

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

## PRESENTATION DE LA JST

JST DU 03/04/2025

# Le comité français de Mécanique des Sols et de géotechniques (CFMS)

- Une société savante affiliée à la société Internationale de Mécanique des sols et de la géotechnique
- Promouvoir et partager les recherches et avancées dans le domaine de la mécanique des sols et de la géotechnique
- Favoriser les échanges entre les acteurs de la profession : laboratoires publics de recherche, entreprises, bureaux et laboratoires privés, ingénieurs conseils et experts, maîtres d'œuvre et bureaux de contrôle, maitres d'ouvrages etc.



# Genèse des recommandations

RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION, AU CALCUL, À  
L'EXÉCUTION ET AU CONTRÔLE DES STRUCTURES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL  
PRÉSENTATION DE LA JST 03/04/2025

# Genèse des recommandations

## Historique

En 2021, nous avons établi le constat suivant qui a motivé la création de ce groupe de travail :

- ▶ Une **absence de référentiel** spécifique pour la réalisation de fondations profondes courtes tant du point de vue de la conception, du dimensionnement que de l'exécution et des contrôles hors normes d'application et d'exécution en référence aux Eurocodes (94-262 notamment)
- ▶ Les **terrains** d'installation sont souvent de mauvaise qualité, ce sont des terrains où l'on ne construirait pas un bâtiment (délaissés autoroutiers, gravières/carrières comblées...)
- ▶ Le dimensionnement se fait sur la base d'essais mais ceux-ci se font sans procédure préétablie et commune, l'interprétation de ces **essais pour le dimensionnement** du projet se fait également sur la base de l'expérience propre de chaque entreprise
- ▶ De **nombreuses entreprises étrangères européennes** obtiennent les marchés, peu d'entreprises françaises, certaines utilisant leur **pratique locale**

**Aléa non maîtrisé et identification de cause de sinistre potentiel (majoritairement en perte de production)**

En janvier 2022, le Conseil du CFMS et la CST, nous autorise à former un groupe de travail afin d'engager la rédaction de Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle des fondations des fermes photovoltaïques.

# Genèse des recommandations

## Photovoltaïque versus bâtiment

Les centrales photovoltaïques au sol présentent un certain nombre de spécificités par rapport aux ouvrages de construction courante :

- la superficie des terrains sur lesquels sont réalisés les ouvrages (plusieurs hectares) ;
- l'amplitude de chargements faible (de l'ordre de 1 à 10 kN) ;
- la typologie des efforts appliqués (efforts variables prépondérants sur les efforts permanents et à l'origine de possibles efforts alternés) ;
- la concomitance des efforts horizontaux et verticaux ;
- la grande densité de fondations supportant les structures photovoltaïques par rapport à des ouvrages où les sollicitations redescendent sur des appuis ponctuels et moins nombreux (pour les bâtiments par exemple) ;
- la géométrie et l'épaisseur des profilés relativement réduites ( $I_y$  2 fois plus faible que le plus petit HEA) ;
- des fondations profondes courtes de faible diamètre équivalent ;
- les réglementations locales ou particulières (décharges) empêchant la mise en œuvre de système de fondation classique ;
- l'utilisation de zones peu valorisées (par exemple délaissés autoroutiers ou décharges) ;
- une installation sur un terrain « loué » qui doit être rendu en l'état à l'achèvement des contrats (usuellement de l'ordre de 20 ans).

# Genèse des recommandations

## Photovoltaïque versus bâtiment

De plus, nous observons des acteurs venant de métiers différents pouvant avoir des difficultés de communication en raison d'une approche « industrielle » du processus de réalisation pour les porteurs de projet (standardisation des aménagements pour l'optimisation de leur délai de construction).

Cette logique de construction industrielle au vu du nombre de fondation et de la logistique de construction mise en place est très différente de l'utilisation normale des normes d'application nationales orientées « Bâtiment ».

Ces recommandations avaient donc pour ambition :

- D'établir un vocabulaire commun ;
- D'adapter la philosophie de dimensionnement des Eurocodes à la spécificité des ouvrages photovoltaïques ;
- De préciser les points incontournables à prendre en compte dans la conception des fondations des ouvrages photovoltaïques ;
- De prendre en compte les expériences de tous participants.

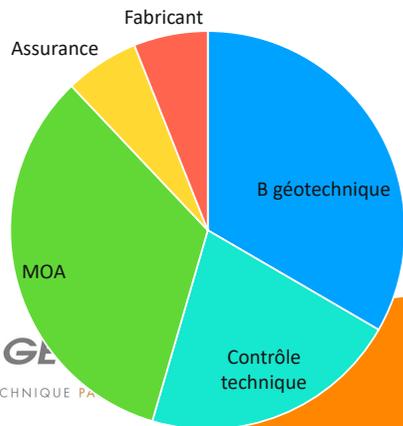
# Genèse des recommandations

## Organisation du Groupe de Travail

- La **présidence** du GT a été assurée par Arnaud LAFOURCADE (GEOTEC)
- L'**animation** du GT a été assurée par Nathalie BORIE (APAVE)

Après avoir établi un premier sommaire, nous avons formé 4 sous-groupes afin d'organiser les réflexions et la rédaction du document :

- **SG1 : Généralités, définitions, domaine d'emploi, mode de fondation** Arnaud LAFOURCADE (GEOTEC)
- **SG2 : Enchaînement et contenu des missions** Benjamin DAMOUR (FONDASOL)
- **SG3 : Dimensionnement GEO et STR – Ouvrages annexes + Cas particulier** Mikaël FORTUNEL puis Anne Laure GUILLERMIN (ANTEA)
- **SG4 : Procédure d'essais – Exécution et contrôles** Gaël GOURRIN (SOCOTEC)



Au total, ce sont 33 professionnels de tous horizons qui ont participé activement aux échanges

# Genèse des recommandations

## Participants du Groupe de Travail

Nom, Prénom	Société
AGUADO Pascal	GEOTEC
ANTOINET Eric	ANTEA
BROUTY Pauline	ANTEA
CLEOMENE Elie	INFRANEO
<b>DAMOUR Benjamin</b>	FONDASOL
DOUPHY Matthieu	ANTEA
<b>GUILLERMIN Anne-Laure</b>	ANTEA
<b>LAFOURCADE Arnaud</b>	GEOTEC
LECOMTE Delphine	GINGER CEBTP
YAHIA-AISSA Mourad	TERRASOL
ZERHOUNI Moulay	FONDASOL

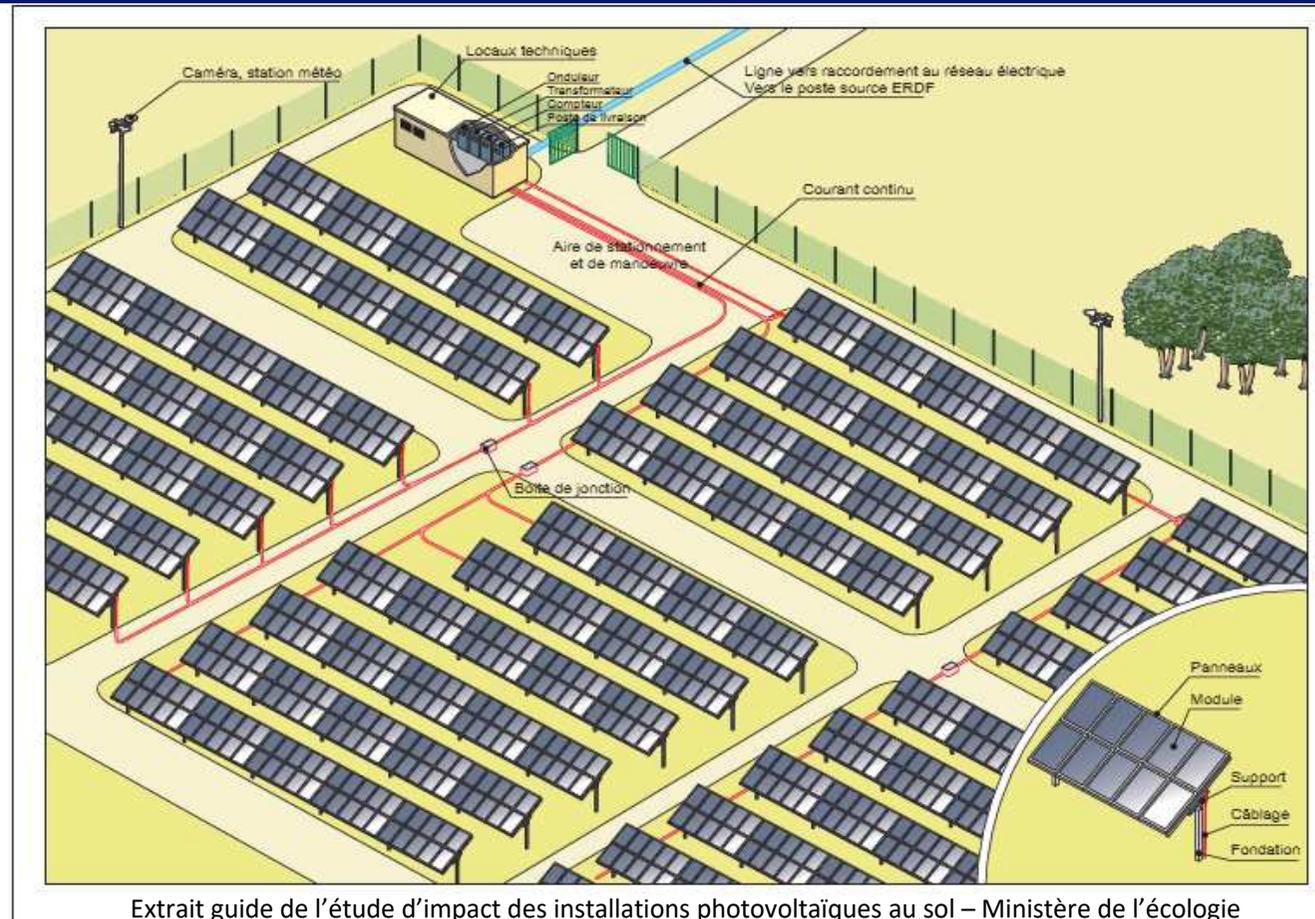
Nom, Prénom	Société
BORIE Nathalie	APAVE
ESPITALLIER Mathieu	SOCOTEC
FONTANAUD Damien	ALPES CONTRÔLE
<b>GOURRIN Gaël</b>	SOCOTEC
LEFOL Pierig	ALPES CONTRÔLE
NAYRAND Nicolas	BUREAU VERITAS
ROULE David	BUREAU VERITAS
DINCKI Pascal	MMA
PELTEKIAN Julien	SMA/SOCABAT
MICOLOD Vincent	AXIAL
SANCHEZ David	AXIAL

Nom, Prénom	Société
BOURDIER Florent	CVE
FAVRE DE THIERRENS Paul	URBASOLAR
HOTEIT Nasser	TOTALENERGIES
KOUVTANOVITCH Thomas	ENGIE
MARGOT Sabrie	URBASOLAR
MOURRAIN Anaïk	ENGIE GREEN
RAIMBAULT Etienne	TSE
SAGLIETTO Christophe	CVE
SCODITTI Marta Giulia	URBASOLAR
VORS Arnaud	URBASOLAR

# Le Photovoltaïque Les différentes familles de techniques de fondations

RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION, AU CALCUL, À  
L'EXÉCUTION ET AU CONTRÔLE DES STRUCTURES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL  
PRÉSENTATION DE LA JST 03/04/2025

# Schéma de principe d'une installation type de centrale photovoltaïque



Extrait guide de l'étude d'impact des installations photovoltaïques au sol – Ministère de l'écologie

# Les différents constituants d'une centrale photovoltaïque



# Les différents types de d'ouvrages photovoltaïques



Table = structure métallique supportant les panneaux (appelés également modules)



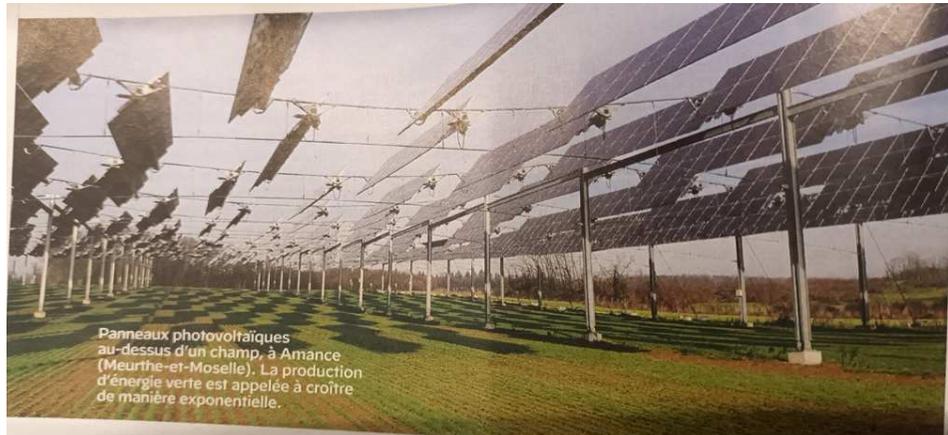
# Les différents types de d'ouvrages photovoltaïques



# Les différents types de d'ouvrages photovoltaïques



Agrivoltaïque dynamique : trackers « 1 axe » surélevés



# Les différents techniques de fondation des tables

## Cornières battues

Cette technique correspond à une technique de pieux battus ouverts dans le terrain en place en référence à la NFP94-262.

Avec un pré-forage préalable de diamètre inférieur à la plus petite dimension du profilé, la technique s'apparente également à une technique de pieux battus ouverts dans le terrain en place.

La technique n'est pas adaptée à tout type de terrain. En particulier, les terrains rocheux et les sols pulvérulents à blocs ne sont pas adaptés (faux-refus)



# Les différents techniques de fondation des tables

## Foré + grain de riz + battu

La technique est phasée ainsi :

- Mise place d'une foreuse ;
- Forage destructif (diamètre de forage > grande dimension du profilé) ;
- Mise en place gravitaire d'un gravillon « grain de riz » ou d'un sablon ;
- Mise en œuvre par battage des cornières dans les préforages remplis.

Après mise en œuvre et en service, cette disposition crée un piège à eau (dans un encaissant imperméable) sur toute la hauteur du profilé susceptible de dégrader le profilé et d'altérer le sol.

Cette technique correspond à une technique de battu ouverts dans le matériau granulaire de substitution en référence à la NFP94-262.



**Compte tenu des retours d'expérience négatifs et hétérogènes, cette technique est fortement déconseillée.**

# Les différents techniques de fondation des tables

## Foré + béton

La technique est phasée ainsi :

- Mise place d'une foreuse ;
- Forage destructif ;
- Mise en place des cornières dans les préforages ;
- Comblement du forage au béton.

### Attention :

- le profilé doit être centré dans le forage
- Le béton doit être suffisamment fluide pour enrober le profilé toute hauteur si le bétonnage se fait par le haut. Il est recommandé d'injecter le béton depuis le fond
- Il convient de s'assurer de l'enchaînement des tâches de forage et bétonnage dans un délai à adapter à la tenue des terrains.

Cette technique s'apparente en général à une technique de micropieu de type 2 en référence à la NFP94-262 et nécessite une tenue suffisante des terrains avant la mise en œuvre du béton.



# Les différents techniques de fondation des tables

## Fondations profondes en techniques non courantes

Il peut s'agir d'éléments de fondations élancées travaillant par frottement latéral disposant d'un avis technique du CSTB ou d'une EPG (Evaluation de Procédé Géotechnique délivrée par le CEREMA et l'Université Gustave Eiffel). On se reporte donc à ces référentiels spécifiques pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle si le domaine d'application de ces procédés couvre l'emploi en panneaux photovoltaïques au sol.

A ce jour, de nombreux procédés (ancres, vis, ...) sont mis sur le marché sans référentiel technique, et nécessitent une assurance spécifique au cas par cas.

Ce type de fondation pourra être justifié selon la méthode décrite dans les recommandations mais il peut être imposé des dispositions complémentaires relatives à la justification, la mise en œuvre et le contrôle.

# Les différents techniques de fondation des tables

## Massifs lests [non traité dans les recommandations] – Application NF P94-261

Technique essentiellement employée sur des décharges (ou pour les centrales flottantes).  
Le lest peut être en béton, en gabion ou tout autre structure poids.



# Les différents techniques de fondation des tables

## Centrales flottantes [non traité dans les recommandations]

2 solutions de fondation :

- Massifs lests en extrémités du plan d'eau ;
- Ancres en base du plan d'eau.



# Les différents techniques de fondation des tables

## Synthèse

Typologies de technologies usuellement utilisées en fonction des terrains

Type de terrain	Sol meuble	Sol à éléments grossiers, blocs ou rocheux	Terrains avec excavations ou forages limités
Technologie envisageable	Profilé battu  Pieu foré avec remplissage béton (selon tenue des terres)	Pieu foré avec remplissage béton  Massifs	Massifs

# Limites d'emploi des recommandations

RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION, AU CALCUL, À  
L'EXÉCUTION ET AU CONTRÔLE DES STRUCTURES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL  
PRÉSENTATION DE LA JST 03/04/2025

# Domaine d'application des recommandations

## Domaine d'application

Le domaine d'application de ces recommandations est limité aux centrales au sol de production d'énergie photovoltaïque (panneaux sur des structures fondées) :

- sans activité ou occupation humaine permanente ;
- dont les structures admettent des déformations plus importantes que les bâtiments ;
- avec une durée de vie inférieure à 30 ans.

Les exigences de ces recommandations sont adaptées à ce domaine d'application et à ce niveau de classe de conséquence (Classe de Conséquence 1).

# Domaine d'application des recommandations

## Exclusion du domaine d'application

Sont exclus du domaine d'application des recommandations :

- tous les ouvrages qui accueillent du personnel hors maintenance (ex : serres photovoltaïques et les ouvrages type hangar agricole avec une toiture intégrant des panneaux photovoltaïques) ;
- les bâtiments recevant des éléments photovoltaïques pour lesquels il est pleinement fait application des Eurocodes et des avis techniques du CSTB sur procédé (ex : bâtiments équipés de panneaux photovoltaïques en toiture) ;
- les trackers 2 axes [sensibilité forte aux déformations];
- les ombrières de parking [activité humaine importante] .

Pour les ouvrages exclus de ces recommandations, il doit être fait une pleine application des Eurocodes et les normes françaises associées.

Le cas des centrales lestées n'est pas abordé dans les recommandations (application de la NF P94-261).

# Domaine d'application des recommandations

## Synthèse

Domaine d'application des recommandations	Domaine d'exclusion des recommandations
Centrales au sol (sans autre objectif d'utilisation que la production d'énergie)	Ouvrages qui accueillent du personnel hors maintenance (ex : serres photovoltaïques et les ouvrages type hangar agricole avec une toiture intégrant des panneaux photovoltaïques)
Structures verticales (sans autre objectif d'utilisation que la production d'énergie)	Bâtiments recevant des éléments photovoltaïques pour lesquels il est pleinement fait application des Eurocodes et des avis techniques du CSTB sur procédé (ex : bâtiments équipés de panneaux photovoltaïques en toiture)
Centrales agrivoltaïques et éco-entretenués sans activité humaine permanente	Ombrières de parking
Tracker "mono-axe" avec déformations admissibles similaires aux centrales au sol	Trackers 2 axes
	Centrales lestées
	Centrales flottantes