



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Traitements et améliorations des sols

# TOUR D'HORIZON DES TRAITEMENTS DE TERRAIN

JST DU 05/04/2023

Laheurte Philippe

Journée parrainée par KELLER



# Contexte

## Les trois principales catégories d'amélioration et de renforcement des sols

- Les traitements sans adjuvants
- Les traitements avec adjuvants ou inclusions
- Les traitements par injection

# Les traitements des sols – Plan de la présentation

## Les traitements des sols par injections

- Les injections ciments et chimiques
- Deep Mixing Method (DMM)
- Le jet-grouting
- L'injection solide
- L'injection de résine expansive
- Les méthodes biologiques

## Les traitements des sols par congélation

# Les traitements des sols par injection

## Caractéristiques communes aux différentes techniques d'injection

- Objectif : améliorer les sols en modifiant leurs propriétés mécaniques et hydrauliques pour différentes finalités
- Procédé générique : introduire au moyen de forages un matériau qui se solidifie plus ou moins dans le temps

## Conception et réalisation d'un projet de traitement par injection

- Deux étapes de conception (missions géotechniques G1 – G2 (AVP – PRO - DCE/CT))
- Une étape de réalisation (missions géotechniques G3 pour la phase études et G4 pour la phase suivi)
- La phase de conception permet de faire le meilleur choix technico-économique tout en maîtrisant les risques géotechniques
- La mission G4 est très importante et indispensable dans le cadre des travaux de traitement de sols
- Mission G5 pour l'étude d'un ou plusieurs éléments spécifiques

# Ouvrage de référence : AMSOL



Date de parution : 2018

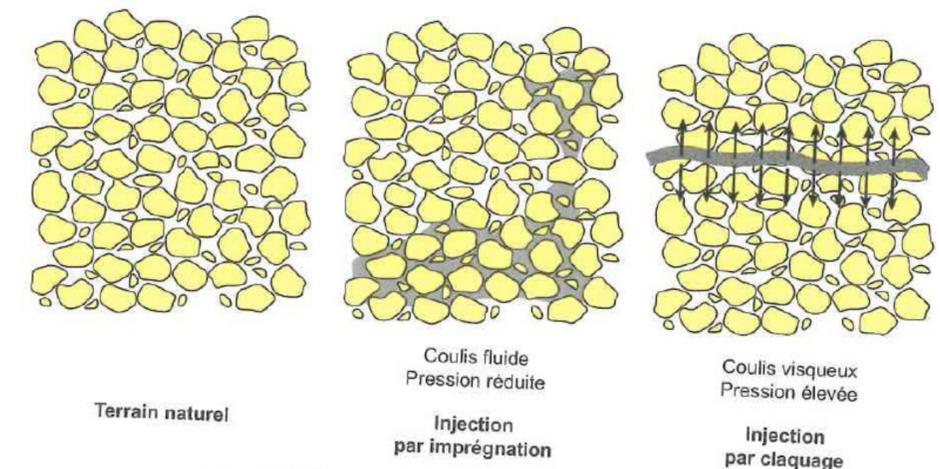
Éditeur : Éditions du Moniteur

Collection : Expertise technique

# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques

- L'injection des sols est une technique d'amélioration destinée à modifier les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols
- Un coulis plus ou moins visqueux est introduit sous pression dans les vides du sol
- Les résultats attendus sont :
  - la diminution de la perméabilité pour augmenter l'étanchéité des terrains
  - (et/ou) l'augmentation des caractéristiques mécaniques du sol initial
- Deux modes d'injection, selon NF EN 12715 :
  - l'injection sans déplacement du sol, par imprégnation
  - L'injection avec déplacements de terrain par fracturation hydraulique
- Deux catégories principales de coulis :
  - les coulis à base de liants hydrauliques en suspension
  - les coulis à base de produits chimiques en solution

(Source : 2018 , AMSOL)



# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques

➤ L'injection des sols est une technique d'amélioration destinée à modifier les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols

➤ Un coulis plus ou moins visqueux est introduit sous pression dans les vides du sol

➤ Les résultats attendus sont :

- la diminution de la perméabilité pour augmenter l'étanchéité des terrains
- (et/ou) l'augmentation des caractéristiques mécaniques du sol initial

➤ Deux modes d'injection, selon NF EN 12715 :

- l'injection sans déplacement du sol, par imprégnation
- L'injection avec déplacements de terrain par fracturation hydraulique

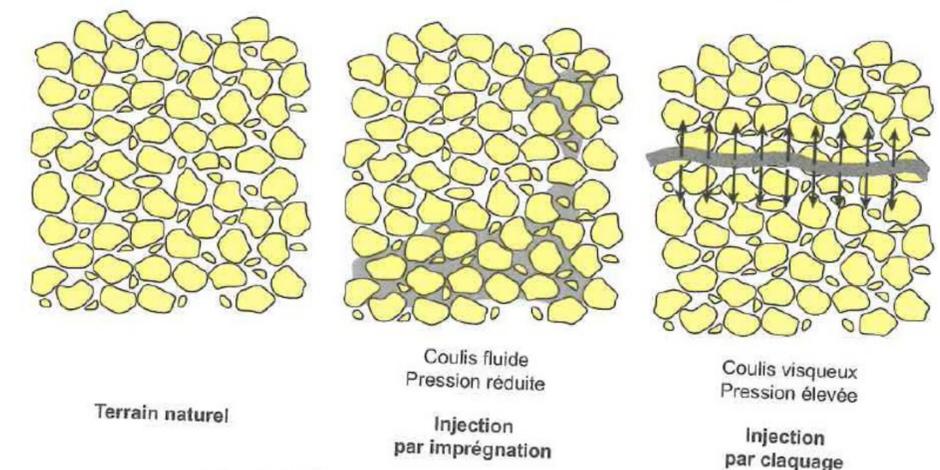
➤ Deux catégories principales de coulis :

- les coulis à base de liants hydrauliques en suspension
- les coulis à base de produits chimiques en solution



Le choix est fonction de la taille des pores et des contraintes géostatiques en place

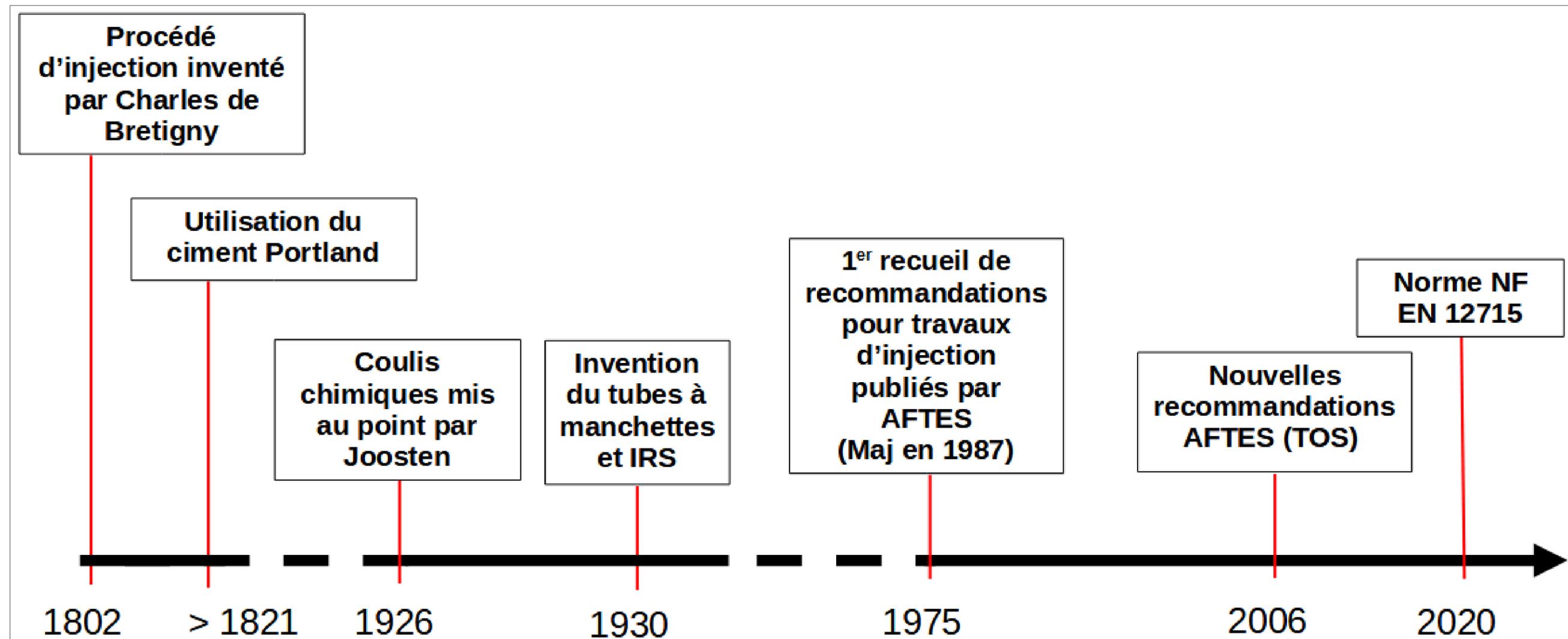
(Source : 2018, AMSOL)



# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques

➤ Milieux naturels concernés : sables et graviers, alluvions, roches fissurées

➤ Procédé inventé au 19<sup>e</sup> siècle et largement développé au 20<sup>e</sup> siècle



# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques

## ➤ Applications principales, avantages et limites de la technique

Travaux d'étanchéité	Travaux de renforcement / d'amélioration mécanique
Voile de barrage	Traversée de terrains difficiles
Radiers injectés	Amélioration de la capacité portante des sols
Tunnels en terrains meubles	Traitement de masse au-dessus des voûtes des ouvrages souterrains
Jupes injectés accessoirement	Injection à l'avancement lors du percement de tunnels
	Injection avant creusement de puits
	Réhabilitation d'ouvrages de GC, de fondations, régénération de maçonneries

<b>Avantages</b>	Diminution de la perméabilité
	Augmentation de la cohésion
	Limite les risques d'instabilité pour optimiser les méthodes d'excavation
	Réduit les débits d'exhaure en fond de fouille
	Reprise en sous-oeuvre de fondations superficielles ou profondes
<b>Limites</b>	Coût des produits chimiques, restriction induites par la réglementation environnementale

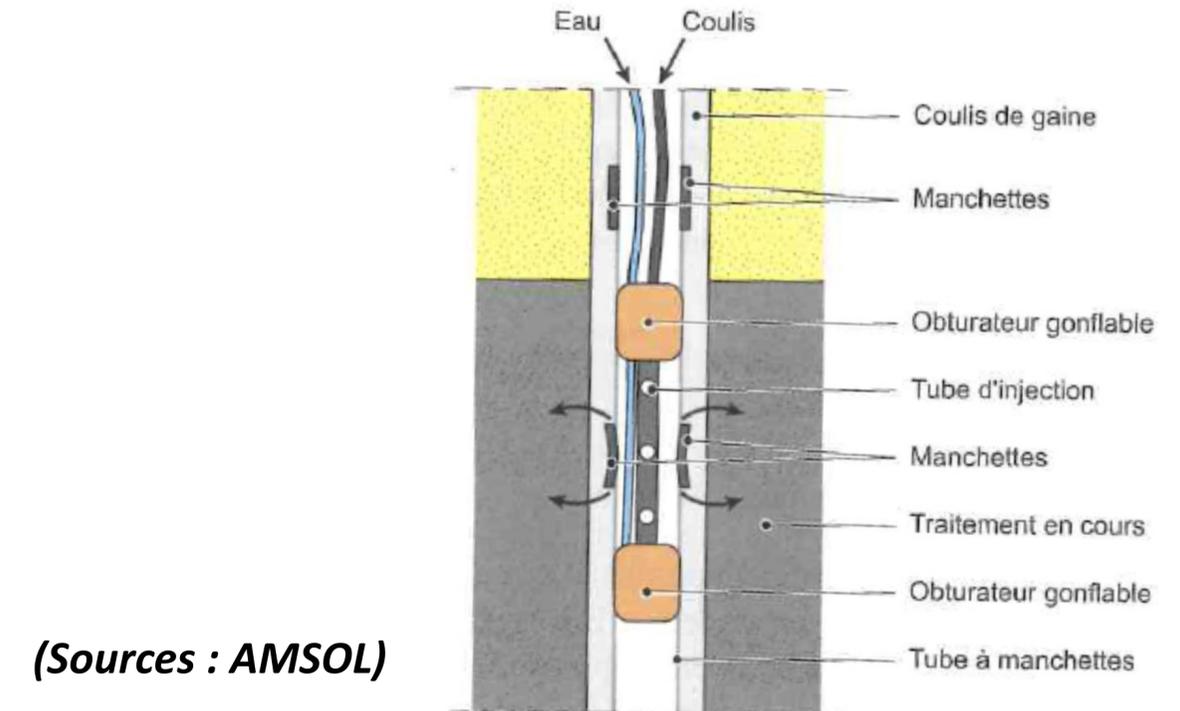
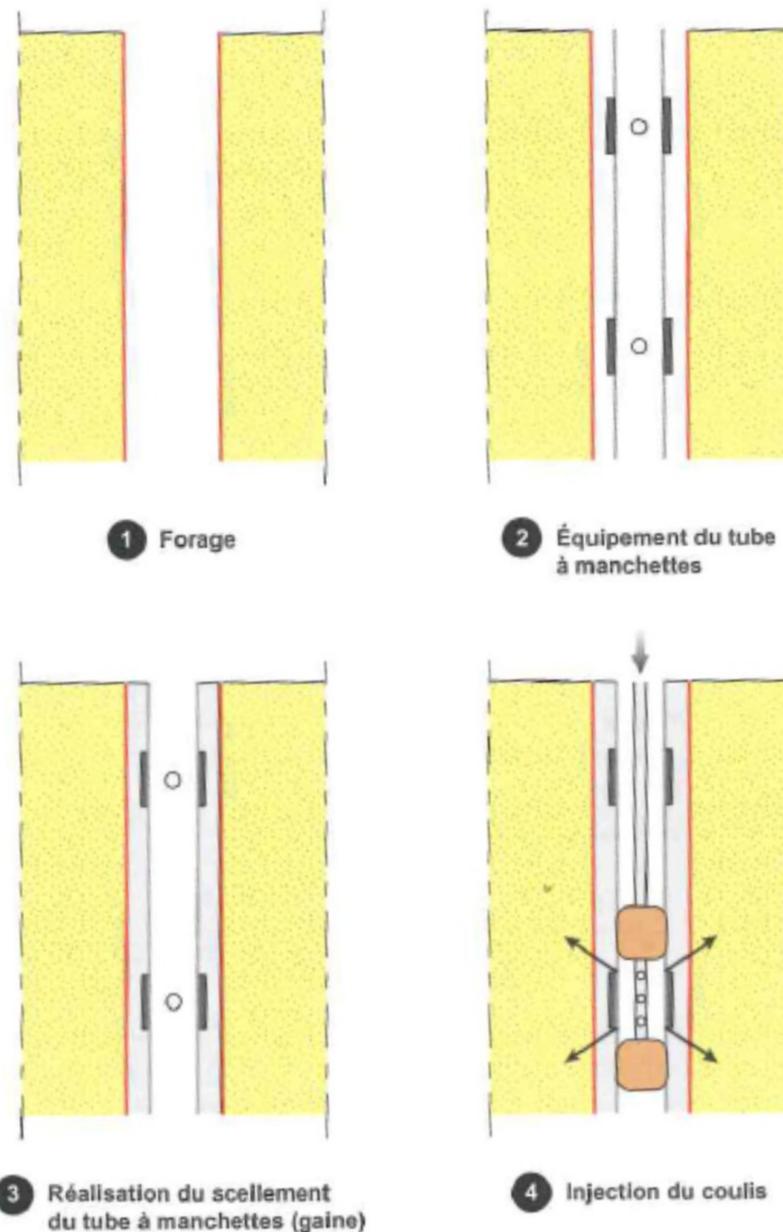
# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques



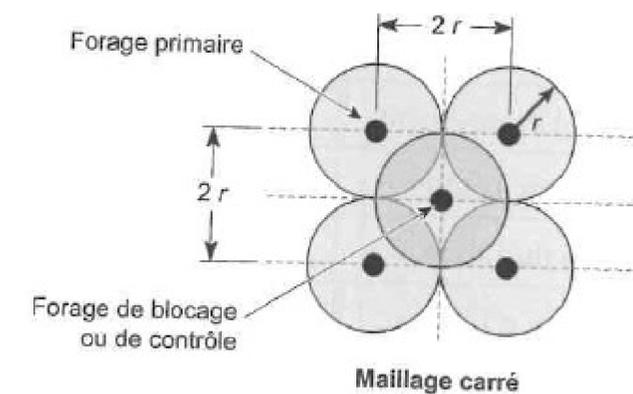
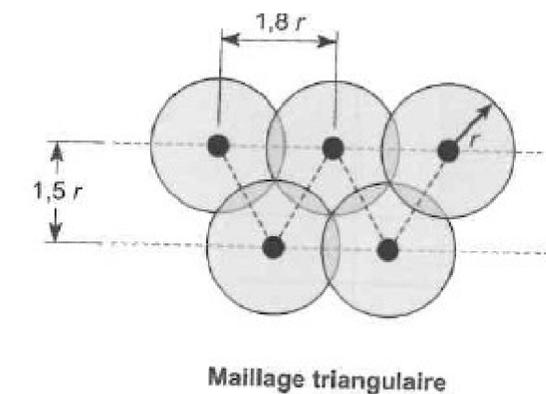
Coulis de ciment



Gel de silicate



(Sources : AMSOL)



# Les traitements des sols par injection : les injections ciments et chimiques

**Ligne de forages**



**TAM**

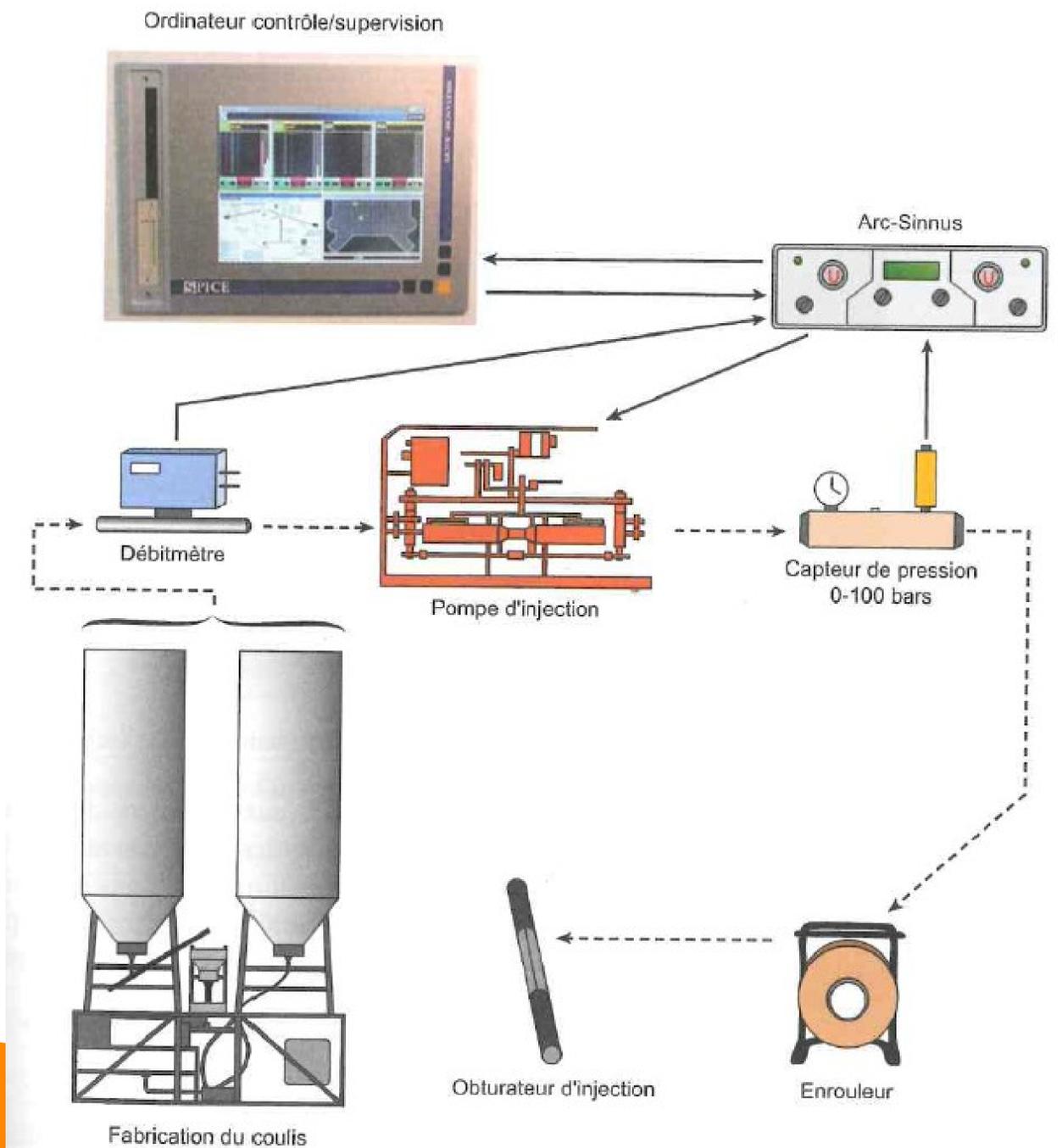


**obturateur**



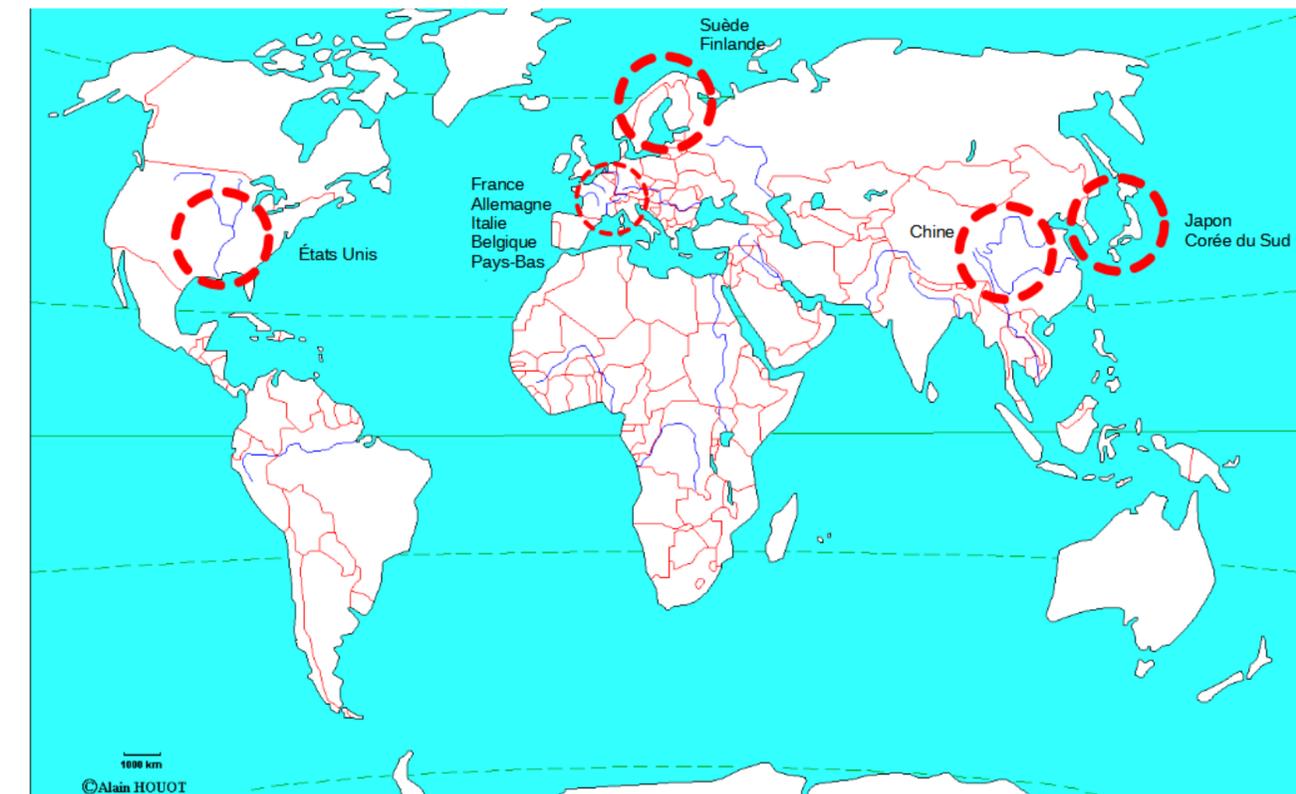
TOUR D'HORIZON  
JST DU CFMS -

**Suivi informatique des injections (source : AMSOL – Soletanche Bachy)**



# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

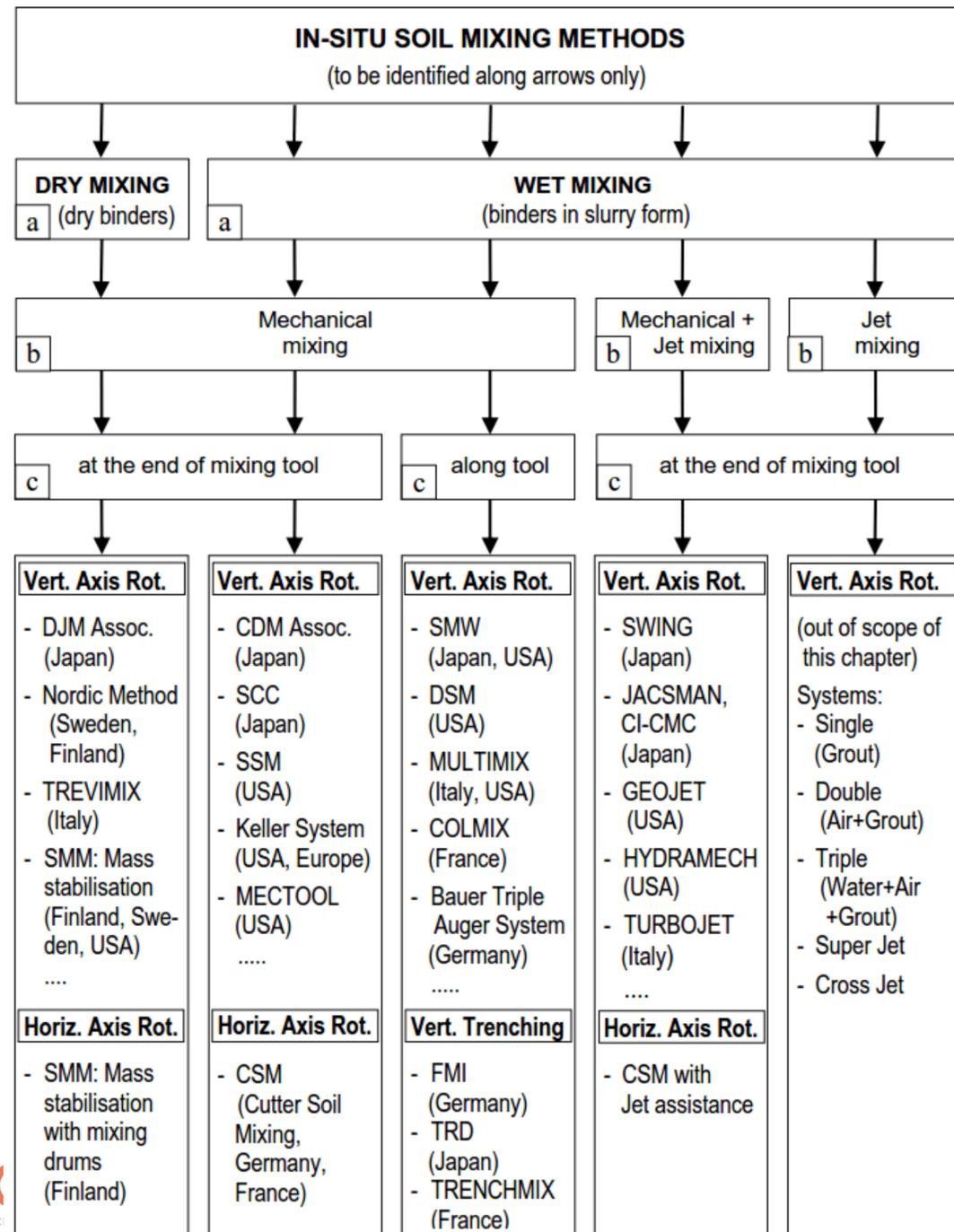
- DMM = technique du mélange profond
- Principe : malaxer en profondeur le sol en place, avec l'incorporation d'un liant hydraulique pour former un nouveau matériau, le « soilmix »
- Objectif : améliorer les caractéristiques du sol
- Technique apparue dans les années 1960 au Japon et en Suède
- Milieux naturels concernés : argiles molles, sols organiques, sables, graviers, alluvions
- Travaux terrestres et maritimes
- Deux méthodes, selon le mode d'incorporation du liant dans le mélange en place :
  - méthode par voie sèche avec un liant non hydraté
  - méthode par voie humide avec un coulis
- Plusieurs technologies d'exécution, classés selon trois caractéristiques fondamentales :
  - méthode par voie sèche, par voie humide
  - type de malaxage : mécanique, mécanique en jet, jet seul
  - emplacement de l'injection du liant : à l'extrémité ou le long de l'outil



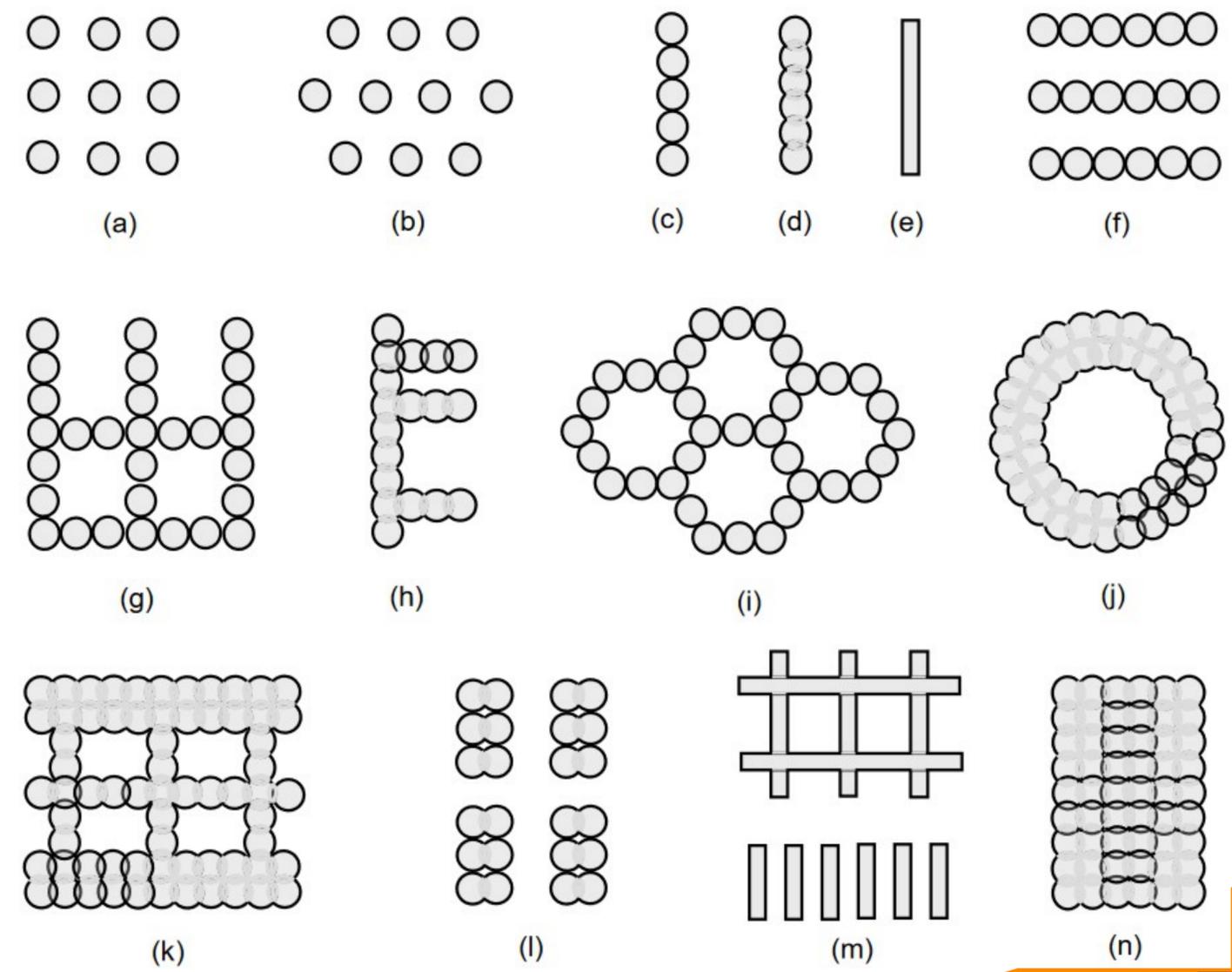
*Principaux pays utilisateurs de la technique DMM*

# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

## Classification des techniques de DMM



## Confection de colonnes, de barrettes, d'écrans, de réseaux, d'anneaux, de blocs



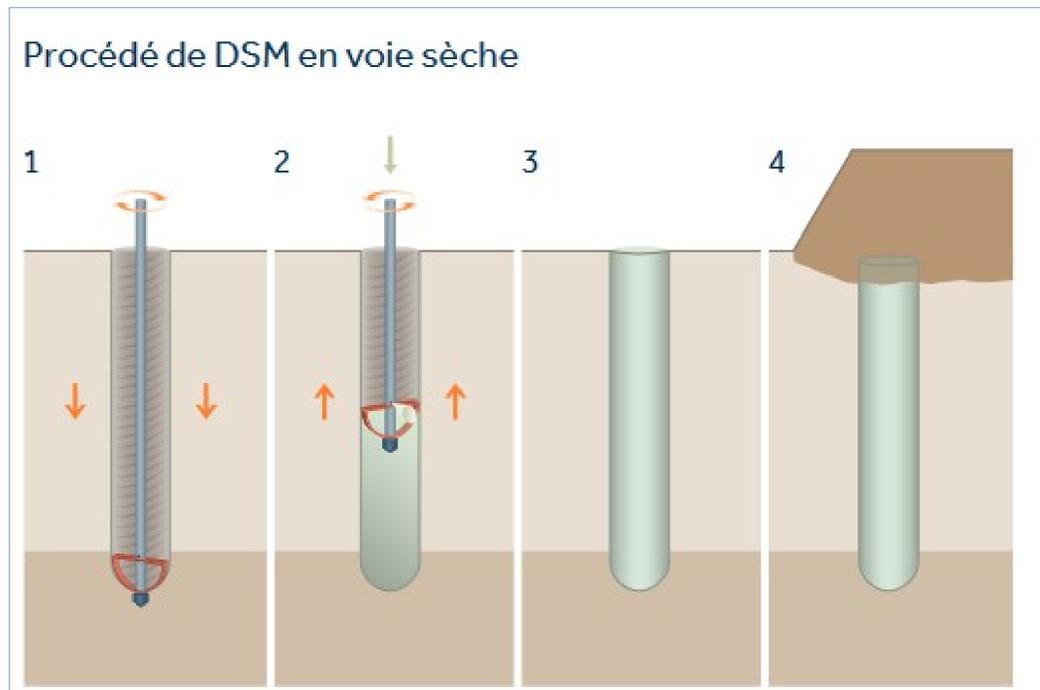
(Sources :  
Topolnicki, 2016)

Examples of deep soil mixing patterns: (a), (b) column-type (square and triangular arrangement), (c) tangent wall, (d) overlapped wall, (e) trench/CSM wall, (f) tangent walls, (g) tangent grid, (h) overlapped wall with buttresses, (i) tangent cells, (j) ring, (k) lattice, (l) group columns, (m) multiple trenches/CSM walls, (n) block.



# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

## ➤ Confection de colonnes



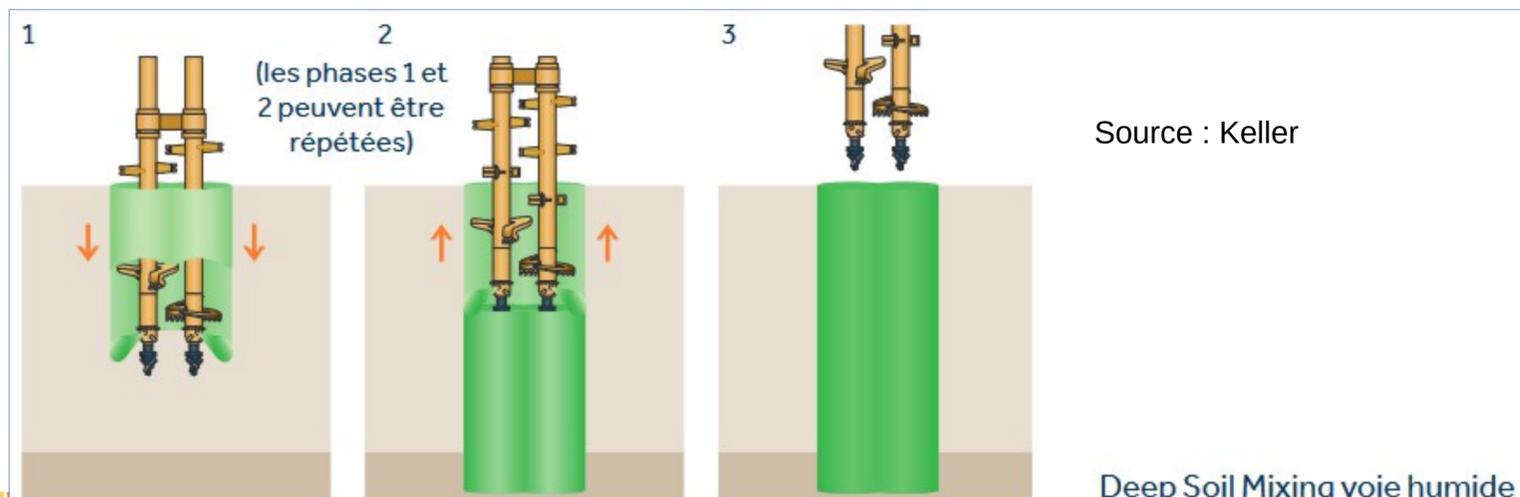
(Sources : Keller)



Argiles

Limons

Sables et graviers



Norme d'exécution des colonnes en sols traités : NF EN 14679 (2005)

# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

## ➤ Confection de colonnes



(Sources : Topolnicki, 2016)

Norme d'exécution des colonnes en sols traités : NF EN 14679 (2005)

Outils mécaniques à axe vertical

# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

➤ Confection de panneaux pour parois, barrettes (Cutter Soil Mixing, Bauer)

➤ Confection de tranchées continues (Trenchmix®, Soletanche Bachy)



Outils mécaniques à axe horizontale, voie humide

(Sources : Topolnicki, 2016)

Vertical trenching

# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

De multiples applications

Travaux terrestres	Travaux maritimes
Fondations, murs de soutènement	Structures portuaires
Écrans et barrières de faible perméabilité (barrages, digues)	Extensions de zones littorales vers la mer
Entrée et sortie de tunnelier	Stabilisation de parois de tunnel
Radier injecté	Augmentation de la portance de fondations semi-profondes à profondes
Reprises en sous-œuvre	Extensions géométriques de fondations
Blindage de fouille	Parois de soutènement, puits circulaires
Stabilisation de pentes	
Diminution du potentiel de liquéfaction	
Réduction de vibrations	
Traitement chimique in-situ de contaminants, traitement de déchets	
Confinement de sols pollués	

# Les traitements des sols par injection : la DMM (*Deep Mixing Method*)

## Avantages et limites des méthodes DM

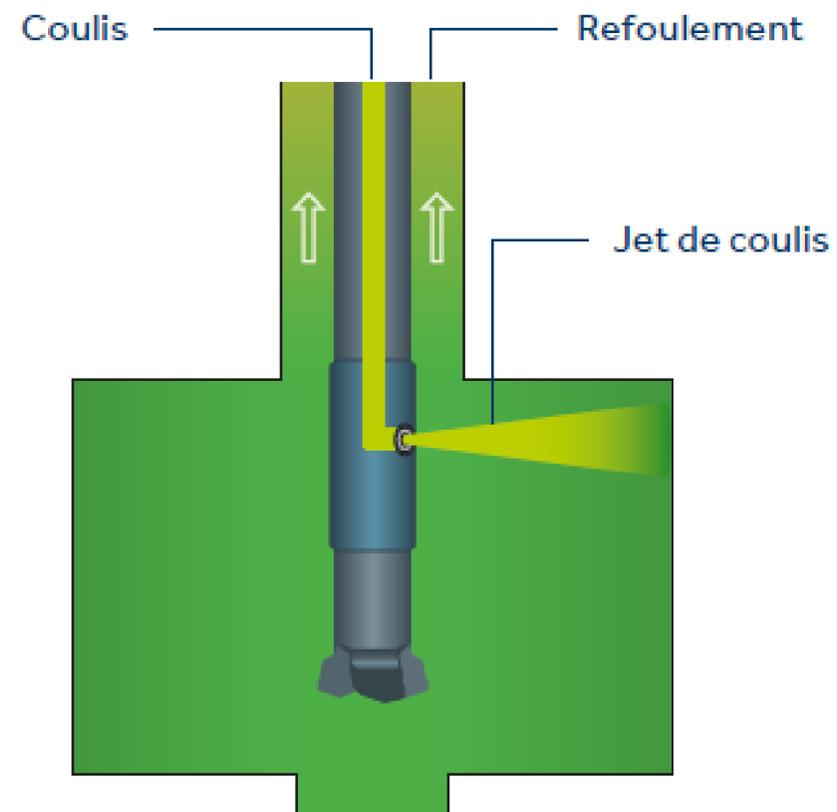
<b>Avantages</b>	Méthode compétitive / technologies plus conventionnelles, en particulier pour les ouvrages provisoires
	Permet de créer une grande variété d'ouvrages
	Applicable à tous types de sols
	Pas d'excavation (intérêt pour sols pollués)
	Bonne empreinte environnementale
<b>Limites</b>	Sols raides et denses, présence de blocs
	Rejets avec terrains imperméables
	Difficile pour traitement localisé de couches molles intercalaires (Jet ou injection solide)
	Disposer de plateformes avec portance suffisante pour le chantier
	Traitement au contact d'ouvrages existants
	Hétérogénéité du mélange sol-ciment (présence de nodules)
	Consommation de liant proportionnelle à l'état lâche des sols (coût de revient)

# Les traitements des sols par injection : le jet-grouting

- **Principe** : le jet-grouting fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes physiques :
  - destructuration du terrain par un jet à haute énergie cinétique sous des pressions > 20 MPa ;
  - extraction d'une partie du terrain jusqu'à la surface par les fluides de *jetting* ;
  - incorporation au terrain déstructuré d'un liant apporté par le coulis pour former des colonnes.
- **Objectif** : améliorer les caractéristiques de sols, étanchement , construction de certaines structures
- Technique apparue en 1954 dans le domaine pétrolier pour renforcer les parois d'un forage profond
- Milieux naturels concernés : sols fins, sols grossiers
- Norme d'exécution : NF EN 12716 de décembre 2018
- Techniques par simple jet, double jet, triple jet
- Le choix du système à employer et des paramètres à utiliser se fait en fonction :
  - de la nature et des caractéristiques géotechniques du sol à traiter
  - du rayon d'action du jet nécessaire pour atteindre la dimension des éléments à réaliser
  - des caractéristiques mécaniques demandées pour le sol traité
  - des contraintes du site

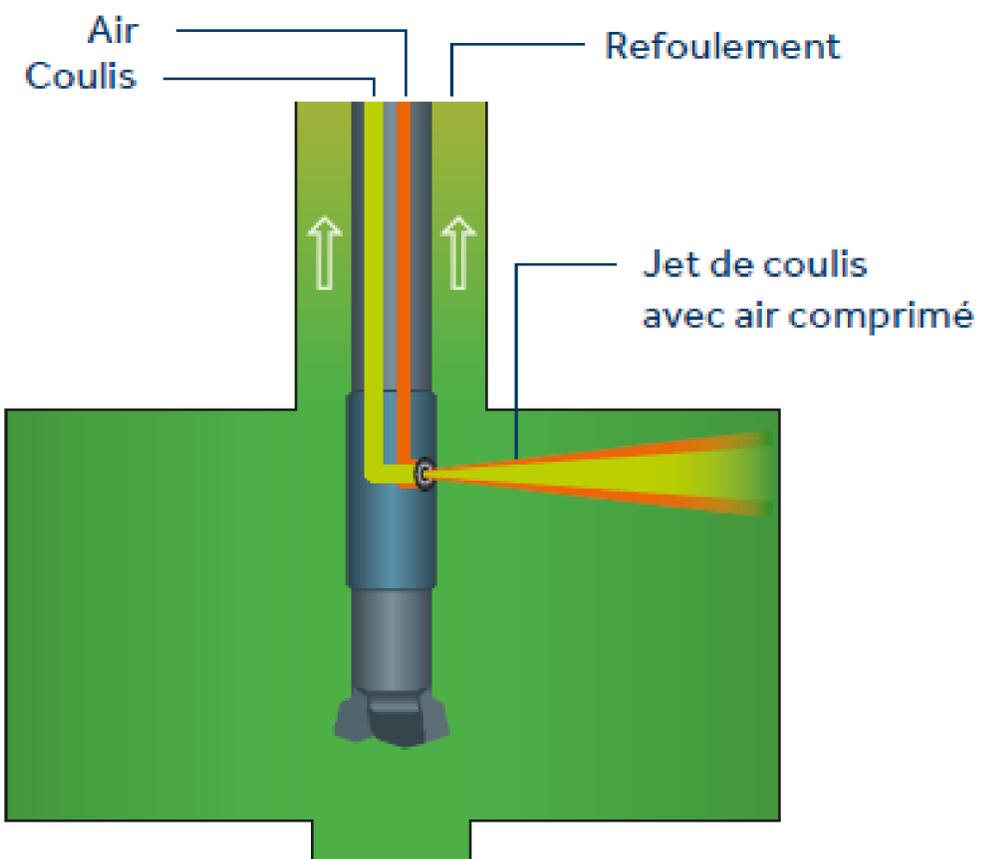
# Les traitements des sols par injection : le jet-grouting

## ➤ Jet simple, coulis



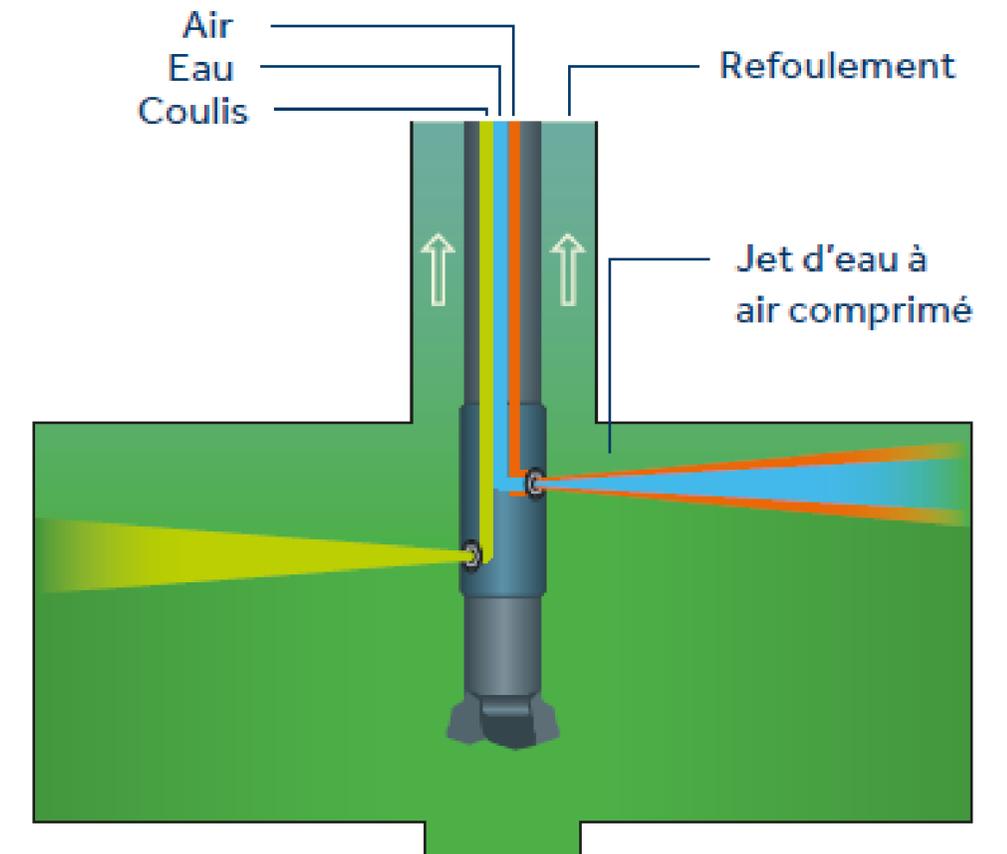
→ Colonne de taille petite à moyenne

## ➤ Jet double, air + coulis



→ Colonne de taille moyenne à grande

## ➤ Jet triple, coulis et air + eau

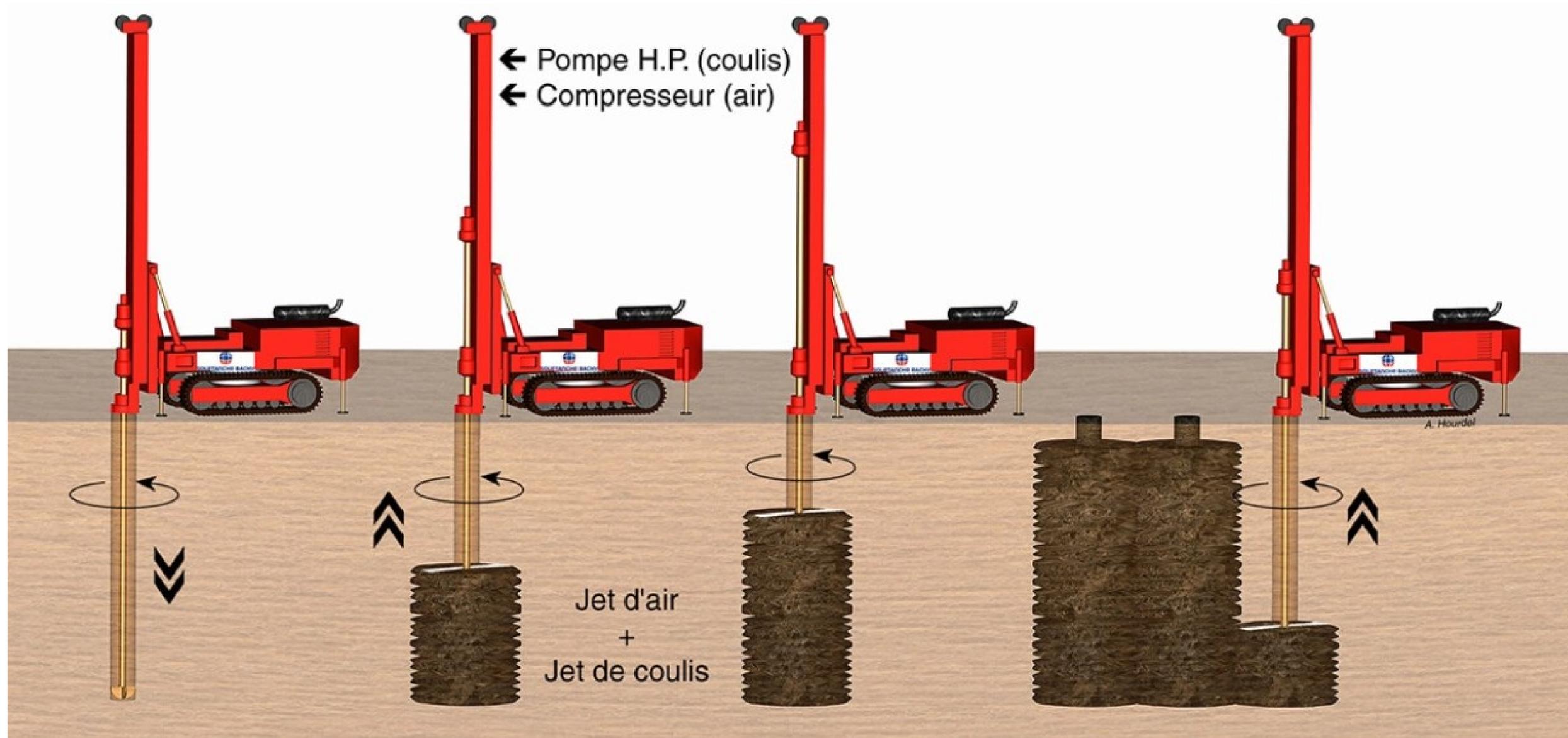


→ Traitement des sols cohésifs

(Sources : Keller)

# Les traitements des sols par injection : le jet-grouting

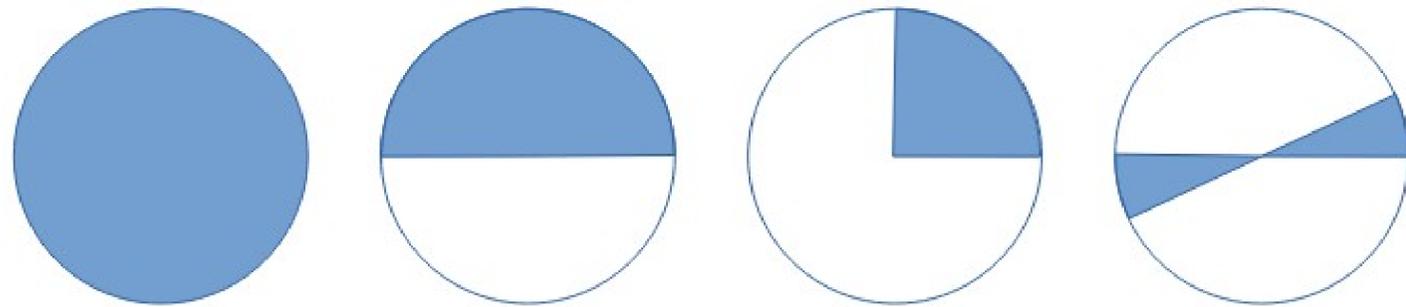
## Exemple d'exécution



(Source : Soletanche Bachy)

# Les traitements des sols par injection : le jet-grouting

➤ Possibilité de réaliser des colonnes pleines, partielles, des lamelles, des panneaux (selon le mouvement du train de tiges, le nombre de buses utilisées)

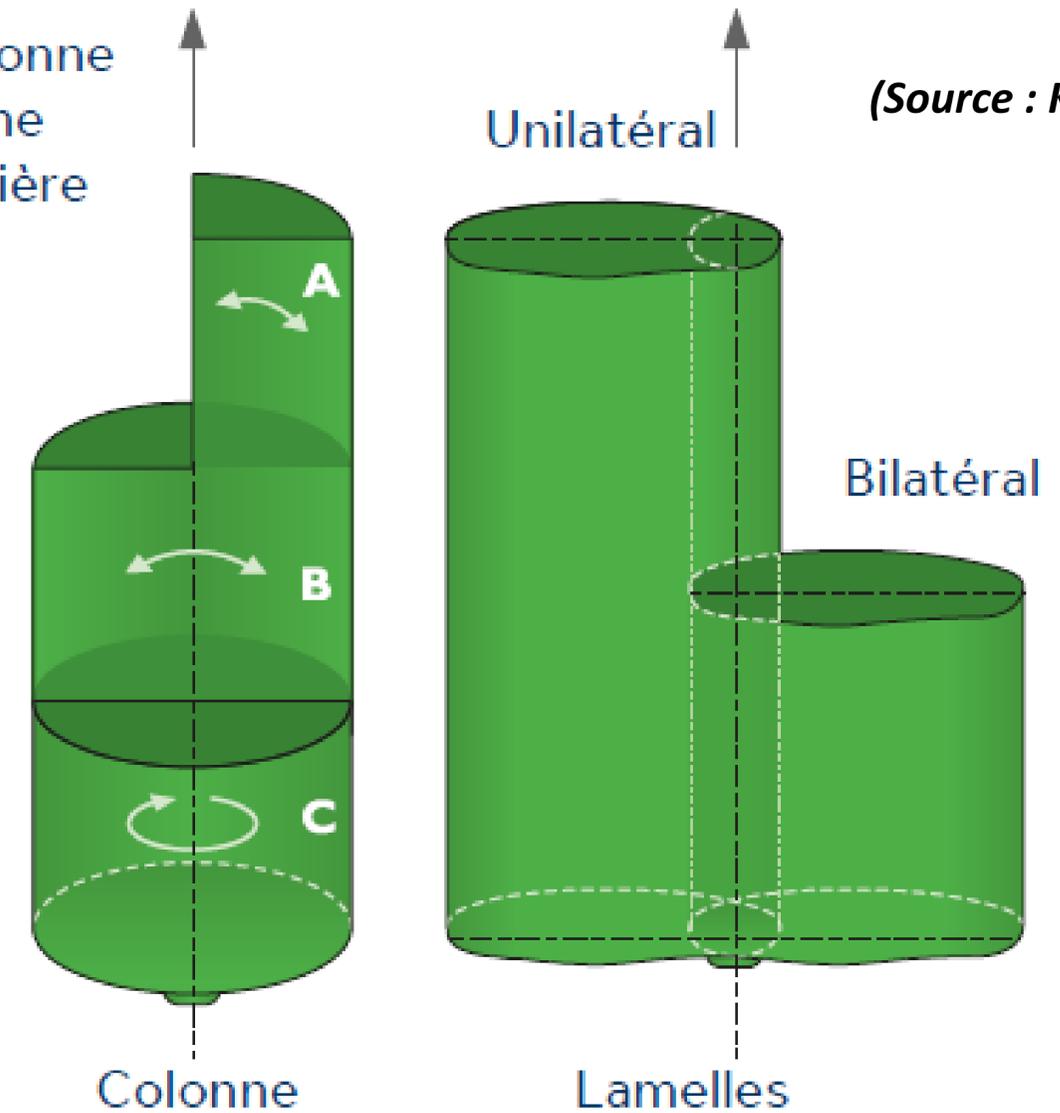


Colonne pleine, 1/2 colonne, 1/4 colonne, lamelles



(Source : Taehwa)

A = Quart de colonne  
B = Demi-colonne  
C = Colonne entière



(Source : Keller)

# Les traitements des sols par injection : le jet-grouting

## Applications principales, avantages et limites de la technique

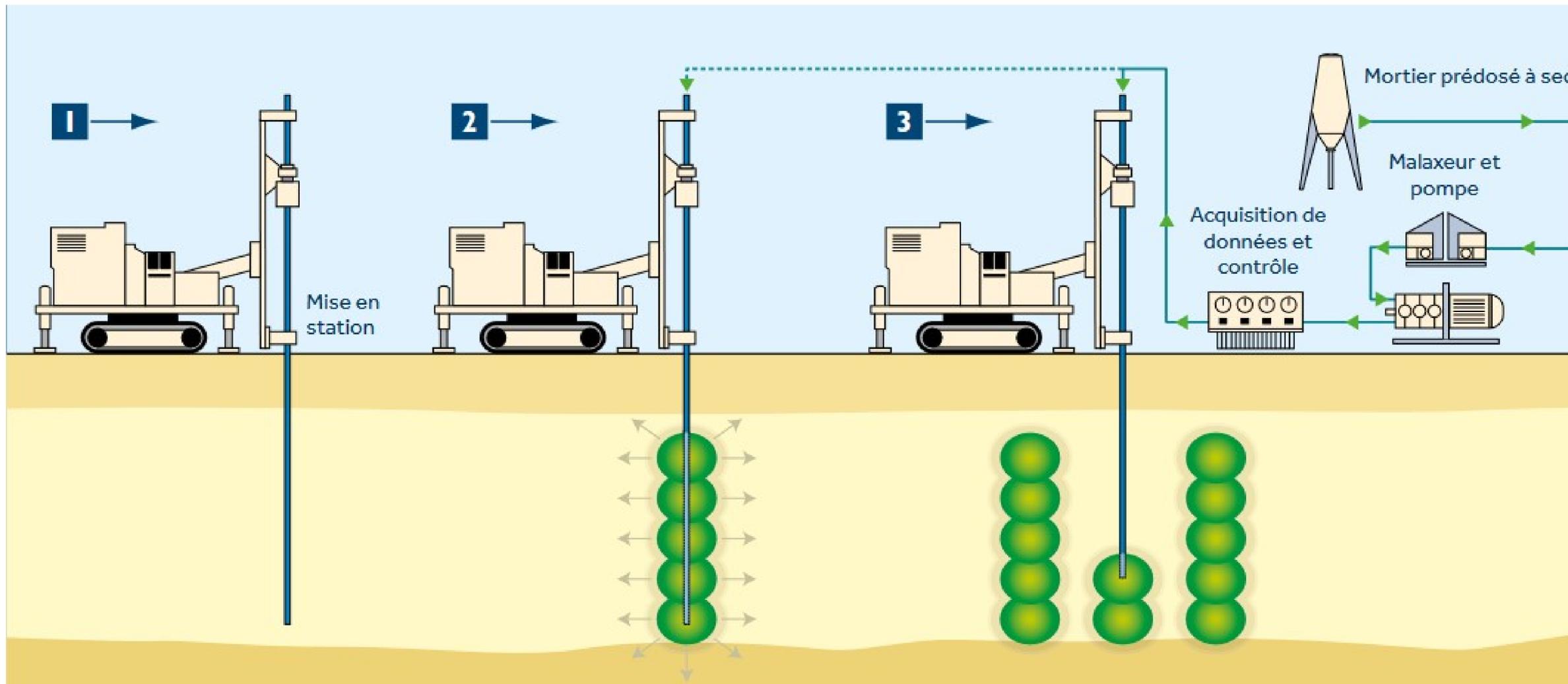
Travaux d'étanchéité	Stabilisation
Voile d'étanchéité	Reprise en sous-oeuvre de fondations
Bouchon étanche	Blocs de démarrage ou d'arrivée de tunnel
Bouchon en voûte	Stabilisation de parois de tunnel
Noyau d'étanchéité de digue	Augmentation de la portance de fondations semi-profondes à profondes
Étanchéité de joints ou de vides entre deux structures	Extensions géométriques de fondations
Étanchéité de parois de pieux disjoints	Parois de soutènement, puits circulaires

<b>Avantages</b>	Applicable pour tout type de sols
	Amélioration de couche molle ou lâche intercalaire sans déstructurer les terrains sus-jacents
	Faible encombrement des machines
<b>Limites</b>	Gestion des rejets (tranchées, bacs de récupération)
	Installation de chantier (emprise)
	→ Coût de revient

# Les traitements des sols par injection : l'injection solide

- **Principe** : incorporer dans le sol sous haute pression un mortier mi-sec, sans imprégner ni claquer le terrain
- **Objectifs** : permet de densifier un terrain en place à différentes profondeurs
  - améliorer les caractéristiques mécaniques du sol en place par compactage
  - le renforcer par la présence de colonnes ainsi constituées
  - constituer un élément de fondation profonde pour la reprises en sous-œuvre de fondations superficielles / semi-profondes.
- **Autres désignations** : compactage par injection solide, compactage statique horizontal
- **Développé par Keller** au début des années 50 aux États-Unis (Californie)
- **Milieus naturels concernés** : sols lâches, sols granulaires au-dessus ou sous la nappe, sols fins non saturés (sous conditions), sols effondrables (tels les loess)
- **Technique couverte par la norme NF EN 12715**

# Les traitements des sols par injection : l'injection solide



*Mortier de faible Slump < 10*

*(Sources : Keller)*

# Les traitements des sols par injection : l'injection solide

## Principaux domaines d'applications

Amélioration des sols	Reprise en sous-œuvre
Amélioration de sols en profondeur	Reprise en sous-œuvre de fondations superficielles ou semi-profondes
Fondations de différents types d'ouvrages	Relèvement d'immeubles
Traitement des sols à l'avancement des tunneliers	
Réduction du potentiel de liquéfaction	
Comblement de vides (milieux anthropiques et naturels)	

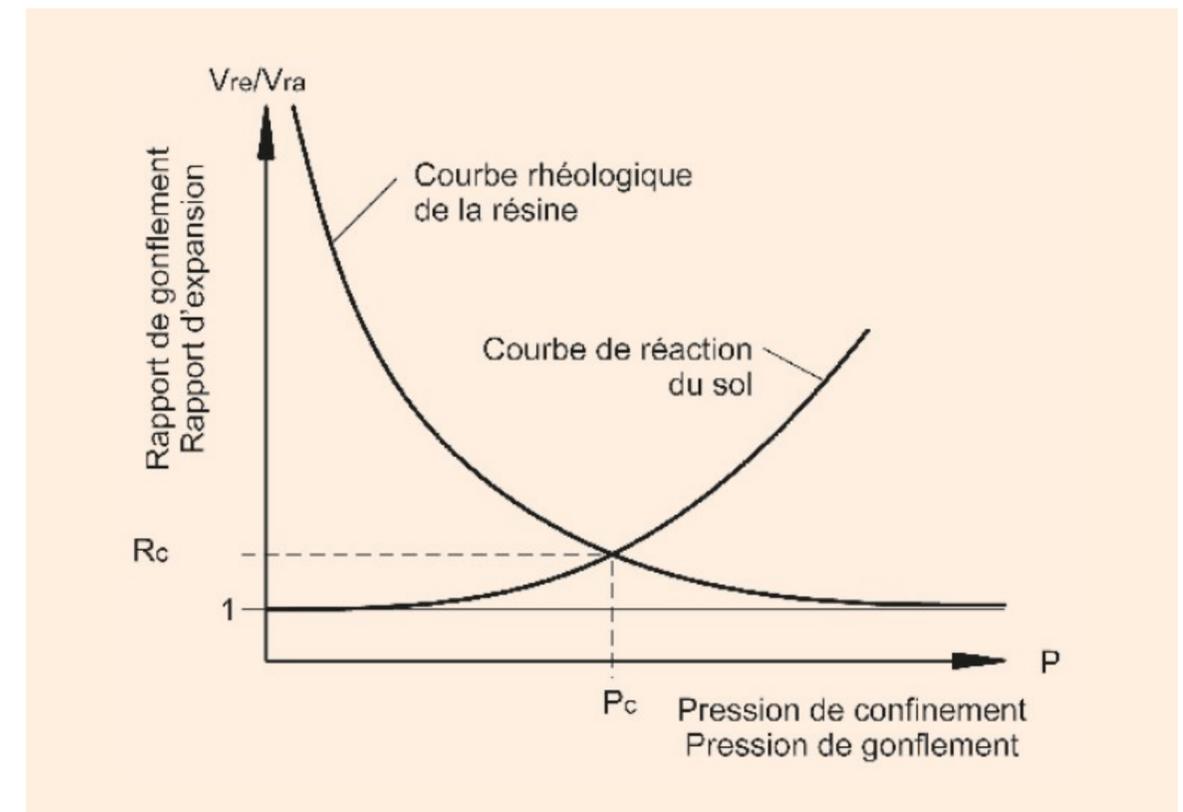
# Les traitements des sols par injection : l'injection solide

## Avantages et limites de l'injection solide

<b>Avantages</b>	Maîtrise de la localisation du traitement (couches lâches) même à grande profondeur
	Bonne maîtrise des volumes injectés et de leurs positionnements, comparativement à l'injection par impregnation
	Homogénéise des terrains hétérogènes
	Technique qui s'autorégule (pression et quantité de mortier injecté varient suivant la compacité du terrain)
	Pas de rejets ni de déblais (refoulement des sols)
	→ Respect de l'environnement
	Permet d'élaborer des réseaux d'inclusions semi-rigides à rigides
Adaptabilité du matériel aux contraintes d'exécution	
<b>Limites</b>	Si sols lâches sous nappes, risques de mettre l'eau en surpression et provoquer des soulèvements
	Assurer le confinement du sol par une couverture superficielle si fortes pressions d'injection

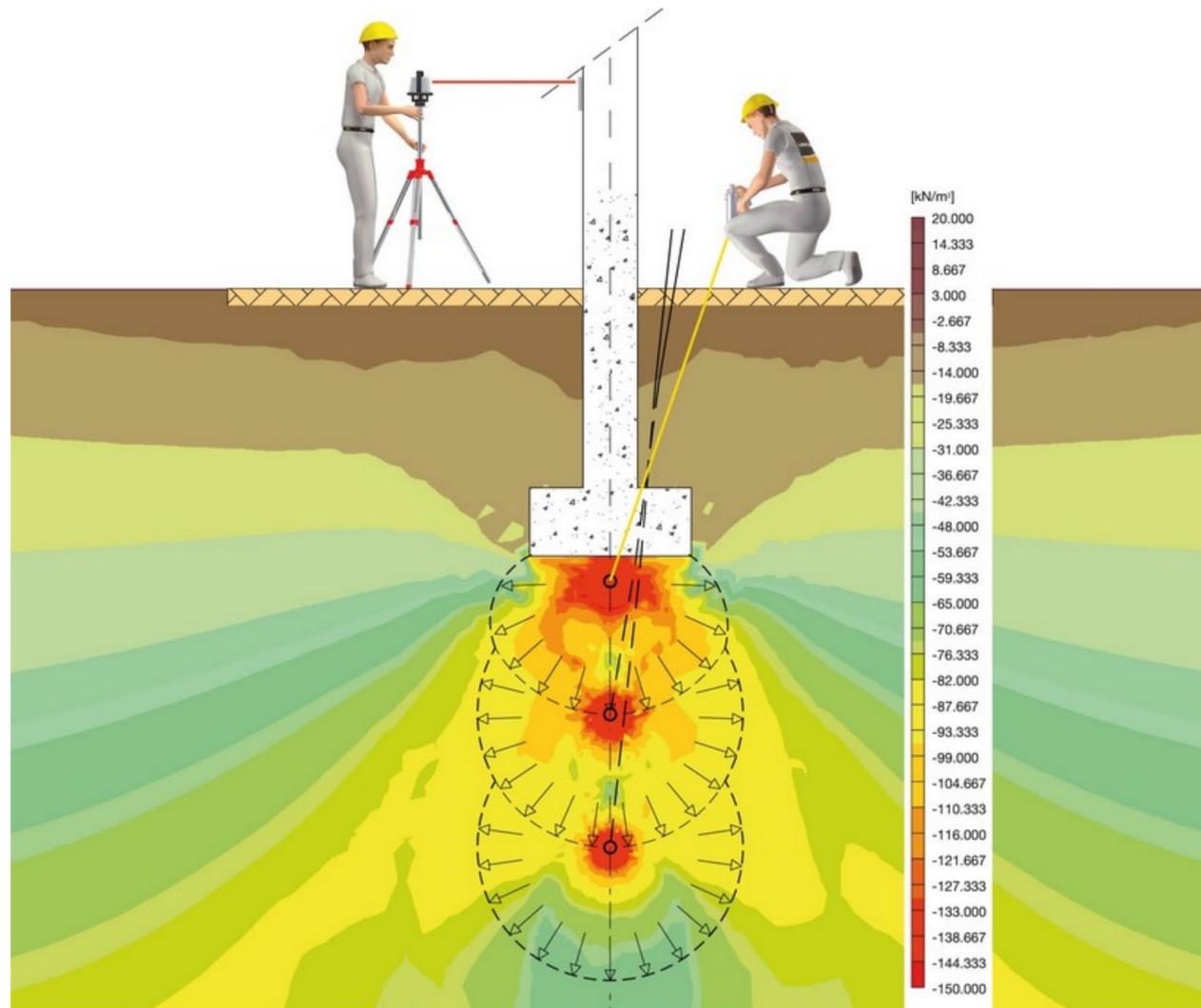
# Les traitements des sols par injection : l'injection de résine expansive

- **Principe** : injecter au sein des sols d'assise d'un ouvrage une résine à très forte capacité d'expansion (résine PU la plus usitée)
- **Objectifs** : améliorer les propriétés géotechniques et hydraulique des sols d'assise
- **Domaines d'application** :
  - amélioration des caractéristiques mécaniques
  - réduction de la perméabilité
  - traitement des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement
  - relevage des ouvrages (dallages, ouvrages d'infrastructure)
- **Applications récentes en géotechnique (1996, Canteri)**
- **Technique rattachée à NF EN 12715**
- **Milieus naturels concernés : sols fins et sols grossiers**
- **Forages de petits diamètres**
- **Temps de prise de la résine très court**



*Diagramme qualitatif avec courbe rhéologique de la résine et courbe de réaction du sol (source : Urettek)*

# Les traitements des sols par injection : l'injection de résine expansive



*(Sources : Uretek)*



**Expansion des les sols grossiers  
(conglomérats)**



**Expansion des les sols fins  
(réseaux lamellaires)**

# Les traitements des sols par injection : l'injection de résine expansive

## ➤ Avantages et limites de la technique

<b>Avantages</b>	Adaptée à une gamme relativement étendue de sols (graves, sables, limons, argiles, remblais...)
	Petites installations de chantier, logistique mobile légère
	Exécution souple, durcissement très rapide de la résine
	Contrôle rapide possible (essais au Pénétrömètre dynamique)
	Peu ou pas de pertes d'exploitation
	Coûts compétitifs
<b>Limites</b>	Profondeur de traitement (environ 15 m)
	Pas adaptée aux sols organiques ( $MO > 10\%$ ), aux argiles très plastiques ( $I_p > 40$ )
	Pas adaptée aux sols gelés
	Pour les sols fins, la contrainte du sol doit rester inférieure à la pression de gonflement maximale de la résine

# Les traitements des sols par injection : les méthodes biologiques

- Techniques très récentes (> 2005), nouveaux procédés d'injection des sols
- Le sol n'est plus considéré comme matériau inerte, mais comme un écosystème vivant : le biosol
- Objectifs : augmenter la résistance au cisaillement et/ou diminuer l'indice des vides, le degré de saturation
- Quatre procédés faisant l'objet d'applications, de recherche et développement :
  - la biocalcification, qui fait appel à la précipitation de carbonate de calcium par des bactéries
  - le biofilm formé par des polymères organiques, entourant les grains du sol
  - les biogaz expulsant l'eau des sols saturés
  - l'amélioration des argiles marines par des vers marins
- Deux stratégies développées pour augmenter le nombre de bactéries dans le sol :
  - apport de bactéries externes (cas pour la biocalcification)
  - stimulation de bactéries déjà présentes

# Les traitements des sols par injection : les méthodes biologiques – la biocalcification

- La biocalcification : procédé qui consiste à utiliser l'activité bactérienne pour précipiter du carbonate de calcium sous forme de calcite sur des grains de sol, formant des ponts entre eux, et créant ainsi un nouveau matériau cohérent plus résistant.
- La bactérie micrométrique au cœur du processus est *Sporosarcina pasteurii*
- Une solution nutritive calcifiante (urée + chlorure de calcium) doit être apportée afin que l'activité bactérienne puisse précipiter la calcite
- Le nouveau matériau obtenu en quelques jours est assimilable à un grès
- Le volume poreux du sol n'est pas rempli, pas de modification significative des écoulement souterrains
- Applications principales :
  - traitement anti-liquéfaction pour les sols lâches
  - traitement contre l'érosion interne des digues, levées, ...
  - l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols en général
- L'exécution est similaire aux traitements par injections ciments et chimiques (forages, équipements, etc)



(Source : Biocalcis®, Soletanche Bachy)

# Les traitements des sols par injection : les méthodes biologiques – la biocalcification

## ➤ Avantages et limites de la biocalcification

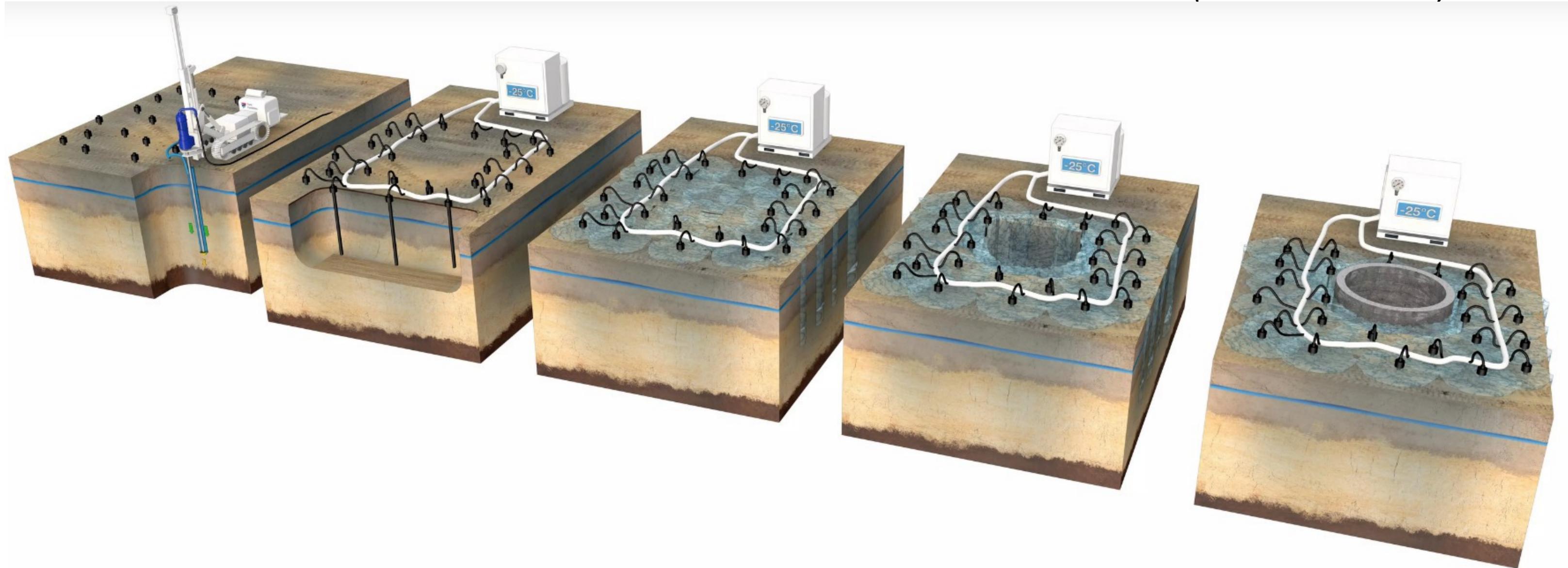
<b>Avantages</b>	Large gamme de granulométries
	Pas de montée en pression des terrains
	Imprégnation sur de longues distances, maillage élargi
	Amélioration très rapide de la cohésion du sol
	Pas de modification substantielle de la perméabilité initiale
	Mise en œuvre rapide, accès aux zones difficiles
	Respect de l'environnement
	Bilan carbone favorable
<b>Limites</b>	Coût de revient

# Les traitements des sols par congélation

- La congélation des sols est une technique de plus en plus utilisée pour assurer un renforcement et une étanchéité lors d'excavations souterraines, galeries ou fouilles urbaines
- Principe : stabilisation à caractère provisoire d'un terrain aquifère ou humide, artificiellement congelé par circulations d'un fluide frigorigène dans des tubes préalablement disposés dans le terrain à traiter
- Méthode employée en Europe depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle
- Suivant la disposition des tubes de congélation, possibilité de créer des blocs congelés de formes quelconques
- Le fluide utilisé peut être :
  - de l'azote
  - de la saumure, solution saline aqueuse (chlorure de calcium / sodium / magnésium)
  - une combinaison des deux
- Exemples d'application :
  - fouilles complexes dans des environnements et des situations difficilement accessibles
  - protection pour passages de galerie, puits, galeries de liaison entre tunnels
- Connaissance préalable de la conductivité thermique

# Les traitements des sols par congélation

(Source : Atlas Fondations)



# Les traitements des sols par congélation

## ➤ Avantages et limites des traitements par congélation

<b>Avantages</b>	Limite les risques d'instabilité pour optimiser les méthodes d'excavation
	Large gamme de granulométrie
<b>Limites</b>	Espace nécessaire pour le placement de l'installation de congélation importante
	Gonflement induit (contrôle des conduites ou structures existantes)
	Circulations d'eaux souterraines
	Technique onéreuse (maintien de la surface gelée durant toute la durée de l'excavation)

# Les traitements des sols

Jetgrouting  
Tranchées  
Panneaux  
Injections  
Maritimes  
Résines  
Coulis  
Argiles  
Colonnes  
Liments  
Liant  
Ouvrages  
Techniques  
Sables  
Traitements  
Exécution  
Amélioration  
Congélation  
Contrôles  
Tourbes  
Soilmix  
Mixing  
Travaux  
Terrestres  
Biocalcification

Merci