, dans le choix du béton, l'agressivité des sols et de l'eau ➔ **classe XAi**.

Données d'entrée géotechniques

Programmes minimum recommandés

Agressivité du milieu

Surface totale S (Ha)	Corrosion (Nbre mini)	Agressivité (Nbre mini)
$S \leq 5$	3	3
$5 < S \leq 15$	5	5
$15 < S \leq 30$	7	7
> 30	Minimum de 9, à adapter par le géotechnicien	Minimum de 9, à adapter par le géotechnicien

Données d'entrée géotechniques

Maquettes géotechniques

1 zone d'homogénéité géotechnique = 1 maquette

Contexte

Des contraintes spécifiques liées au projet et au site ont été mises en évidence :

- La présence de sols fins limono-argileux a priori sensibles aux phénomènes d'aléa retrait / gonflement (analyse GTR en cours) ;
- La présence de sols limono-argileux de compacité très molle sur 1.5 m d'épaisseur puis molle à ferme au-delà ;
- La présence de cailloux calcaires pouvant générer des difficultés de battage.

Solutions envisageables

Compte-tenu du contexte géotechnique et du projet, les solutions de fondations possibles sont les suivantes :

- réalisation de **pieux métalliques battus** ;
- réalisation de **fondations profondes de type micropieux forés et scellés avec un coulis, mortier ou un béton** ($R_{c28 \text{ jours}} \geq 25 \text{ MPa}$ à confirmer par les mesures d'agressivité en cours) de granulométrie adaptée à l'espace annulaire entre le forage et le profilé.



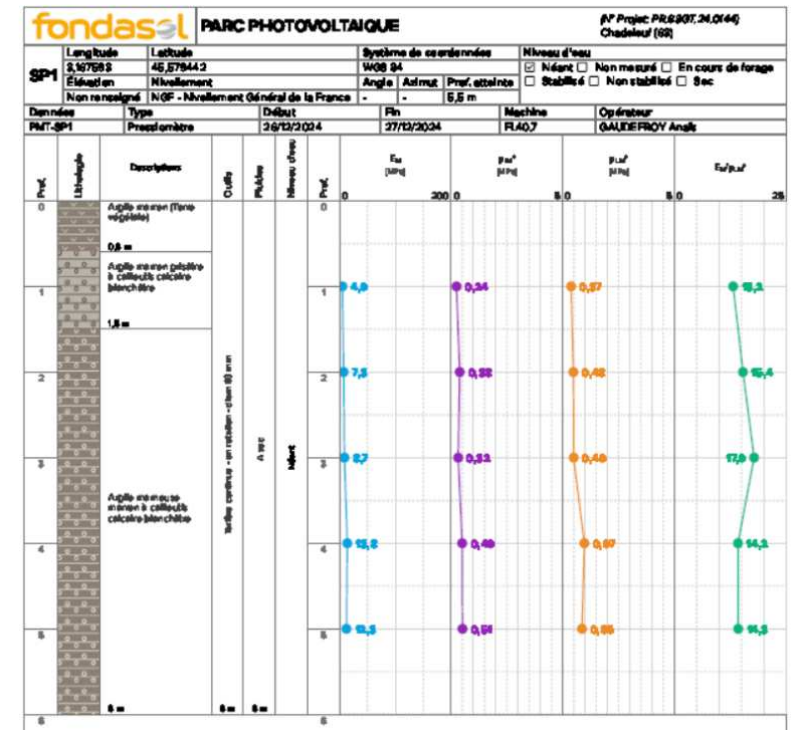
Données d'entrée géotechniques Maquettes géotechniques

Maquette pieux battus

Les modèles géotechniques retenus au stade de l'avant-projet sont définis dans les tableaux ci-dessous, pour des pieux de type Battu acier ouvert mis en œuvre selon une technique de battage (de classe 5 et de catégorie 13 selon la norme NF P94-262).

N°	Nature du sol	Prof. de la base (m/TA)	Classe de sol (NF P94-262)	p_{LM}^* (MPa)	p_f^* (MPa)	E_M (MPa)	α	Frottement	
								Courbe type	q_{si} (kPa)
1	Formation dégradée : épaisseur hors gel et aléa de sols fins argilo-limoneux	0.8*	Argiles et limons	0.2	0.1	2	0.67	Q1	0*
2a	Argile à cailloutis calcaire très molle de -0.5 à -1.5 m	-1.5	Argiles et limons	0.3	0.2	4	0.67	Q1	31
2b	Argile à cailloutis calcaire molle à ferme au-delà de -1.5 m	6.0	Argiles et limons	0.45	0.3	7	0.67	Q1	39

(*) Formation dégradée : épaisseur hors gel et aléa de sols fins argilo-limoneux



Données d'entrée géotechniques Maquettes géotechniques

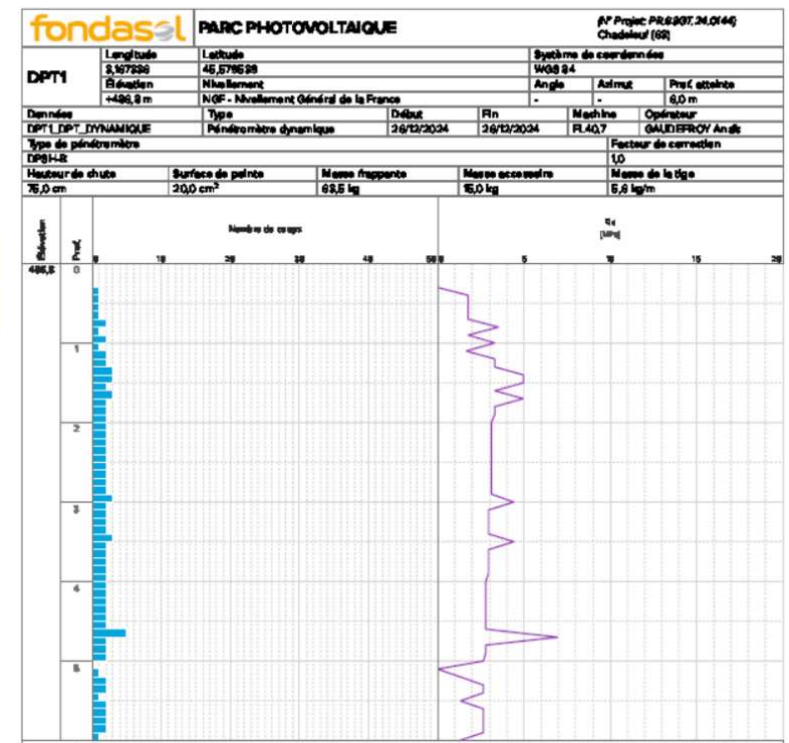
Maquette pieux forés scellés

On propose la réalisation de pieux scellés assimilés à des micropieux de type II (de classe Ibis et de catégorie I8 selon la norme NF P94-262).

Les modèles géotechniques retenus au stade de l'avant-projet sont définis dans les tableaux ci-dessous, pour des micropieux de type II. Pour déterminer les valeurs de flottement axial q_s des micropieux, nous avons considéré une technologie d'exécution assimilable à celle des pieux forés tubés (FTR).

N°	Nature du sol	Prof. de la base (m/TA)	Classe de sol (NF P94-262)	p_{LM}^* (MPa)	pf^* (MPa)	E_M (MPa)	α	Frottement	
								Courbe type	q_{si} (kPa)
I	Formation dégradée : épaisseur hors gel et aléa de sols fins argilo-limoneux	0.8*	Argiles et limons	0.2	0.1	2	0.67	Q1	0*
2a	Argile à cailloutis calcaire très molle de -0.5 à -1.5 m	-1.5	Argiles et limons	0.3	0.2	4	0.67	Q1	33
2b	Argile à cailloutis calcaire molle à ferme au-delà de -1.5 m	6.0	Argiles et limons	0.45	0.3	7	0.67	Q1	40

(*) Formation dégradée : épaisseur hors gel et aléa de sols fins argilo-limoneux



Données d'entrée géotechniques

Merci de votre attention.... et place au dimensionnement !