

Demi-journée scientifique et technique
« Recommandations relatives à l'instrumentation des ouvrages géotechniques »

Chapitre 6 : recommandations par type d'ouvrages

ARNAUD LAFOURCADE & CHARLES NADIM

11 SEPTEMBRE 2025

Considérations générales

Chapitre 6 : mode d'emploi

Des recommandations selon le type d'ouvrage étudié

Les recommandations sont proposées selon plusieurs types d'ouvrage différents :

- Remblais ;
- Barrages en remblais ;
- Déblais pleine masse ;
- Rabattement de nappe ;
- Compactage ;
- Ecrans de soutènement de déblais ;
- Fondations et soutènement de remblais ;
- Talus naturels ;
- Digue en sol meuble ;
- Tunnels ;
- Mines et carrières ;
- Fondations profondes ;
- Impacts sur mitoyens ;
- Ouvrages portuaires.

Chapitre 6 : mode d'emploi

Structure de chaque type d'ouvrage abordé

ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT EN DÉBLAIS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déplacement et sollicitations de l'écran				
Mesure des déplacements dans les 3 directions	Cibles topographiques	Position à adapter en fonction des déplacements maximaux attendus (tête, ventre, pied)	Obligatoire	forte
Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement	Inclinomètre vertical et/ou horizontal (chaîne inclinométrique en forage)	Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur servant de référence	Recommandé	faible
Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe	Extensomètre		Fonction de la problématique identifiée	Equiperment des fissures existantes
Mesure des sollicitations (efforts, contraintes) dans des éléments de structure	Jauge de déformation		Fonction de la problématique identifiée	Fonction de la problématique identifiée



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



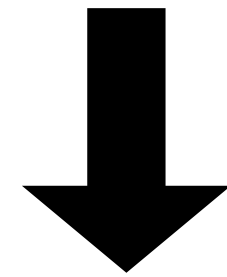
Exemple d'application #1 : une église troglodyte en évolution

Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte

Cas d'une église troglodyte en évolution (cas fictif inspiré d'un cas réel)

Principaux aléas :

- Déplacement global du massif vers la cavité : création de zone de compression ou décompression mécanique
- Vieillessement des structures maçonnées ou des piliers rocheux
- Instabilité des couches de roches en recouvrement de la cavité
- Poinçonnement des piliers dans la couche support



Principaux phénomènes surveillés :

- Ouverture, décrochement de fissures en parois, au plafond, sur certains piliers
 - Convergence (ouverture ou fermeture) entre parois ou sol/plafond
 - Basculement de façades maçonnées
- } Approche mine/carrière souterraine
- } Approche mitoyen / mur soutènement



Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte

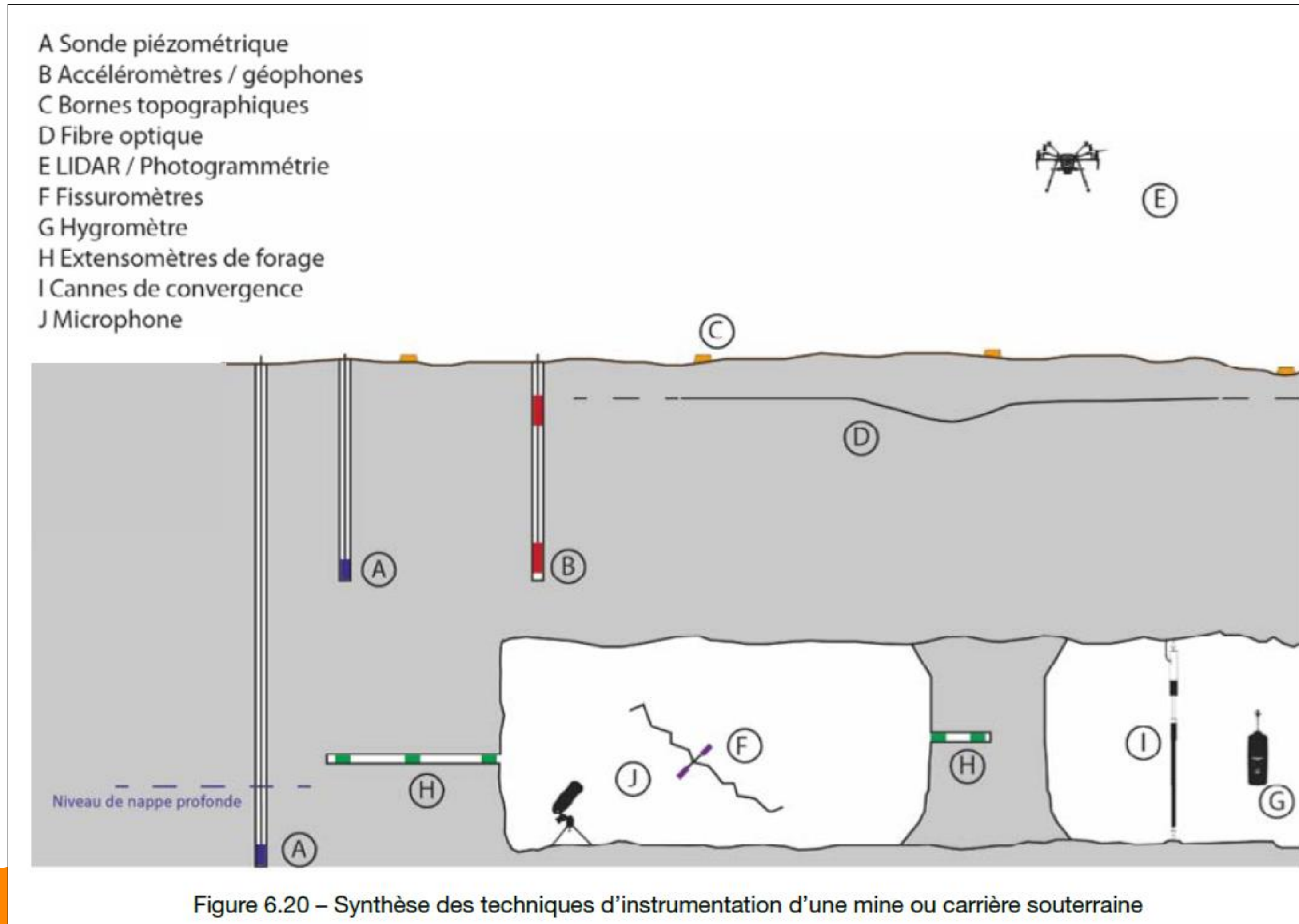
Mécanique de déformations au sein de la cavité : **Concerné.**



MINES ET CARRIÈRES SOUTERRAINES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations au fond				
Mesure de déplacements	Fissuromètre	Le suivi de fissures soigneusement choisies permet de suivre finement des déplacements locaux, par exemple le décrochement d'un bloc, l'ouverture d'une fracture, etc. Il pourra s'agir de simples jauges à lecture manuelle ou de capteurs électroniques. Dans ce second cas, il conviendra de les protéger notamment contre les chocs (ex : chute de pierre).	Recommandé	Selon les points spécifiques à suivre
	Extensomètre en forage	L'extensomètre permet de suivre finement la distance entre deux points. Installé dans un forage et fixé au fond, cette mesure permet de suivre l'éventuel déplacement d'une paroi (instabilité ou fluage). Permet de suivre le fluage.	Recommandé	Selon les points spécifiques à suivre
	Canne de convergence	Une canne de convergence permet de suivre la distance entre 2 points, typiquement le sol et le toit d'une galerie. Installé en zone à risque d'effondrement ou de poinçonnement.	Facultatif	Selon les points spécifiques à suivre

Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte

Schéma récapitulatif



Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte

Mécanique de déformations en surface :
Non concerné.

Mesure des déformations en surface				
Mesure de déplacements	Borne topographique	S'agissant d'une mesure peu invasive et généralement économique, elle est très souvent mise en œuvre. Elle permet une mesure directe des déplacements en surface dans les trois directions. La mesure est à réaliser de préférence par un géomètre agréé, qui utilisera soit une mesure de positionnement (type GPS), soit une mesure par théodolite avec référence. Elle permettra de suivre la subsidence en surface, voire un affaissement ou effondrement généralisé.	Recommandé	Importante
Mesure de déplacement à grande échelle	Fibre optique	La fibre optique permet de mesurer des déformations sur de grands linéaires. Elle peut être installée transversalement au déplacement attendu. La fibre doit être correctement protégée, idéalement au sein d'une tranchée.	Facultatif	Moyenne Mesure continue
Mesure de déplacement à grande échelle	LiDAR RADAR Scanner	Mesure possible sur des surfaces étendues. Peut être réalisé par drone, aéronef ou satellite en fonction de la superficie à traiter et des fréquences de mesure.		Mesure étendue
Mesure de déplacement à grande échelle	Photogrammétrie	Mesure possible sur des surfaces étendues. S'applique mal en zone arborée ou végétalisée		Mesure étendue
Mesure de déplacement à grande échelle	GPS			

Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte

Suivi vibratoire :
Une réflexion à avoir ?

Idem suivi de nappe,
suivi environnemental.



MINES ET CARRIÈRES SOUTERRAINES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Suivi vibratoire				
Mesure sismique	Accéléromètre / Géophone automatique	La mesure sismique (ou microsismique) permet d'enregistrer les vibrations liées à la fissuration de la roche (libération de contraintes, instabilité) ou à des chutes de bloc (impact au sol). Les capteurs (géophones ou accéléromètres) seront installés soit au fond soit en forage depuis la surface. Il s'agit d'une mesure globale et continue qui permet de surveiller indirectement de grands espaces. L'interprétation des mesures est cruciale, notamment pour exclure les vibrations liées à l'exploitation de la mine ou de la carrière ou issue de l'environnement proche (circulation, travaux, etc.)	Très spécifique	Importante Mesure étendue
Mesure acoustique	Microphone	La mesure acoustique repose sur la même approche que la mesure sismique. L'objet est dans ce cas d'enregistrer les émissions acoustiques provoquées par la fissuration (rarement sonore) mais surtout par les chutes de blocs. Là aussi une clé de l'efficacité de la mesure réside dans la capacité à exclure les bruits parasites. S'agissant de sons audibles, la possibilité d'écouter les mesures facilite grandement le travail.	Très spécifique	Importante Mesure étendue

Chapitre 6 : ex. d'application #1 : église troglodyte



Sujet atypique pour
une cavité
souterraine :
**Comment suivre le
basculement d'une
haute paroi
maçonnée ?**

Consultation d'autres
types d'ouvrage.

IMPACT SUR MITOYENS / SUR OUVRAGES EXISTANTS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déformations				
Mesure de déformations	Points de référence topographique	A ne pas négliger dans le cas d'un rabattement de nappe	Obligatoire dans le cas d'un ouvrage sensible	forte
Mesure d'ouverture de fissure des fissures existantes	Fissuromètres	Positionnement en fonction des indications du référé préventif A ne pas négliger dans le cas de travaux générant des vibrations	Recommandé	faible

ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT EN DÉBLAIS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déplacement et sollicitations de l'écran				
Mesure des déplacements dans les 3 directions	Cibles topographiques	Position à adapter en fonction des déplacements maximaux attendus (tête, ventre, pied)	Obligatoire	forte
Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement	Inclinomètre vertical et/ou horizontal (chaîne inclinométrique en forage)	Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur servant de référence	Recommandé	faible
Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe	Extensomètre		Fonction de la problématique identifiée	Equipement des fissures existantes
Mesure des sollicitations (efforts, contraintes) dans des éléments de structure	Jauge de déformation		Fonction de la problématique identifiée	Fonction de la problématique identifiée

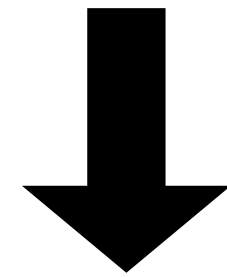
Exemple d'application #2 : ouvrage sur sol compressible

Chapitre 6 : ex. d'application #2 : préchargement de sol compressible

Mise en œuvre d'un remblaiement de 3 à 4 m pour l'aménagement d'une place et de son escalier

Principaux aléas :

- Présence de sols argilo-vasards très compressibles sur 15 à 16 m d'épaisseur (sol normalement consolidé, $\frac{c_c}{1+e_0} = 0,18$ à $0,25$)
- Tassement estimé l'ordre du mètre sous le remblaiement projeté
- Ouvrages proches : chaussées, culée d'ouvrage d'art, canalisation gaz enterrée
- Hauteur maximale de remblai envisageable sans amélioration de sol de 4,5 m environ (pour un préchargement envisagé sur 6 m)



Principaux phénomènes surveillés :

- Tassement (suivi du préchargement)
- Impact sur les ouvrages existants
- Suivi des niveaux de nappe / Surpression interstitielle développée

} Tableau « sols compressibles »

Chapitre 6 : ex. d'application #2 : préchargement de sol compressible



SOLS COMPRESSIBLES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement vertical supérieur à 5 cm (sols compressibles)				
Mesure ponctuelle	Piges topographiques	Bien assurer leur protection au fur et à mesure de la montée du remblai	Obligatoire	forte
Mesure ponctuelle	LIDAR	Solution envisageable pour des surfaces importantes		
Mesure ponctuelle	Tassomètre de surface (hydraulique ou électrique)	Difficulté de mise en œuvre associée à la chasse correcte des bulles d'air dans les tubulures La base de référence doit être située hors de la cuvette de tassement (lecture manuelle ou électrique)	Recommandé	moyenne 3 par profil analysé (axe et bords de remblais)
Mesure longitudinale le long d'un profil	Profilomètre hydraulique	La base de référence doit être située hors de la zone d'influence des remblais	Obligatoire	moyenne
Mesure longitudinale le long d'un profil	Fibre optique	La base de référence doit être située hors de la zone d'influence des remblais	Recommandé dans le cas de remblai sur sols compressibles améliorés	moyenne
Mesure sur un profil vertical (1 bague tous les 3 m maximum)	Tassomètre magnétique en forage	Le positionnement des points de mesure doit être mené dans les faciès intéressés par la déformation		faible

Chapitre 6 : ex. d'application #2 : préchargement de sol compressible

SOLS COMPRESSIBLES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement horizontal				
Mesure des effets G(z)	Inclinomètre vertical de forage		Obligatoire dans le cas d'un risque de poinçonnement des sols d'assise	Fonction des risques de poinçonnement et/ou présence d'avoisinant
Mesure X/Y	Piges topographiques			Fonction des risques de poinçonnement et/ou présence d'avoisinant
Contraintes				
Vérification de la dissipation des pressions interstitielles	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]		Obligatoire dans le cas d'un risque de poinçonnement des sols d'assise	Moyenne à forte
Vérification et suivi des contraintes internes	Capteur de pression totale	Utilisation en présence d'ouvrages enterrés sensibles		faible
Mesure du niveau d'eau	Piézomètre ouvert ou sélectif [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre]	Peut être remplacé par une CPI hors emprise de remblai	Obligatoire	faible



Chapitre 6 : ex. d'application #2 : préchargement de sol compressible

- A. Piges topographiques
- B. Cibles topographiques
- C. Profilomètre
- D1. Capteur de tassement de référence
- D2. Capteur de tassement hydraulique

Schéma
récapitulatif

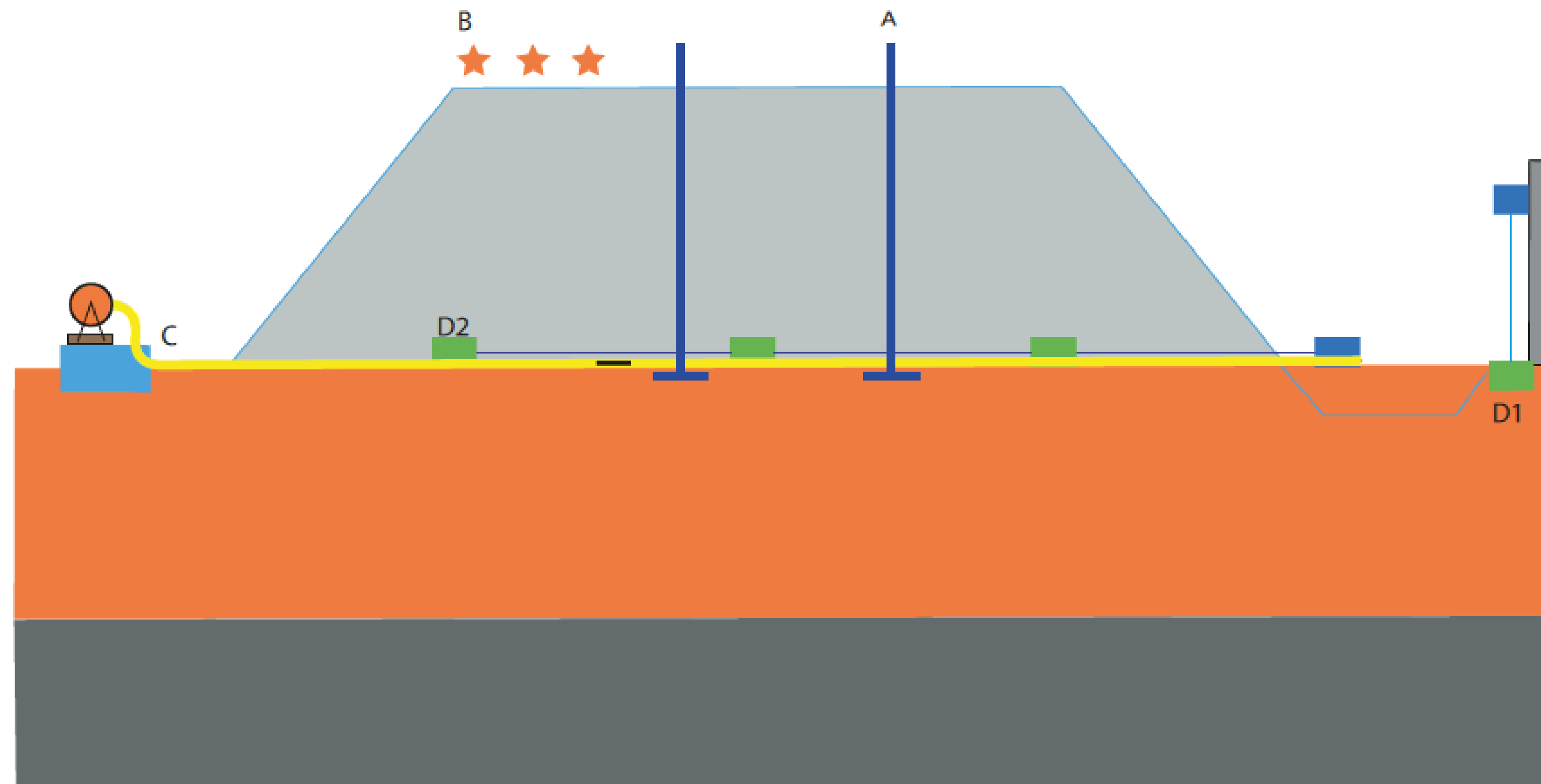


Figure 6.1 - Exemple d'instrumentation d'un remblai sur sol compressible (suivi des tassements)

Chapitre 6 : ex. d'application #2 : préchargement de sol compressible

- A. Piézomètre (ouvert ou sélectif)
- B. Cellule de pression interstitielle
- C. Inclinomètre vertical
- D. Tassomètre multipoint en forage
- E. Extensomètre multipoint

Schéma récapitulatif

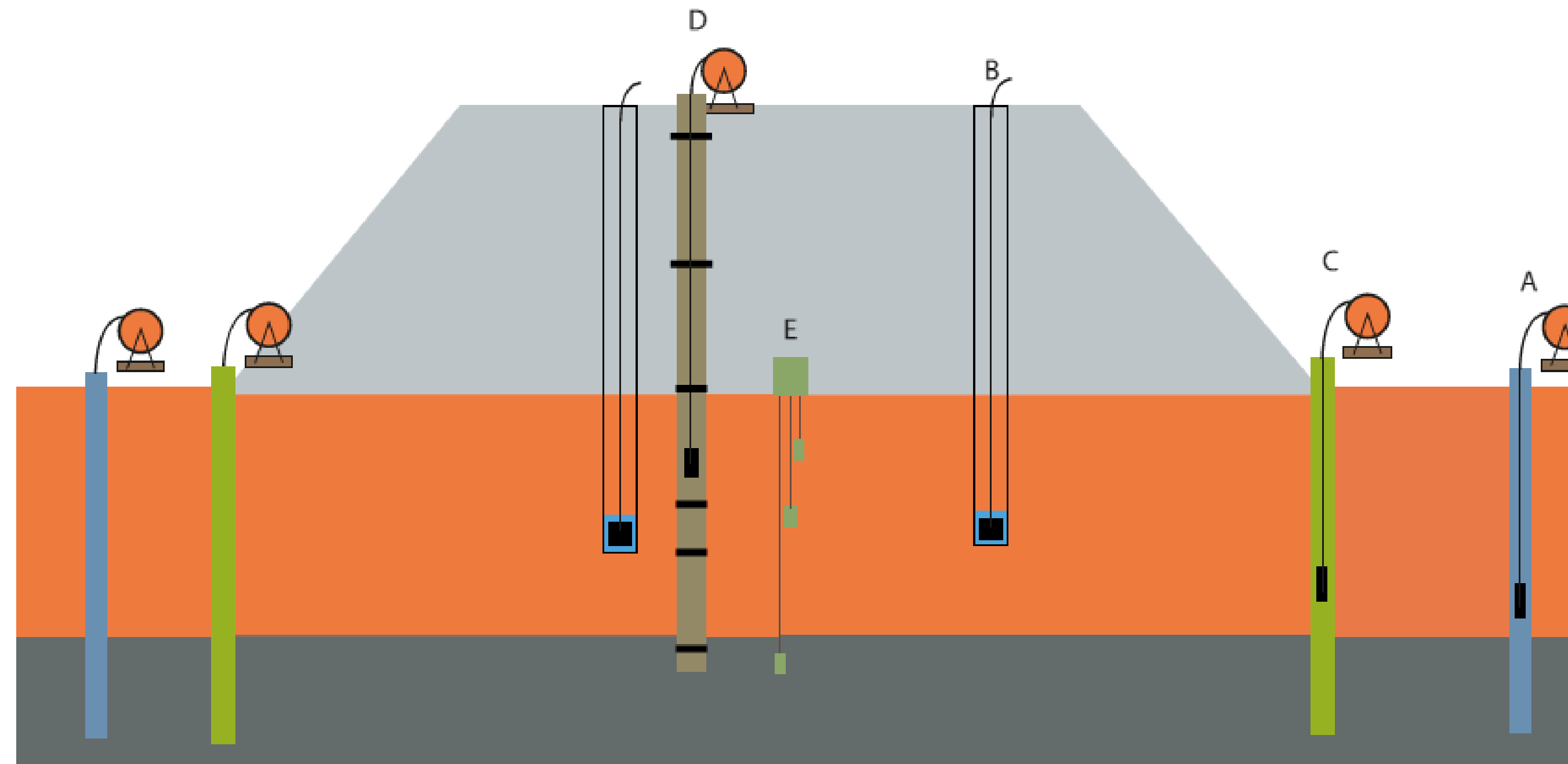


Figure 6.2 - Exemple d'instrumentation d'un remblai sur sol compressible (installation sous remblai)