



# Deep Soil Mixing (DSM)

Amélioration des sols mous  
par la méthode DSM





## Sommaire

Deep Soil Mixing.....	3
La voie humide.....	4
La voie sèche.....	6
Stabilisation en masse.....	7
Implantations de Keller.....	8



# Deep Soil Mixing (DSM)

Le Deep Soil Mixing (mélange de sol en profondeur), a été inventé au Japon et en Scandinavie. Cette méthode a été développée et perfectionnée par Keller. Son usage augmente sans cesse dans le monde, aussi bien en renforcement de sol qu'en étanchéification de terrains mous et/ou perméables. Le procédé permet une amélioration significative des propriétés mécaniques et physiques des sols traités, appelés soil-mix (ou sol-ciment) après mélange avec du ciment ou d'autres liants. Ce matériau présente en général une plus grande rigidité, une moindre perméabilité et une plus faible compressibilité que le sol originel. La technologie DSM requiert une grande expérience et un haut niveau d'expertise à toutes les étapes, de la conception à l'exécution. Par ailleurs il est impératif de disposer d'un matériel spécifique pour le forage et l'incorporation du liant, afin de satisfaire aux exigences en matière de qualité et de traçabilité des procédures et des produits.

## Voie humide et voie sèche

Il existe deux grandes catégories de méthodes de DSM. Le sol peut être mélangé mécaniquement, soit avec un coulis de liant (voie humide) ou alors avec un liant non hydraté (voie sèche). L'injection à haute pression du coulis peut également être utilisée pour améliorer la qualité du mélange.

## Avantages

- économie
- absence de vibrations
- variété d'utilisations
- rapidité d'exécution
- bon bilan environnemental

La voie humide est mieux appropriée aux argiles molles, limons et sables fins à faible teneur en eau, ainsi qu'aux sols à structure lenticulaire avec intercalations de couches de compacité variable. La voie sèche convient davantage aux sols mous à haute teneur en eau, aptes à apporter l'hydratation du liant. La stabilisation de sols organiques et de dépôts vasards est également possible, mais requiert des études complémentaires.

## Avantages

La technologie DSM est basée sur le concept novateur d'amélioration de sols naturels ou détritiques jusqu'à arriver à des caractéristiques définies, afin de résoudre des problèmes de soutènement de fouille ou d'éviter de recourir à des fondations profondes. Le champ d'application très large, ainsi que la grande variété de combinaisons géométriques possibles, permettent d'obtenir des solutions géotechniques sécuritaires et économiques. La mise en œuvre de liants et adjuvants non toxiques, y compris certains sous-produits industriels, ou encore un volume de boues très réduit par rapport à des procédés de jet grouting ou de pieux forés, sont quelques-unes des caractéristiques qui permettent de qualifier le DSM de technologie positive sur le plan environnemental. Le DSM est régi par la norme EN 14679.

## Applications typiques

- Remblais routiers sur sols mous
- Renforcement sous fondations de toute nature
- Fondations de piles et culées de pont ou d'éoliennes
- Blindage de fouille (avec armatures)
- Stabilisation de pentes
- Diminution du potentiel de liquéfaction
- Voiles et barrières étanches
- Stabilisation et solidification à vocation environnementale

## Quelques exemples



Voile étanche dans une digue en Allemagne



Blindage de fouille en Autriche



Blindage de fouille profonde en Pologne



DSM dans un remblai hydraulique à Singapour

# Le DSM en voie humide

## DSM en voie humide – malaxage mécanique

Réalisation de colonnes DSM



Exhaure du coulis

Dans la méthode Keller, on utilise un outil spécial pour mélanger le sol au liant. Il est constitué d'un tube central, de « couteaux » transversaux et d'une pointe de forage. Le forage ne cause pas de vibrations et il est facilité par l'injection simultanée de coulis de ciment par les buses situées à l'extrémité de la tarière. Dès que la profondeur prévue est atteinte, commence la réalisation de la colonne de DSM.

Les diamètres varient généralement de 0,40 m à 2,40 m, en fonction du but recherché. L'outil de malaxage, qui est également soumis à des mouvements successifs ascendants et descendants, assure le mélange homogène du coulis avec le sol.

La formulation et le volume du coulis injecté sont adaptés au résultat souhaité, en considérant les critères de résistance à la compression et/ou d'étanchéité. L'étanchéité peut être améliorée grâce à divers adjuvants comme la bentonite.

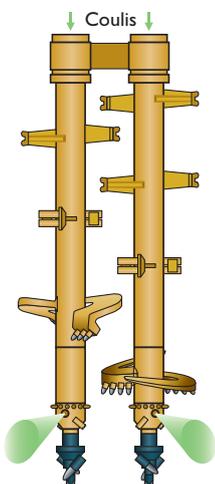
La reprise de moments fléchissants par les colonnes de DSM est assurée par la mise en place d'armatures dans les colonnes fraîchement réalisées.

Le DSM en voie humide est également réalisable à l'intérieur d'un tubage. Cette technique appelée TSM (Tubular Soil Mixing) est principalement utilisée pour la réalisation de colonnes de grande qualité en soutènement de fouilles.

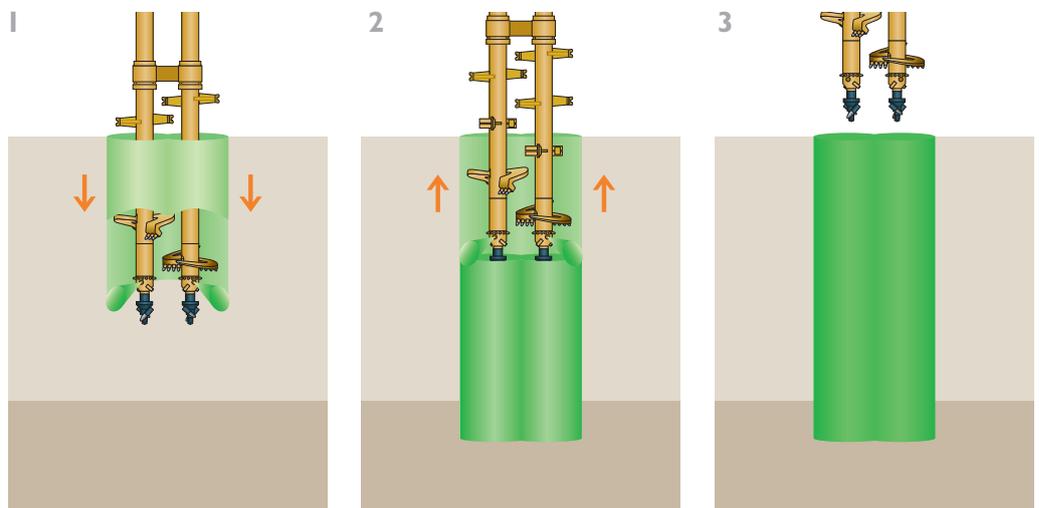


Tableau de commande

Machine de DSM avec outil de malaxage triple



Les buses d'injection peuvent être situées sur le tube axial ou sur les pales de malaxage



Le coulis peut être injecté dans les phases de descente et de montée, avec un débit dépendant des conditions du sol

Le procédé

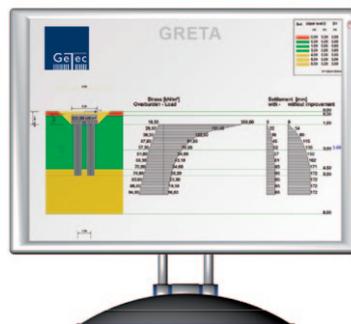
Quelques outils utilisés dans la mise en œuvre du DSM voie humide

### Contrôles de qualité

On détermine la résistance à la compression  $R_c$  et la contrainte admissible  $q_a$  à partir des enregistrements de paramètres, ainsi que des essais réalisés in situ ou en laboratoire. Sur la fiche de chaque colonne, on peut voir : date et heure de réalisation, longueur du fût, nombre de malaxages en descente et montée, pression et débit du coulis, consommation totale de coulis pour la colonne. La prise d'échantillons pour réaliser des essais se fait à la profondeur souhaitée dans la colonne fraîche. Des procédés plus perfectionnés tels que le carottage ou des méthodes de test in situ peuvent être utilisés pour obtenir des échantillons ou pour le contrôle de la continuité, de l'homogénéité ou du module des colonnes. En fonction de leur pertinence, leur précision ou leur adaptation au but recherché, on sélectionnera les meilleures méthodes de contrôle du sol renforcé.

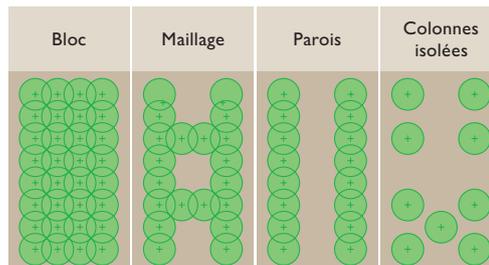


Colonnes DSM déterrées



### Conception

La conception des DSM fait appel à l'estimation des caractéristiques futures du sol stabilisé dans des conditions précises (soil-mix), ainsi qu'à la sélection de la géométrie et de l'implantation les mieux adaptées en fonction du but recherché (géotechnique). La résistance à la compression visée est en général fixée en fonction des caractéristiques physiques et chimiques du sol à traiter et des eaux souterraines, du type et de la quantité de ciment prévus, et d'autres importants paramètres de travail comme le rapport eau/ciment et le nombre de passes de malaxage. Le but de la partie géotechnique de la conception est de satisfaire aux critères requis pour les dimensions et la disposition du sol stabilisé, en fonction des critères dimensionnants de l'ouvrage projeté.



Exemples de dispositions

Voile étanche constitué de colonnes sécantes



Colonnes de renforcement sous une pile de pont



# Le DSM en voie sèche

## Le malaxage mécanique du sol avec un liant



Machine DSM à sec Keller (filiale LCM, Suède)

Contrairement à la voie humide, le DSM en voie sèche est possible uniquement dans des sols contenant suffisamment d'eau pour permettre la réaction d'hydratation des liants mélangés avec le terrain. Le principal avantage de ce procédé est de permettre la stabilisation à grande profondeur de sols très faibles, y compris des matériaux organiques, avec des rendements élevés, un coût réduit et très peu de rejets. Le travail à basse température est également possible.

Un atelier de DSM à sec comprend habituellement un stockage fixe ou mobile de liant, un système d'approvisionnement de celui-ci, et une machine spéciale de forage/malaxage équipée d'un outil spécifique.

Le diamètre usuel des colonnes est de 60 à 80 cm et la profondeur de traitement va jusqu'à 25 m. L'insufflation et le malaxage du liant s'opèrent à la remontée de l'outil, en inversant le sens de rotation par rapport au forage. Le liant est transporté depuis la navette dans des tubes, au moyen d'air comprimé. On ajuste la quantité de liant injectée en agissant sur la vitesse de rotation du dispositif d'alimentation. La pression de l'air et la quantité de liant sont régulées automatiquement afin de doser avec précision le mélange final dans la zone traitée. Il est de règle de stabiliser les argiles plastiques et les limons avec de la chaux ou un mélange chaux/ciment, alors que dans les sols organiques on utilise des mélanges contenant des laitiers de haut-fourneau.

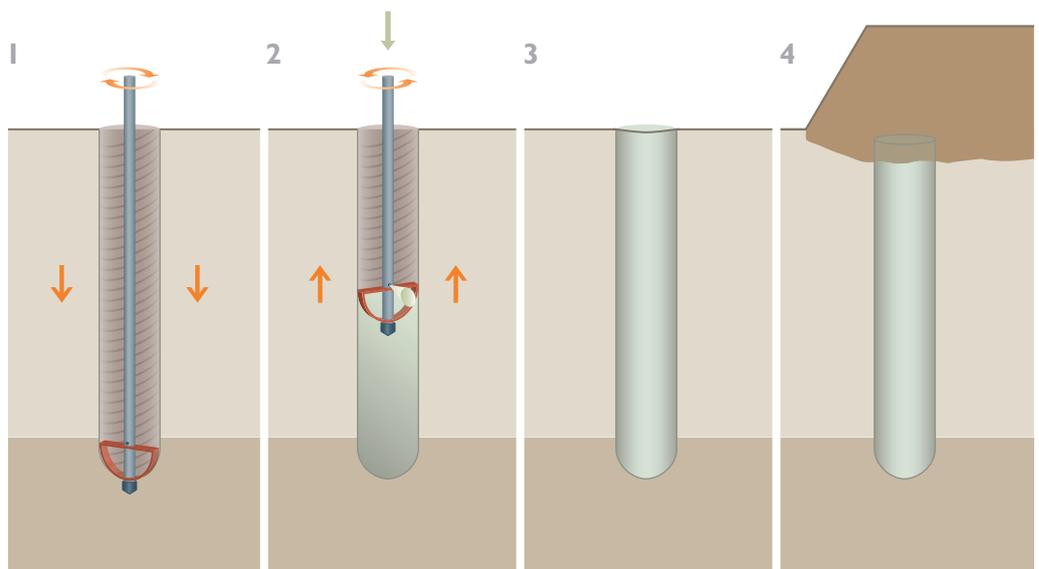


Insufflation de liant à sec



Navette type 1010 (fabrication Keller) pour soil mixing à sec

Foreuses et navettes en action



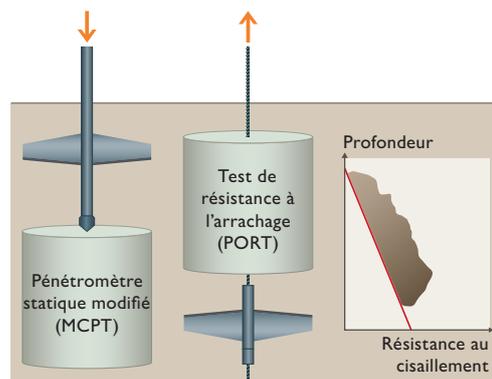
Le procédé

## Contrôles de qualité

De même que pour le DSM en voie humide, de nombreux enregistrements de paramètres et contrôles sont menés pendant la réalisation des travaux et sur les colonnes terminées. Chaque colonne fait l'objet d'une fiche d'information reprenant les paramètres enregistrés automatiquement. Après exécution des travaux, on vérifie l'obtention des caractéristiques visées lors de la conception du projet. Les essais usuels comprennent principalement le test sur échantillons, réalisable dans des colonnes de résistance plutôt basse, mais également des essais de pénétration statique avec un CPT modifié, ainsi que des tests d'arrachage similaires permettant de s'affranchir des problèmes de sortie de la colonne par le pénétromètre. Si nécessaire, on peut également réaliser des essais de laboratoire sur des échantillons.



Enregistrements de paramètres

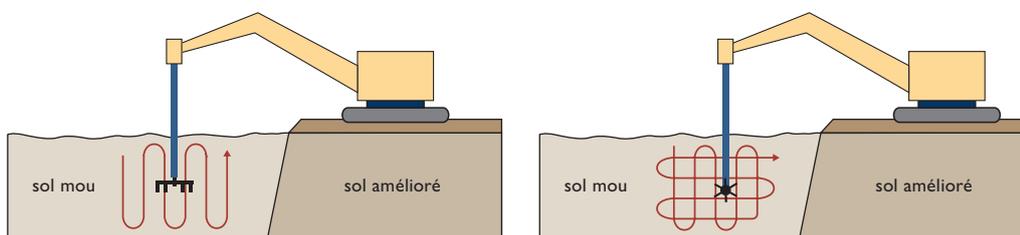


Essais de contrôle in situ

## Stabilisation en masse à faible profondeur

Le procédé de stabilisation en masse à sec représente une alternative intéressante et économique quand il s'agit de volumes substantiels de sols superficiels très lâches ou contaminés avec une forte teneur en eau, comme des dépôts de matériaux de dragage, vases, sols organiques ou boues détritiques. Cette méthode est mise en œuvre avec des outils de malaxage spéciaux montés sur une pelle mécanique.

Le malaxage est réalisé par passes verticales ou horizontales, avec des outils en forme d'hélices et une alimentation centrale en liant. L'alimentation se fait à partir d'une unité séparée comprenant le silo de liant, le compresseur avec dispositif d'assèchement de l'air, et les organes de contrôle. On réalise la stabilisation par passes en fonction du rayon d'action de la machine, généralement 8 à 10 m<sup>2</sup> sur une profondeur jusqu'à 4 m. Une fois que le volume requis de liant a été insufflé, le malaxage est poursuivi jusqu'à l'homogénéité optimale.



Quelques exemples d'outils conçus pour différents sols



Outils pour la stabilisation de masse



## **Keller Fondations Spéciales SAS**

### **Siège Social**

2 rue Denis Papin - CS 69224 Duttlenheim  
67129 Molsheim Cedex

Tél. 03 88 59 92 00 · Fax 03 88 59 95 90

e-mail : [direction@keller-france.com](mailto:direction@keller-france.com)

**[www.keller-france.com](http://www.keller-france.com)**

### **Agence de Strasbourg**

Tél. 03 90 29 77 77

e-mail : [strasbourg@keller-france.com](mailto:strasbourg@keller-france.com)

### **Agence de Metz**

Tél. 03 87 51 30 31

e-mail : [metz@keller-france.com](mailto:metz@keller-france.com)

### **Agence de Lille**

Tél. 03 20 17 72 33

e-mail : [lille@keller-france.com](mailto:lille@keller-france.com)

### **Agence de Paris**

Tél. 01 41 73 33 33

e-mail : [paris@keller-france.com](mailto:paris@keller-france.com)

### **Agence d'Aix/Marseille**

Tél. 04 42 24 40 41

e-mail : [aix@keller-france.com](mailto:aix@keller-france.com)

### **Agence de Lyon**

Tél. 04 72 37 94 20

e-mail : [lyon@keller-france.com](mailto:lyon@keller-france.com)

### **Agence de Toulouse**

Tél. 05 61 14 11 72

e-mail : [toulouse@keller-france.com](mailto:toulouse@keller-france.com)

*Présent également aux Antilles, en Algérie,  
au Maroc et en Tunisie*

### **Division Export**

Tél. 03 88 59 92 12

e-mail : [export@keller-france.com](mailto:export@keller-france.com)

### **Suisse**

#### **Keller-MTS SA**

Avenue de la Gare 58 · Case postale 663  
1920 Martigny

Tél. +41 27 722 65 85 · Fax +41 27 722 37 90

e-mail : [info@keller-mts.ch](mailto:info@keller-mts.ch)

**[www.keller-mts.ch](http://www.keller-mts.ch)**



Une société de Keller Group plc