



Argiles, limons et stabilisation des sols

Introduction

Les argiles sont des éléments essentiels des sols¹ :

- pour les propriétés mécaniques qu'elles confèrent au sol (positif : caractère cohérent et liant des sols)
- pour la fertilité des sols qui repose sur la capacité des argiles de stocker des éléments nécessaires à la croissance des végétaux

Dès les débuts de la construction, les argiles - tout comme le calcaire - sont utilisées comme liants dans les mortiers et les bétons. Les argiles ont aussi d'autres vertus (thérapeutiques, absorbantes et antipolluantes, couvrantes, colloïdes, etc.) qui ne seront pas abordées ici.

Selon la perspective adoptée - géologie, pédologie ou géotechnique - les argiles n'ont pas forcément la même signification. Ce sont les aspects géotechniques auxquels nous allons principalement nous intéresser ci-dessous.

Définition géotechnique des argiles

Du point de vue du géotechnicien, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à 0.004 mm (= 4 μ). La limite de de taille de 2 μ constitue elle un héritage historique : les particules de moins de 2 μ ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et en déterminer la nature à l'aide de méthodes basées sur la diffraction des rayons X. En effet, la nature des argiles ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau.

Les argiles constituent la fraction la plus fine des sols. A l'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée « squelette » et comprend les pierres et les blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers.

La définition géotechnique des argiles est liée aux caractéristiques chimiques de ceux-ci. Les argiles sont des minéraux : les phyllosilicates. Ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al etc.) dans les espaces interfoliaires (voir plus bas). Le critère de classement des argiles se base sur la forme de succession des couches dans les feuillets. Il y a 3 grande classes : les feuillets TO, TOT et TOTO.

La pratique utilise très souvent le terme générique de « fines ». Il s'agit alors des argiles telles qu'elles sont définies plus haut et des limons. Les normes européennes définissent les fines comme le pourcentage (massique) des passants au tamis de 0,063 mm

La fraction fine des sols, dimensions :

Argiles : < 0.002 mm (0,004)

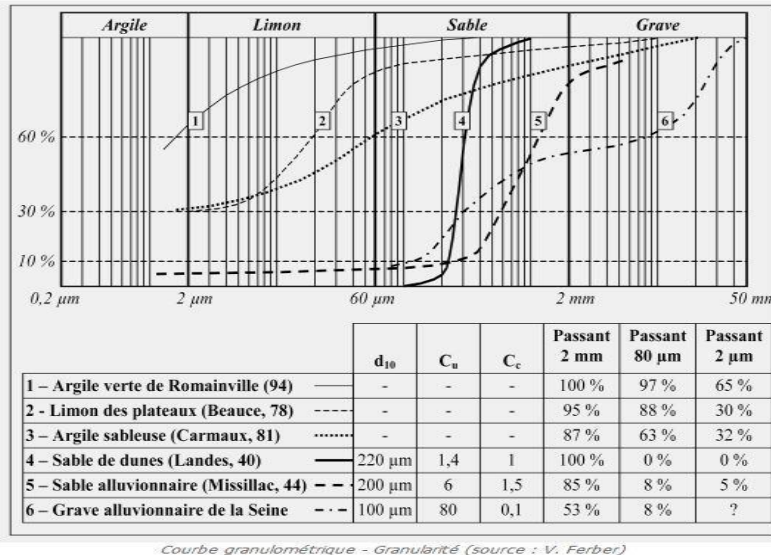
Limons ou silts : de 0.002 mm (0.004) à 0.063 mm

Fraction fine des sols : souvent < 0.006 mm - argiles et limons fins

¹ Le sol est défini selon le document « Evaluation et utilisation de matériaux terreux », OFEFP 2001, soit les horizons A et B situés au-dessus de l'horizon C (roche-mère)
2016/rev 260617/0817

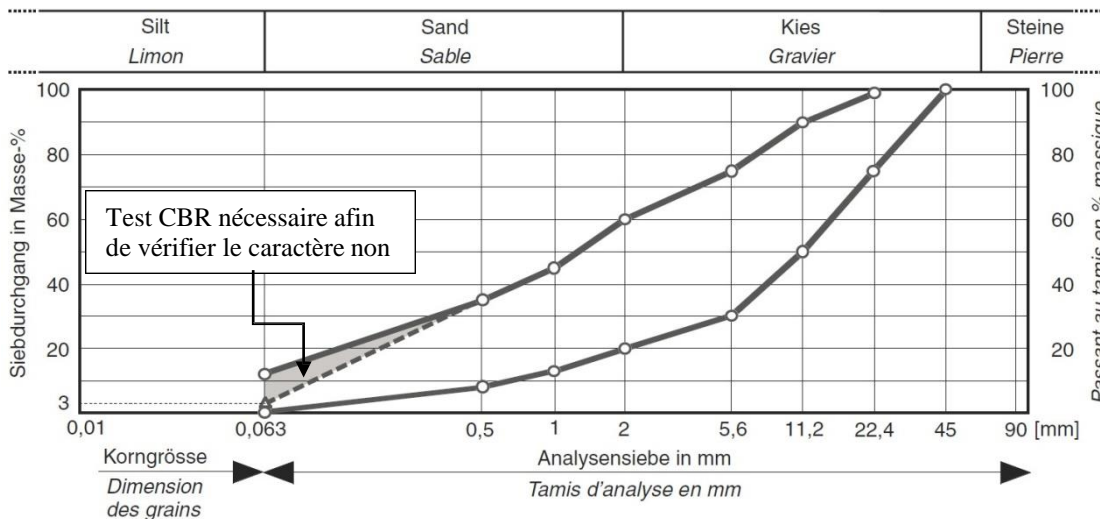


Courbes granulométriques caractéristiques :



Ce tableau montre les courbes caractéristiques pour des matériaux bien typés. La plupart sont inaptes à constituer un matériau de fondation pour une route forestière, à l'exception peut-être de la grave alluvionnaire qui contient des fractions mieux distribuées.

A l'opposé, le tableau ci-après représente le fuseau granulométrique prescrit pour une grave 0-22 de la norme pour les graves non traitées (GNT) SN 670 119a NA. Le fuseau contient toutes les fractions centrales biens réparties : avec le bon degré d'humidité, le compactage sera optimal.



Le test CBR (California Bearing Ratio) est un test de portance qui permet de mesurer in situ (au pénétromètre pour le protocole de mesure le plus simple) la résistance du sol. Une quantité supérieure à 3% de limon **ou d'argile** compromet la résistance au gel. Un test supplémentaire est nécessaire pour vérifier le caractère non gélif (test CBR après 4 jours d'immersion de l'échantillon dans l'eau). La plupart des tests doivent être réalisés en laboratoire selon la norme SN 670 320b.



Nature des fines du sol :

Les limons :

- Fractionnement mécanique de tous les types de roches
- Assez inertes (la volumétrie n'est pas très sensible en présence d'eau)

Les argiles :

- Un pas de plus dans la « dégradation » puis transformation
- Oxydation des roches silicatées (granit, gneiss, schistes)
- Cristaux tétraédriques ou octaédriques (feuillet) : silicium et oxygène
- Charges négatives en surface

→ Les argiles sont chimiquement réactifs : ils peuvent se lier à l'eau par une liaison ionique ou incorporer dans leur structure par liaison covalente des cations autres que le silicium.

Origine des argiles

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage) et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates. Ces derniers sont des minéraux argileux (les micas par exemple) dont la dimension des feuillet peut atteindre 5 μ , donc une taille supérieure à celle des argiles au sens strict. Ces phyllosilicates confèrent aux roches argileuses la structure litée typique des schistes.

La dissolution du calcaire donne également naissance à des dépôts argileux.

L'activité végétale produit également des argiles, jusqu'à 30 kg par an et par hectare.

Structure des argiles

Les argiles s'organisent en structures en feuillet

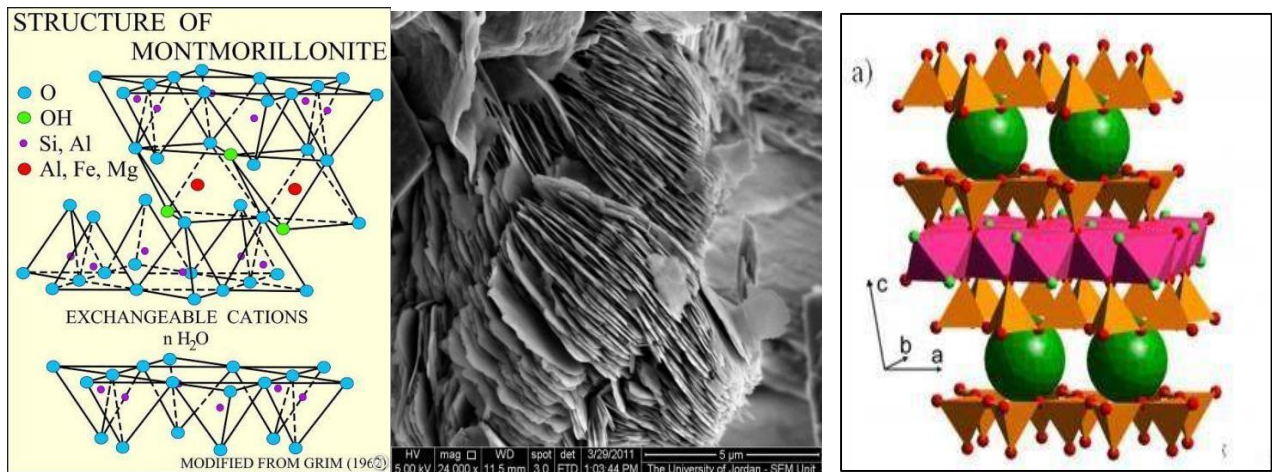
- Empilement de minéraux d'oxyde de silicium (cristaux tétraédriques ou octaédriques) en feuillet entrecoupés par des espaces. Souvent, l'atome de silicium est remplacé par Al (tétraédrique) ou Al, Fe, Mg, Li (octaédriques).
- Charges négatives à la surface (généralement en raison de l'incorporation d'hydroxyles OH⁻)
- Les charges négatives sont compensées par l'incorporation de cations dans les espaces entre les couches.

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace interfoliaire (en vert). La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine. La montmorillonite,



qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.

Structure des argiles :



Dessin de droite : Laboratoire Léon Brillouin llb-sec@cea.fr

Propriétés géotechniques et pédologiques des argiles

Les argiles déterminent sensiblement les propriétés de la fraction fine du sol, en particulier en raison de leur comportement avec l'eau.

- Gonflement : l'incorporation de cations hydratés provoque un gonflement ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ par exemple)
- Les argiles ont une affinité pour les liquides polaires comme l'eau (l'eau est une molécule dipôle possédant 1 pôle positif : l'hydrogène et 1 pôle négatif : l'oxygène)
- Stockage d'éléments nutritifs pour les plantes : certaines argiles ont une capacité d'échange cationique (CEC) très élevée

Argiles et plasticité des sols

La teneur et la nature des argiles des sols déterminent largement leurs caractéristiques géotechniques. Le test le plus simple pour déterminer la présence d'argile est le test au bleu de méthylène qui donne une indication sur la teneur en argile des sols et matériaux.

Dans une autre approche, l'échantillon de sol est soumis au test d'Atterberg [1]. Ce test permet de déterminer la sensibilité d'un échantillon de sol à l'eau sans passer par l'analyse minéralogique de sa partie fine.



Selon sa teneur en eau (et la nature des minéraux), un sol argileux peut se présenter sous trois états :

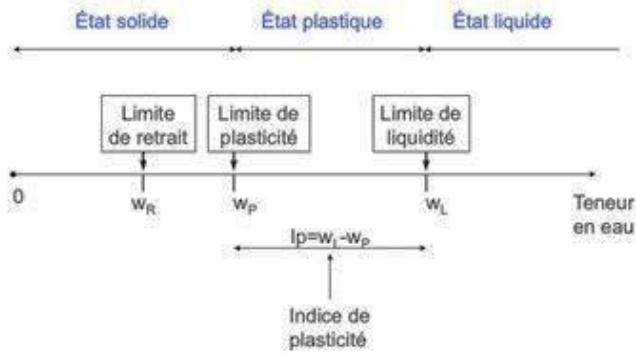


Figure 2.3 : Limites d'Atterberg

Ainsi il est possible de caractériser un sol en donnant l'indice de plasticité I_p et l'indice de consistance I_c :

$$I_p = w_l - w_p \quad \text{et} \quad I_c = \frac{w_l - w_n}{I_p}$$

Où w_n représente la teneur en eau normale

Indices de plasticité et valeurs limites, extrait de [4]

minéral	cation échangé	limite de liquidité	limite de plasticité	indice de plasticité	limite de retrait
Montmorillonite	Na	710	54	656	9.9
	K	680	98	562	9.3
	Ca	510	81	429	10.5
	Mg	410	60	350	14.7
	Fe	290	75	215	10.3
Illite	Na	120	53	67	15.4
	K	120	60	60	17.5
	Ca	100	45	55	16.8
	Mg	95	46	49	14.7
	Fe	110	49	61	15.3
Kaolinite	Na	53	32	21	26.8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24.5
	Mg	54	31	23	29.2
	Fe	59	37	22	29.2

Tableau 2-6 : Valeurs des limites d'Atterberg de différents minéraux argileux (d'après Cornell, 1951)

Le tableau ci-dessus montre également l'importance du cation échangé pour les caractéristiques mécaniques du sol.



Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique découle directement de la structure des argiles et de leurs caractéristiques chimiques. Les argiles constituent de formidables réservoirs d'eau et d'éléments vitaux pour la végétation. Un gramme de montmorillonite représente 500 m² de surface susceptible d'adsorber ou d'absorber de l'eau ou des ions, respectivement dans sa structure même ou à la surface. En comparaison, le sable est inerte, l'eau rempli simplement l'espace interstitiel. A nouveau, toutes les argiles ont des propriétés identiques mais exprimées très diversement dans leur intensité :

Capacité d'échange cationique (C.E.C)

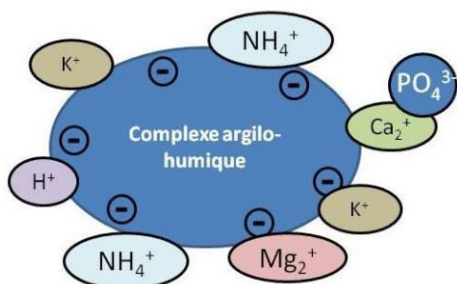
	Rapport largeur épaisseur	Surface spécifique (m ² /g)	C.E.C
sable propre	1	2.10 ⁻⁴	
kaolinite	10 - 20	10 - 70	3 - 15
illite	20 - 50	80 - 100	10 - 15
montmorillonite (smectite)	200 - 400	500	80 - 140

Tableau 2-4 : Caractéristiques des minéraux argileux courants
Source: INPL Nancy

Complexe argilo-humique (CAH)

En relation avec la capacité d'échange cationique, il faut mentionner le complexe argilo-humique qui résulte de l'activité de la faune des sols (vers de terre) et des champignons qui parviennent à lier les éléments de l'humus avec les argiles et à former un complexe très stable unissant le minéral à l'organique pour structurer les sols et assurer leur fertilité et leur stabilité mécanique, en particulier contre la battance et contre l'effet de l'impact destructeur des gouttes d'eau sur la structure superficielle des sols.

Modèle de complexe argilo-humique :





Stabilisation

La stabilisation des matériaux en place est une manière de consolider l'infrastructure d'une route. Stabiliser les matériaux meubles de moindre qualité de l'assise d'un chemin permet de réduire la couche de fondation qu'il faut généralement importer. La fraction argileuse des matériaux est largement responsable des comportements indésirables. Les sols contenant des fines, en particulier des argiles, sont très répandus en Suisse : ce sont les dépôts résultant de l'action des glaciers et des eaux de fonte, de la dégradation des marnes molassiques, du Flysch et des couches marneuses du Jura.

En raison du dispositif technique qu'elle requiert (machines), la rénovation d'un chemin au moyen d'une stabilisation n'est pas une méthode adaptée à l'entretien périodique ou de petits chantiers. Il s'agit véritablement d'un renouvellement de toute la superstructure d'une route forestière dont la portance s'est avérée insuffisante et ayant subi des dégâts qui la rendent impraticable. Presque toujours, sur la base des défauts constatés sur le tracé, la refonte du concept de l'évacuation des eaux superficielles est vivement recommandée.

Dans la planification des travaux, il ne faut pas oublier de fermer le chemin à toute circulation pendant 2 à 3 semaines après les travaux afin de laisser les effets de la stabilisation se développer. Une stabilisation ne peut pas se réaliser par temps pluvieux.

Limites de la technique

Il n'existe pas de sol ou matériau absolument stable. L'expérience montre que les mélanges de graviers et sables contenant moins de 3% de masse pondérale de fines (<0.06 mm, argiles et limons) sont les matériaux **les plus stables**. Ils n'ont pas besoin d'apports stabilisants.

Les matériaux meubles très limoneux ou organiques ne peuvent pas être stabilisés.

Les matériaux grossiers mais contenant de 5 à 50% de masse pondérale de fines (argiles et limons) ainsi que les matériaux fins et argileux peuvent être stabilisés avec un bon taux de réussite.

Mécanisme d'action (ou comment ça marche ?)

En théorie, la résistance, ou portance d'un sol ou matériau meuble, dépend de deux facteurs :

$$\text{Portance} = \text{cohésion} + \text{frottement (valeur théorique entre 0 et 1)}$$

La **cohésion** dépend des argiles contenues dans le sol. La cohésion dépend de la quantité d'argile présente, de la **teneur en eau** et de la **densité**. Il faut des argiles, mais pas trop, car la stabilité des argiles est très influencée par la teneur en eau.

Le **frottement** est dépendant de la surface de contact totale entre les grains et les particules. Cette surface de contact dépend de la **densité** du matériau. Les vides ne sont pas souhaités car ils diminuent la densité et augmentent la capacité à absorber de l'eau. Ainsi, un sol stable est un sol contenant toutes les fractions et permettant ainsi un arrangement très dense des grains et particules (parabole granulométrique avec moins de 3% de fines).

En pratique, la résistance d'un matériau meuble dépend ainsi, en deuxième analyse intuitive, de la densité et de la teneur en eau du sol dans son état compacté.



Méthodes de stabilisation

Il existe différentes méthodes de stabilisation des matériaux. On peut répartir celles-ci en deux catégories selon qu'elles font appel à un traitement mécanique ou à l'ajout d'un liant.

Traitement mécanique

Compaction

La plus simple est de compacter le matériau, ce pour autant que les ingrédients adéquats soient présents et que la teneur en eau soit bonne. C'est rarement le cas pour les sols en place.

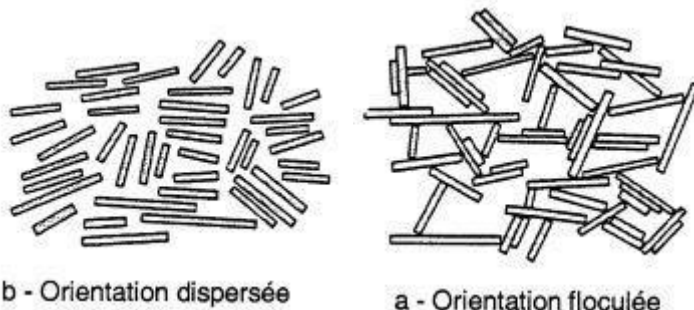
Modification mécanique

Il est aussi possible de modifier la granularité d'un sol par l'apport d'une (ou de plusieurs) fraction(s) n'étant pas spontanément représentée(s) de manière satisfaisante puis de mélanger et de compacter le tout. L'apport agit principalement sur la surface de frottement. Par exemple, des résidus de lavage des gravières peuvent être ajoutés en quantité adéquate à des sables-graviers pour constituer un mélange compactable et améliorer ainsi la cohésion du sol. C'est la méthode qui permet de réaliser des couches d'usure calcaires ou argileuses. Une manière d'améliorer la granulométrie consiste à exploiter et à concasser des matériaux naturels.

Adjonction de liants

L'adjonction de liants revient à agir sur les argiles par l'intermédiaire d'un apport de cations.

L'apport des cations contenus dans les liants permet de renforcer les liaisons entre les minéraux d'argiles et de former des grains dans le sol (3). Cette capacité des argiles à flocculer ne se limite pas au génie forestier ou civil, mais s'utilise dans le traitement des eaux (conjointement à la capacité des argiles d'absorber des molécules non désirables). D'autres applications sont également connues dans l'industrie chimique et métallurgique.



La flocculation des argiles permet de former des agrégats dans le sol, ce qui influence positivement les propriétés mécaniques des sols.



Kuonen (1983) a déjà résumé les améliorations à apporter à un sol de fondation de la manière suivante :

Méthodes	Cohésion	Frottement
Compactage	+	+
Apport mécanique	(+)	+
Apport de chaux	+	(+)
Apport de ciment	+	-

Apport de chaux : une adjonction de chaux confère une meilleure cohésion aux graves naturelles instables. Il s'agit principalement d'augmenter la cohésion entre les particules (surtout les argiles) et, dans une moindre mesure, d'agir sur le frottement.

Apport de ciment : l'adjonction de ciment permet d'agir sur la cohésion entre les particules. Cet effet ne se limite pas aux argiles mais s'étend aux limons, voire aux sables fins.

Types de liants

La chaux

La chaux se trouve sous deux formes : la chaux vive (CaO) - ou oxyde calcium - et la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - ou hydroxyde de calcium - aussi appelée chaux aérienne. La chaux s'obtient par calcination du calcaire pur ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ à 900 degrés). La chaux vive, très caustique, est utilisée dans l'industrie et l'agriculture mais pas dans la construction. Pour des raisons évidentes, la chaux se transportait souvent sous forme vive pour être ensuite hydratée sur les chantiers (30% de prise de volume).

La chaux éteinte résulte d'une hydratation de la chaux vive – ce qui produit un fort dégagement de chaleur - et est utilisée comme liant dans les mortiers. La prise de la chaux éteinte se fait, en présence d'eau et, à plus long terme, par carbonatation de l'air avec le CO_2 : On a alors (re)formation du calcaire CaCO_3 .

La forte production de chaleur est un phénomène caractéristique observable lors d'une stabilisation de matériaux de chemin. La chaleur permet de sécher la matière.

La chaux hydraulique

La chaux hydraulique résulte de la calcination, à des températures entre comprises 800 et 1500 degrés Celsius, de calcaire naturel contenant des argiles et des marnes. Le calcium se lie avec d'autres éléments tels que le silicium, le fer et l'aluminium présents dans les argiles et les limons. En hydratant la chaux hydraulique, ces éléments forment des hydrates insolubles. La chaux est alors assez proche du ciment mais, contrairement aux enduits à base de ciment, les enduits à base de chaux hydrauliques respirent.

La prise de la chaux hydraulique se fait en deux phases : il y a tout d'abord une prise hydraulique à l'abri de l'air due à la **réaction des silicates avec la chaux**, puis une prise plus lente où les hydrates et la chaux vont subir une carbonatation au contact de l'air humide.



Le ciment

La fabrication du ciment est similaire à celle de la chaux, mais requiert une température de 1'450 degrés. Les ingrédients entrant dans la composition du ciment sont similaires à ceux utilisés pour la chaux hydraulique, mais avec plus d'argile. La calcination génère une grande quantité de silicates de calcium, dont le tricalcium d'alumine - principal agent d'une prise hydraulique rapide (hydratation).

Contrairement à l'adjonction de béton, l'adjonction de ciment aux graves ou sols naturels n'a pas pour but premier la résistance des matériaux, mais plutôt leur stabilité face à l'eau et au gel. Le dosage de l'ajout de ciment, entre 60 et 150 kg par m³ de matériaux, reste nettement inférieur à celui du béton. La prise est de type hydraulique.

Les sels

Lorsque les argiles en suspension dans l'eau douce des fleuves entrent en contact avec l'eau de mer riche en cations bivalents, les argiles flocculent et forment des dépôts qui sont à l'origine des grands deltas fluviaux. L'adjonction de sels dans les sols argileux a le même effet que la chaux. Certains produits se basant sur ce phénomène – donc destinés à la stabilisation des sols par le biais de la floculation - sont proposés sur le marché.

Effets de la stabilisation à la chaux [8 et 9]

Effets à court terme :

Réduction de la teneur en eau par le biais de la réaction exothermique de l'oxyde de calcium avec l'eau (adsorption d'eau, augmentation de volume et évaporation de l'eau libre par la chaleur) et aération de la masse par mélangeage. Les ions Ca²⁺ à très forte charge remplacent les ions habituellement liés aux argiles et, de par ces liaisons fortes, la masse floccule et s'agrège ce qui, par la suite, favorise le compactage.

La teneur en eau de l'optimum de Proctor² augmente et le compactage s'en trouve amélioré.

L'adjonction de calcaire permet de stabiliser le volume et de diminuer l'affinité des particules à l'eau : la résistance au gel augmente.

Effets à long terme :

Le calcaire réagit avec les argiles du sol du matériau en place. Il se passe une réaction cimentaire (ou pouzzolanique) avec l'alcalinisation du sol (pH>12).

Au contact avec le bicarbonate de l'eau, il se produit une carbonatation lente.

Effets de la stabilisation au ciment

Effets à court terme :

Le ciment étant épandu sec, il réagit avec l'eau du sol et provoque ainsi une élévation de la teneur en eau de l'optimum de Proctor : le compactage est amélioré.

² L'essai Proctor est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée [7]. Se réalise en laboratoire.



Effets à long terme :

L'adjonction de ciment à un sol provoque une prise hydraulique (avec l'eau contenue dans le sol). Elle est efficace dans les graviers sableux possédant une fraction fine trop élevée pour assurer une portance suffisante. Dans un sol fortement plastique ($I_p > 15\%$), le malaxage devient difficile. Compte tenu du fait que plus le sol est fin et plus le dosage de ciment doit être élevé, la méthode présente un seuil de rentabilité qui peut s'élever rapidement. La présence d'une fraction organique dans le sol empêche la prise hydraulique.

Choix du liant

Le choix du liant peut être problématique car les caractéristiques du sol ou des matériaux mis en place à l'origine (dans le cas d'une réfection) peuvent changer rapidement sur la longueur du tracé.

Un examen soigneux du tracé et l'expérience de l'entreprise procédant aux travaux sont précieux. Dans la pratique et pour les travaux de petite envergure, les conditions de garantie imposées pour les travaux poussent les entreprises au surdosage, à l'utilisation de mélanges de ciment et de chaux ainsi qu'à l'adjonction de cations spécifiques par l'apport de sels. Il existe des produits tout prêts sur le marché qui permettent de faire face à presque toutes les situations. Dans les grands travaux, pour des raisons économiques, le choix du liant et du dosage est soigneusement étudié.

Additif

Il existe sur le marché des mélanges de sels multivalents (chlorites et hydrocarbonates) dont la capacité d'échange est plus grande que celle des ions du calcaire et ayant des effets positifs sur la résistance au gel, la densité sèche des sols et, par conséquent, sur leur résistance. Ils sont utilisés à raison de 1 kilo par m³ de sol à stabiliser pour 20 litres d'eau d'épandage. Cette technique permet d'aménager des pistes d'accès provisoires sur les grands chantiers. Il est également possible de renoncer à la pose d'une couche d'usure sur les chemins forestiers traités de cette manière. Il n'existe malheureusement pas d'expérience sur la longévité de telles surfaces (érosion mécanique superficielle). Ces additifs sont (seraient) compatibles avec la protection des eaux.



Remarques pratiques finales et recommandations

La mise en place (épandage, malaxage, compaction) ne peut se faire que par temps sec.

Après une stabilisation, il est nécessaire de fermer le chemin pendant quelques semaines.

La stabilisation n'atteint pas les valeurs de portance d'un béton sec compacté (granulat, sables et ciment, dosage 200-250kg/m³) [10], ceci principalement en raison de la qualité du granulat. Le BSC est réalisé avec un granulat normé, de préférence concassé, principalement du sable à granulométrie étalée avec un Dmax de 20mm. Ce type de revêtement (avec un granulat normé) peut se passer d'une couche d'usure et peut être mis en service immédiatement après compactage (max 2,5 to).

Les stabilisations à 150 kg sur 25 cm d'épaisseur sont en soit suffisantes du point de vue de la portance mais sont sensibles à l'érosion superficielle. Il est recommandé de poser une couche de fermeture ou d'usure par-dessus la couche stabilisée.

La principale application de la stabilisation reste celle de l'amélioration du sol de fondation dans le cadre de grands travaux (routiers ou ferroviaires) dans des terrains uniformes du point de vue géotechnique - une condition que l'on retrouve rarement en Suisse, ce encore moins dans les terrains forestiers. L'objectif de la stabilisation réside alors dans la réduction de l'importation sur le chantier des quantités importantes de matériaux nobles de fondation et/ou de pouvoir rouler sur la planie si les circonstances du chantier l'exigent.

En ce qui concerne la réfection et l'élargissement de chemins forestiers, la stabilisation combinée à un apport de matériaux (qui peuvent être mélangés sur place) peut présenter des avantages mais dépend fortement de l'ampleur des travaux. L'adéquation entre les coûts occasionnés et les avantages apportés par l'ouvrage doit être évaluée de cas en cas. Une refonte des équipements de gestion des eaux de surface et des eaux de ruissellement du chemin doit être faite dans tous les cas.

La stabilisation hydraulique (avec ou sans additif) des matériaux en place (réfection de chemin) avec ou sans apport de granulat supplémentaire (élargissement) est en soi une solution technique envisageable et pratiquée en Suisse. Nous ne possédons malheureusement pas de retour d'expériences systématiques qui permettrait une comparaison qualité – prix de cette technique avec les méthodes traditionnelles sur le long terme.



Références

- (1) La classification des sols. Portet, Noël, Nicaise, Portillo, Vermeulen, ente-Aix, 2011
http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3_ClassificationSols/co/generation_web_ClassificationSols.html
Donne un bon aperçu des définitions utilisées en France dans les GTR (grands travaux routiers) et l'accès à des fiches techniques concernant les tests de laboratoire principaux.
- (2) Limites d'Atterberg, indice de consistance, indice de plasticité, test de Casagrande
<https://youtu.be/Ei6ABD2f10A>
- (3) GÉOTECHNIQUE 1, chapitre 1, Jacques Lérau, INSA Toulouse, 2006
https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/jlerau/chapitre_1.pdf
- (4) Propriétés Mécaniques et Physiques des Sols, INPL, Jean-Paul Tisot
http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap2/consistance.html
Approche analytique de la physique et mécanique des sols
- (5) LES ARGILES, genèse et utilisations
http://www.normalesup.org/~clanglois/Sciences_Terre/Argiles/Argiles0.html
- (6) Les principaux types de sols. J. Beauchamps, université de Picardie, 2006 <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>
- (7) <https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile>
- (8) Le traitement des sols à la chaux, éléments fondamentaux, Journée Technique CFMS
Valorisation des Sols Fins 3 Décembre 2008 Paris Par V. Lelong
- (9) Stabilisation des sols argileux par la chaux. Z. Attima, A. Dekayir, M. A. Bennani, K. Elhammouti
Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014
- (10) Les fondations routières liées au ciment. Fédération de l'Industrie Cimentière Belge. 2004
- (11) Verfestigung und Verbesserung von Böden und anderer Stoffe mit hydraulischen Bindemitteln und Glimmer, 1985, Volker Fischer, Biosta