



Enseignements de TerDOUEST

**Propositions de compléments au
Guide Traitement des Sols**

RAPPORT

Ce document est le résultat d'un travail collectif réalisé à la suite du projet de l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) TerDOUEST.

Remerciements à l'ensemble des personnes du consortium TerDOUEST ayant apporté leur contribution directe et indirecte à ce travail (responsables de modules, responsables scientifiques, contributeurs).

Rédacteurs de la présente note :

Joseph ABDO – CIMbéton
Yasmina BOUSSAFIR - IFSTTAR
Patrice CHARDARD – Eiffage
Yu-Jun CUI – ENPC
Daniel GANDILLE – Guintoli
Bruno LANDES – SNCF
Anthony MATYNIA – Cerema
Daniel PUIATTI – DPST Consulting

Avec la contribution de Olivier CUISINIER - Ecole de Géologie, Thierry DUBREUCQ - IFSTTAR, Michel GALLISSAIRES - Egis, Agnès JULLIEN - IFSTTAR



Ce guide a été relu et validé par le Comité Opérationnel « Méthodologie » de l'IDRRIM ainsi composé :

ROSSIGNY Pascal - Cerema
HAMOUDI Amine - Cerema
ABDO Joseph - SFIC
ALPHAND Frederic - ADSTD
BAUCHEREL Daniel - ADSTD
BODET Raphaël, - UNPG
BONVALLET Jacques - CISMA
BOULET Michel - IFSTTAR
BRAZILLIER Didier - DIR Centre Est
CHAIGNON François - USIRF
CHARDARD Patrice - SPTF
CHEVALIER Christophe - SPECBEA
DESPORT Michel - SER
DUMONT Hervé - USIRF
GEORGE Luc-Amaury - CINOV
GOUX Marie-Thérèse - MEDDE
GUIRAUD Hervé - Cerema
KEMPF Yannick - Cerema
LAYERLE Eric - USIRF
LECONTE Pascal - UP' Chaux
MICHOU Jean-Michel - EUROBITUME France
MATYNIA Anthony - Cerema
PENDARIAS Daniel - MEDDE - DGITM - DIT – MARRN
PICARD Thierry - MEDDE - DGITM - DIT – MARRN
POINSIGNON Michel - SYNTEC Ingénierie
PORRU Patrick - IDRRIM
TAMAGNY Philippe - IFSTTAR
TASSONE Marc - IDRRIM
TRAINS Michel - ASFA



Sommaire

Préambule	6
A – Notions Générales.....	8
A.1 - Les produits de traitement.....	8
A.2 - Actions des liants.....	10
A.3 - L'évolution de la prise dans les sols.....	11
B – Traitement des sols pour les ouvrages en terre.....	14
B.1 - Principales dispositions constructives.....	14
B.2 - Amélioration des matériaux.....	17
B.3 - Stabilisation des matériaux.....	21
B.4 - Réalisation : études, mise en œuvre, contrôles.....	31
C – Couche de forme traitée en place.....	40
D – Développement durable.....	40
D.1 - Détermination des indicateurs.....	41
D.2 - Retour d'expérience RN 7.....	43
D.3 - Analyse de risque.....	43
Bibliographie.....	48

Préambule

En France, le développement du traitement des sols s'est amorcé au début des années soixante. Depuis, les efforts conjugués de l'ensemble de la profession : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, organismes techniques, entreprises, constructeurs de matériels, producteurs de liants, ont permis de faire progresser la technique, de la rendre fiable et performante et de mettre en évidence son intérêt économique et environnemental. Aujourd'hui, elle est devenue incontournable.

Son développement a été jalonné par une série de publications qui font aujourd'hui références. Il s'agit en particulier du GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme [1]), dont la première édition date de 1992, et surtout du GTS (Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme [2]) publié en 2000, sans oublier son complément pour les assises de chaussées publié en 2007 [3].

Ces documents sont le fruit de 4 décennies de pratique et de retours d'expériences attestant du bon comportement des ouvrages et de leur durabilité. Rédigés initialement pour la conception et la réalisation des ouvrages routiers et autoroutiers, ils ont très vite trouvé application dans d'autres domaines tels que les infrastructures ferroviaires, les plates-formes et voiries diverses, y compris en agglomération. Aujourd'hui ces documents sont amenés à évoluer pour intégrer les nouvelles avancées de la recherche et les constats liés à l'exécution de nombreux chantiers appliquant la technique de traitement de sol et notamment le réemploi des argiles très plastiques.

Parmi les besoins identifiés en matière de recherche au milieu des années 2000, figuraient l'approfondissement de la connaissance des interactions liant-matériau et l'élargissement de la gamme des matériaux concernés et de leurs domaines d'application. Très vite, il est apparu que ces deux thèmes étaient liés et que pour progresser dans les domaines d'application, il fallait aussi progresser dans la connaissance des phénomènes fondamentaux en faisant appel à des moyens d'investigation nouveaux et performants.

En France, la profession a lancé un ambitieux programme de recherche intitulé TerDOUEST (Terrassement Durable - Ouvrages en Sols traités). Ce programme, soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR), s'est déroulé de 2008 à 2012. Piloté par l'IFSTTAR, il a réuni plusieurs partenaires (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, universitaires, organismes techniques, entreprises, producteurs de liants) qui ont travaillé selon les quatre axes suivants :

- ❖ Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités
- ❖ Evolution dans le temps des sols traités - Durabilité
- ❖ Réalisation d'un ouvrage expérimental de référence
- ❖ Méthodes et outils d'analyses économiques & environnementales des projets

Les résultats de ce travail ont été présentés lors d'un séminaire de restitution qui s'est déroulé du 18 au 19 juin 2013 à l'Ecole des Ponts ParisTech.

L'ambition du présent rapport est de mettre à disposition de la profession, dans l'attente de la révision du GTS, les nouveautés et les principaux enseignements de TerDOUEST.

Dans un souci pratique, chacun des chapitres de ce rapport renvoie au paragraphe correspondant du GTS dont il complète ou actualise le contenu, notamment vis-à-vis de certaines normes de référence.

De cette manière, il sera possible de répondre plus rapidement aux attentes et interrogations de la profession et de donner aux signataires de la “Convention d’engagement volontaire” [4] des moyens supplémentaires pour atteindre leurs objectifs.

Le réemploi des matériaux très plastiques permettra l’augmentation du taux de réemploi global des sols fins et une réduction du volume de dépôts. La quantité de matériaux trop plastiques pour un réemploi est estimée à 5% du volume de matériaux naturels terrassés. Elle impacte dans la même proportion l’objectif de réemploi de 100% à l’horizon 2020 fixé par la Convention d’engagement volontaire du 25 mars 2009 [4].

A- Notions Générales

A.1 - Les produits de traitement

(Ce paragraphe fait référence au § A.1.2 du GTS)

Les produits de traitement les plus utilisés sont les chaux aériennes, principalement calciques, et les liants hydrauliques. Tous ces produits doivent satisfaire aux exigences de normes en vigueur en France ou à des avis techniques (ou équivalents).

La chaux aérienne

La chaux est qualifiée d'aérienne [6] [7] parce qu'à la suite de la décarbonatation du calcaire pur aux environs de 900°C, il se forme une chaux dite vive(1) qui, après hydratation, est capable, en atmosphère humide, de fixer le gaz carbonique de l'air pour redonner du calcaire. On parle du cycle de la chaux aérienne.



Selon la composition du calcaire d'origine, on distingue la chaux calcique, issue de carbonate de calcium, de la chaux magnésienne, issue du carbonate mixte de calcium et de magnésium. La chaux calcique est très réactive au contact de l'eau, contrairement à la chaux magnésienne dont l'oxyde de magnésium s'hydrate très lentement, ce qui peut générer des gonflements différés dans le matériau traité. Pour cette raison, c'est la chaux aérienne calcique qui est la plus couramment utilisée en traitement des sols.

Les chaux aériennes utilisées dans le domaine des travaux publics sont couvertes par la norme NF EN 459 qui se décompose en 3 parties :

- ❖ NF EN 459–1 : Chaux de construction
- ❖ NF EN 459–2 : Méthodes d'essais
- ❖ NF EN 459–3 : Evaluation de la conformité

La partie 1 donne les classifications relatives à chacune des chaux de construction. Se référer simplement à cette norme n'est pas suffisant : il est également nécessaire de spécifier le type de chaux choisi [8].

La chaux est un produit de construction. A ce titre, elle doit impérativement être conforme au Règlement Produits de Construction qui impose, entre autres, le respect de la procédure de marquage "CE" autorisant sa mise sur le marché.

Les liants hydrauliques

Un liant hydraulique est un mélange réalisé après broyage de plusieurs constituants. On distingue :

- ❖ Les constituants principaux tels que le clinker « K », le laitier granulé de haut fourneau « S », les pouzzolanes naturelles « P », les cendres volantes silico-alumineuses « V », les schistes calcinés (T), le calcaire (L), et dans certains cas la chaux.

- ❖ Les constituants secondaires tels que le sulfate de calcium sous forme de gypse ou d'anhydrite
- ❖ Des ajouts éventuels destinés à conférer des propriétés spécifiques.

En France, les liants hydrauliques concernés par la technique du traitement des sols sont les ciments et les liants hydrauliques routiers (LHR).

Les ciments

En fonction de leur composition, les ciments courants [9] sont subdivisés en cinq types : CEM I (ciments Portland) ; CEM II (Ciment Portland composé) ; CEM III (ciment de haut fourneau); CEM IV (ciment pouzzolanique) ; CEM V (ciment composé).

Depuis le 1er avril 2002, les ciments courants doivent être conformes à la norme NF EN 197-1 et font l'objet d'un double marquage CE et NF sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance (32,5 – 42,5 – 52,5) définies par la valeur minimale de la résistance du ciment à 28 jours en MPa (selon NF EN 196-1). Pour chacune de ces classes, deux désignations sont établies en fonction de leur résistance à court terme (2 jours et 7 jours) : N pour une prise normale et R pour une prise rapide.

Les liants hydrauliques routiers

Dès la fin des années quatre-vingt, les sociétés cimentières françaises ont mis au point des liants hydrauliques, distincts des ciments courants, dédiés au traitement des matériaux. Ces produits appelés Liants Hydrauliques Routiers (LHR [10]) se sont depuis beaucoup développés. Le GTS [2] les désigne aussi sous l'acronyme LSR (Liant Spécial Routier) et la norme NF EN 13282 sous l'acronyme HRB (Hydraulic Road Binder).

Les LHR répondent essentiellement à trois objectifs : technique (des délais de maniabilité adaptés), économique et environnemental (impacts de fabrication plus faibles).

La gamme des LHR a été progressivement enrichie pour prendre en compte les besoins spécifiques des chantiers tels que le traitement de sols argilo-limoneux, des graves et des sables, des matériaux carbonatés (craie...) mais également des travaux réalisés à des périodes particulières (température basse ou élevée) ou demandant l'obtention d'une portance rapide.

Les Fiches Techniques Produits (FTP) qui peuvent être obtenues auprès des producteurs renseignent plus précisément sur la composition et le domaine d'application.

Les LHR sont couverts par la norme NF EN 13282 :

- ❖ La partie 1 correspond aux LHR dits « à durcissement rapide » dont la teneur en clinker est supérieure à 20% et dont les résistances à la compression sont mesurées à 28 jours, définissant quatre classes (E1, E2, E3 et E4).

- ❖ La partie 2 couvre les LHR dits « à durcissement normal ». Les résistances à la compression sont mesurées à 56 jours. Certains d'entre eux peuvent contenir plus de 10% de chaux vive.

Les liants hydrauliques routiers font l'objet d'un marquage CE attestant de leur conformité à la norme harmonisée NF EN 13282.

A.2 - Actions des liants

(Ce paragraphe fait référence au § A.2 du GTS)

Généralités

L'action des liants sur le sol dépend de :

- ❖ La nature du sol
- ❖ La nature de la composition du liant et de son dosage
- ❖ La compacité atteinte à la mise en œuvre
- ❖ L'âge du mélange
- ❖ Et des sollicitations extérieures (infiltration d'eau, température, vibrations...)

Ces actions sont largement décrites dans le GTS. Le présent guide technique s'attache à décrire et à compléter les informations du guide GTS en précisant les actions qui sont de l'ordre de l'amélioration de celles qui sont de la stabilisation.

Amélioration

Selon la définition donnée par l'AIPCR [5], c'est une opération qui consiste à améliorer par addition d'un liant, les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau naturelle, la plasticité, la sensibilité à l'eau et au gel, l'aptitude au compactage.

L'amélioration d'un matériau est recherchée pour une action à court terme, afin de permettre la traficabilité et la mise en œuvre.

Stabilisation

Selon la définition donnée par l'AIPCR [5], c'est une opération consistant à modifier (généralement à moyen ou long terme) les caractéristiques du sol de manière à l'amener dans un état définitif de stabilité, en particulier vis-à-vis de l'action de l'eau et du gel, et à lui donner une résistance durable pouvant, le cas échéant, être mesurée par des essais typiques de matériaux solides.

La stabilisation d'un matériau est recherchée pour une action à long terme et est intégrée dans le dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée.

A.3 - L'évolution de la prise dans les sols

(Ce paragraphe fait référence au § A.1 et A.2 du GTS)

Les sols sont composés d'assemblages de grains de tailles très variables, allant du micromètre pour les particules argileuses au centimètre pour les sols courants ou au mètre pour les éléments rocheux, d'eau interstitielle et d'air.

Dans les sables et les graves, les liaisons se développent en cimentant les grains entre eux. Dans le cas des sols argilo-limoneux, le processus est plus complexe et fait intervenir à la fois des processus physico-chimique et la qualité de la mouture. La structure minérale des argiles ainsi que la nature des particules fines contribuent au développement des phases cimentaires ou dans certains cas, le perturbent.

Les investigations menées dans le cadre du projet TerDOUEST ont mis en évidence la contribution positive des minéraux du sol sous l'action des liants (Figure 1). Il apparaît qu'à pH basique, et en présence de calcium, les feldspaths, les argiles (de type montmorillonite) et certaines silices amorphes (opale, cristobalite...) libèrent de l'aluminium et du silicium qui participent à la formation des nouvelles phases cimentaires. Ceci est matérialisé par une diminution des concentrations en particules solides, en contrepartie d'une augmentation de la phase cimentaire C(A)SH⁽¹⁾ (Figure 1b), elle-même concomitante à une augmentation des résistances en compression simple (Figure 1a).

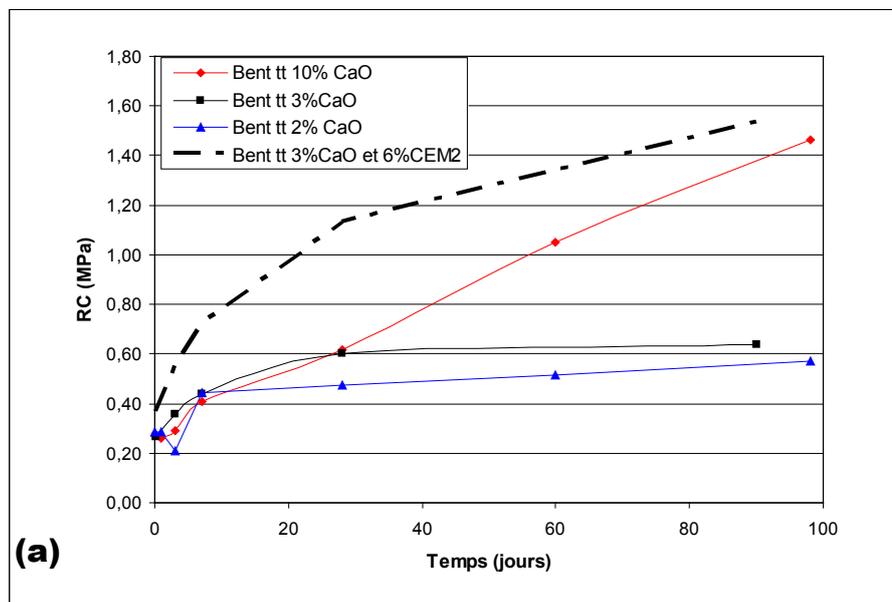


Figure 1.a : Evolution comparée (a) des résistances à la compression simple (Rc en MPa) pour des traitements à la chaux et traitement chaux-ciment.

¹ C(A)SH est une expression simplifiée pour décrire la formule chimique d'un minéral contenant C : des carbonates (CaO), A : des aluminates (Al₂O₃), S : des silicates (SiO₂), et H : de l'eau (H₂O), les composants de base des phases cimentaires

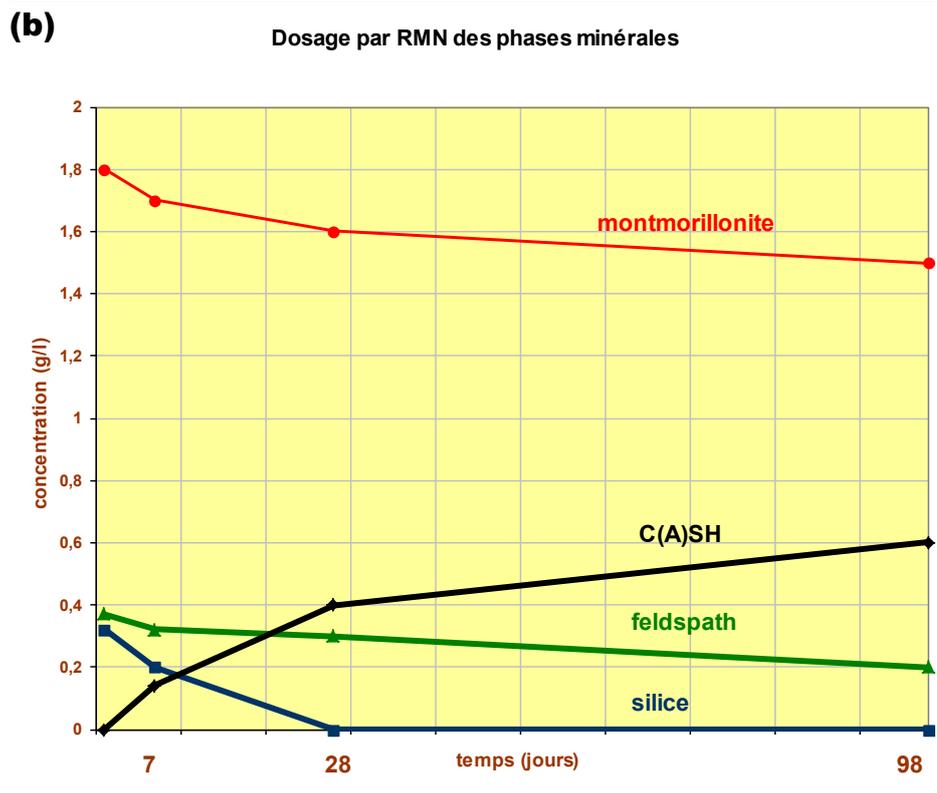


Figure 1.b : Evolution comparée (b) des différentes phases minérales (exprimées en g/l) présentes dans une bentonite calcique traitée à la chaux en fonction du temps [11].

Depuis la rédaction du GTS [2], des travaux (et en particulier le projet TerDOUEST [11]) ont permis de compléter la connaissance sur les effets des éléments chimiques suivants, qualifiés de perturbateurs de prise (Le Borgne, 2010 ; Saussaye, 2012) :

- ❖ Le soufre (sous forme de sulfate ou de sulfure) : en présence de liant, cet élément peut générer des gonflements par création de phases cristallines secondaires (ettringite, thaumasite) avec l'eau, le calcium et l'aluminium disponibles dans le sol (ou dans le liant). Cela peut engendrer des dégradations localisées plus ou moins importantes, voire, dans certains cas, entraîner la destruction totale de la couche traitée.
- ❖ Les matières organiques : toutes ne réagissent pas de la même manière en présence d'un liant. Le pH acide des matières organiques neutralise une partie du liant, le rendant inefficace pour la prise hydraulique. D'autre part, certaines formes contiennent du soufre organique susceptible d'être mobilisé en présence du liant pour créer des phases secondaires gonflantes.
- ❖ Les nitrates (NO_3) : leur présence en forte quantité (supérieure à 2 g/kg) produit des effets limitant la performance mécanique et pouvant même l'empêcher totalement. Mais, à de telles concentrations, les nitrates sont rares dans la nature, à l'exception de certains terrains agricoles ou industriels (engrais, lisier ...).
- ❖ Les phosphates (PO_4) : à des dosages supérieurs à 1,2 g/kg, l'effet des phosphates peut se manifester dans les sols argilo-limoneux en limitant les performances mécaniques. Comme les nitrates, ils sont rarement présents dans les sols et les roches naturels à des dosages préjudiciables, sauf dans certains terrains agricoles ou industriels.

❖ Les chlorures : ils ne sont pas considérés comme des perturbateurs de prise jusqu'à des dosages de 2g/kg. Ils agissent alors plutôt comme des accélérateurs de prise. Cette teneur est rarement rencontrée dans les terrains naturels sauf cas particuliers (roches salines, extraction en bord de mer ...).

❖ Certains minéraux particuliers, comme les micas, peuvent réduire l'efficacité du traitement voire l'annuler complètement. Ces minéraux sont présents par exemple dans certaines arènes granitiques, argiles sériciteuses ou argiles issues de l'altération de schistes sédimentaires.

❖ Dans le cas de roches ou de sols acides, le pH acide neutralise une partie du liant, le rendant moins efficace pour la prise hydraulique. Il convient dans ce cas d'augmenter le dosage en liant pour compenser les effets du pH.

Il faut souligner que l'impact d'un élément chimique ne dépend pas que de sa concentration dans le sol. Le caractère perturbateur d'un élément chimique résulte de la combinaison de multiples paramètres : les propriétés intrinsèques au sol (concentration et répartition de l'élément, forme chimique, argilosité, ..), les caractéristiques du liant (teneur en clinker, chaux, etc.) mais aussi les facteurs environnementaux (température, humidité).

La méthode préconisée pour vérifier l'effet d'un perturbateur de prise en présence d'un liant est d'appliquer l'essai d'aptitude au traitement (NF P94-100). Si l'essai conduit à des résultats douteux au sens de la norme, il convient de les analyser et éventuellement de renouveler l'essai en testant d'autres dosages, d'autres liants ou d'autres conditions de réalisation de l'essai dans le respect de la norme. On peut aussi évaluer les performances par une étude de traitement plus complète (de niveau 1 ou 2 du GTS [2]).

B - Traitement des sols pour les ouvrages en terre

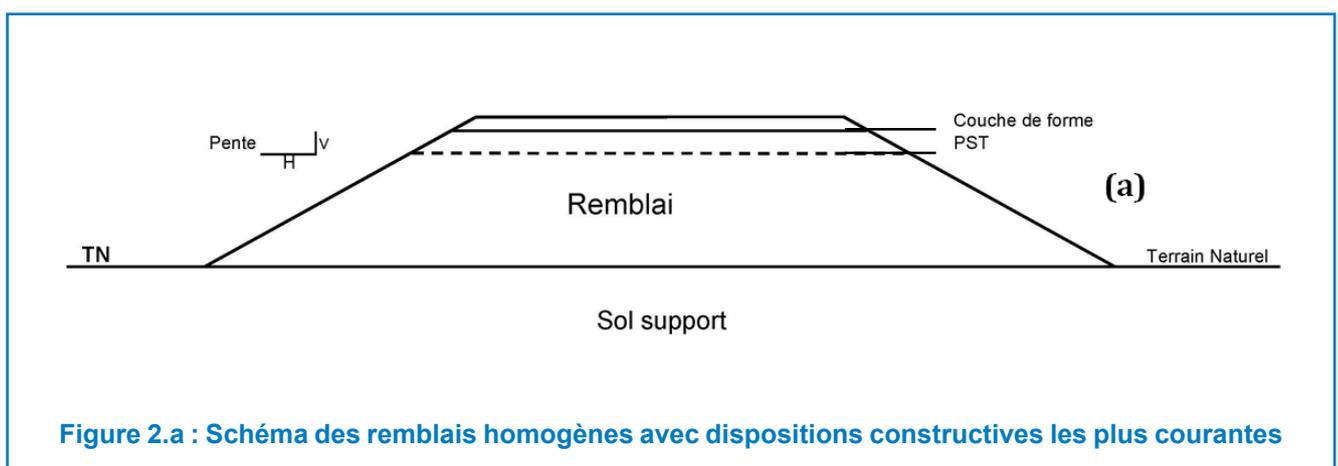
Les remblais sont des ouvrages dont la conception doit prendre en compte l'utilisation maximale des matériaux du site, les contraintes géométriques ou environnementales et les contraintes liées aux différentes parties du projet. Cela requiert un savoir-faire fondé sur la connaissance des propriétés des matériaux naturels ou traités, sur leur capacité à supporter tout ou partie d'une infrastructure, d'un ouvrage ou d'un bâtiment, et sur leur résistance aux sollicitations extérieures.

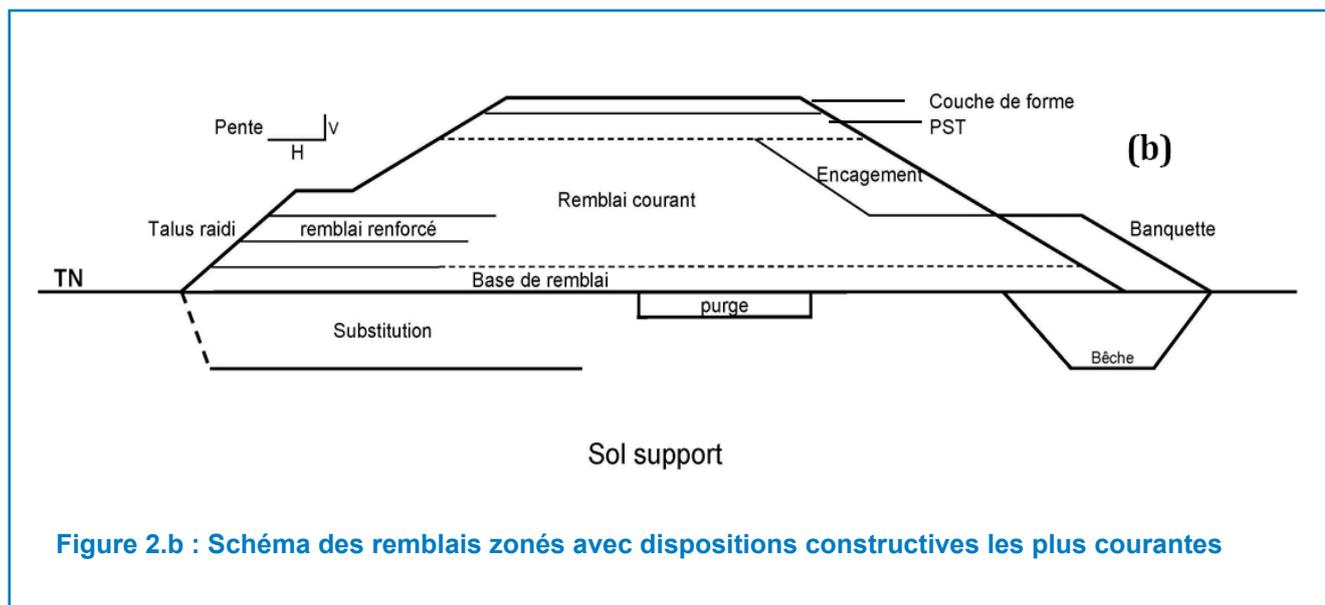
Ni le GTR [1], ni le GTS [2] n'ont détaillé les niveaux de performances liés à la réalisation des parties d'ouvrages en terre. Seul le Guide de Conception des Terrassements [13] évoque pour la première fois la nécessité de distinguer des parties d'ouvrage au sein d'un remblai, chacune étant exposée à un environnement et à des sollicitations particulières nécessitant une adaptation de la modalité de traitement recherchée.

B.1 - Principales dispositions constructives

Les travaux de TerDOUEST ont fait apparaître l'importance d'identifier des techniques de traitement des sols différenciées en fonction de la partie de l'ouvrage en terre réalisée. En effet, chaque partie d'ouvrage nécessite des techniques plus ou moins pointues ou performantes adaptées aux sollicitations et à la durabilité recherchée.

En général, un remblai est homogène (Figure 2 a) et comporte un corps de remblai et une PST (Partie Supérieure des Terrassements). Dans les cas particuliers, le remblai présente un zonage (Figure 2 b) dont chaque partie peut nécessiter la mise en œuvre de matériaux de caractéristiques spécifiques (traités ou non-traités). Le traitement éventuellement recommandé pourra varier selon la partie d'ouvrage concernée et son exposition aux éléments extérieurs.





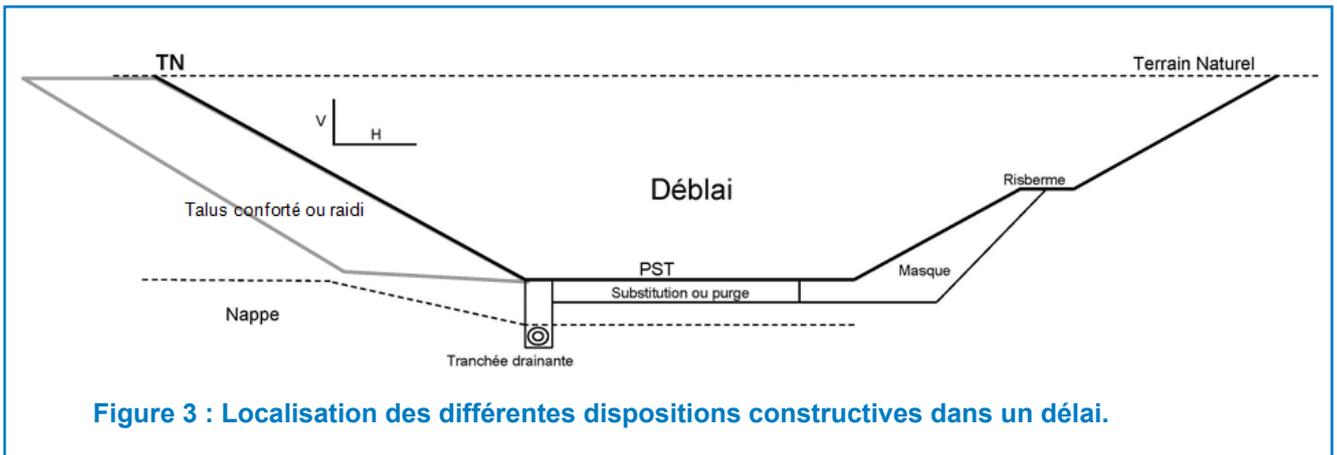
Certaines parties doivent être réalisées avec des matériaux de remblai naturel sélectionnés ou améliorés par traitement, afin d'être conformes à l'objectif requis :

- ❖ Purgé, substitution : remplacement d'un matériau considéré comme impropre par un matériau de remblai sélectionné ou un matériau traité. Dans ce cas et selon le contexte, le traitement vise soit l'amélioration soit la stabilisation.
- ❖ Bêche : partie du sol support sous le pied de talus du remblai améliorant la stabilité de l'ouvrage. Le traitement recherché sera en règle générale de la stabilisation.
- ❖ Base de remblai : cette partie est identifiée lorsqu'elle doit, selon les cas :
 - ◆ assurer la stabilité (cas des ouvrages de grande hauteur)
 - ◆ créer une coupure capillaire (cas des remblais en zones humides, ou en contexte de nappe sub-affleurante)
 - ◆ contribuer au drainage sur sol compressible
 - ◆ protéger contre l'imbibition et/ou l'érosion dans les zones inondables

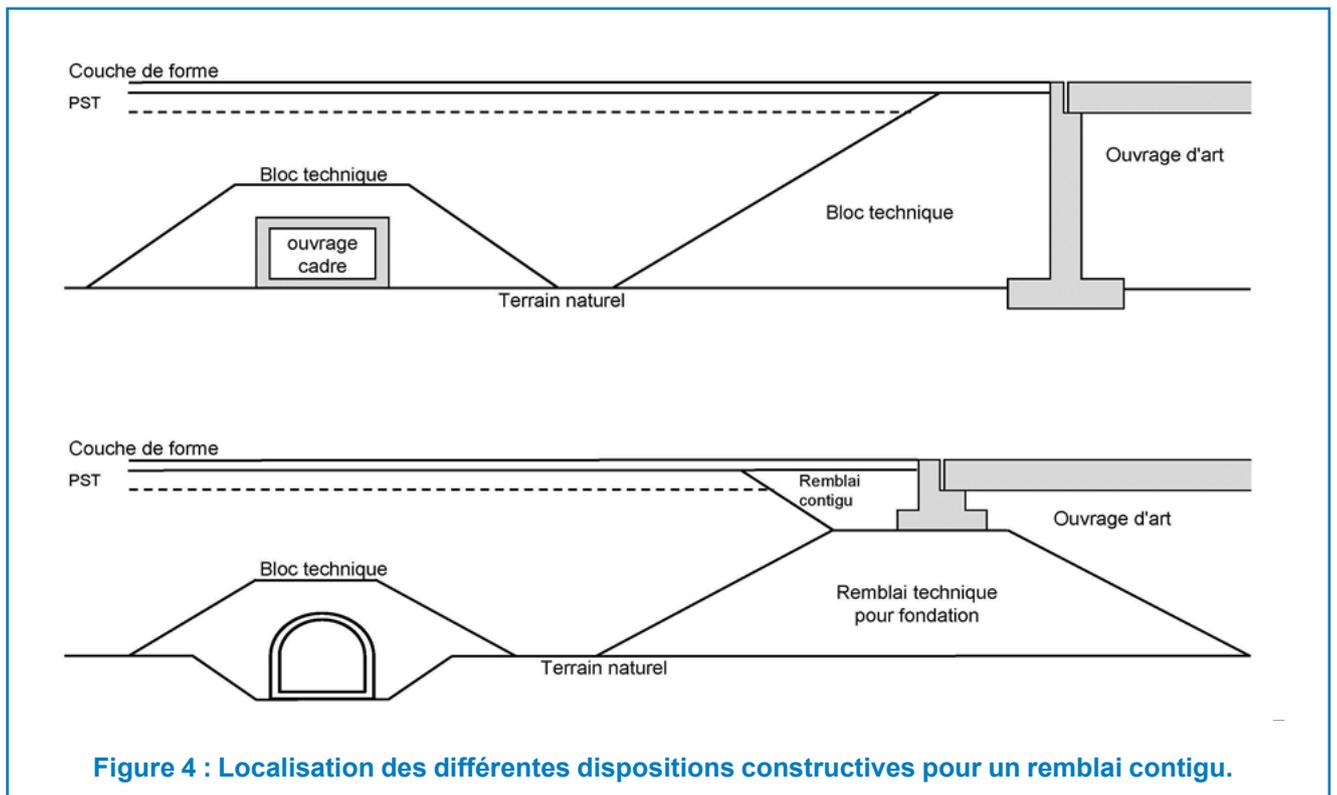
Selon le contexte, et dans le cas d'une solution par traitement de sol, le matériau pourra être stabilisé ou simplement amélioré.

- ❖ Encagement : enveloppe assurant la protection du matériau situé au cœur de remblai (noyau). Le matériau peut être soit amélioré soit stabilisé, selon l'exigence de protection attendue.
- ❖ Talus raidi : pente plus raide que ce que permettent les matériaux naturels, obtenue par une augmentation des caractéristiques mécaniques des matériaux sur une largeur déterminée. Le matériau est stabilisé.
- ❖ PST : la Partie Supérieure des Terrassements est une zone d'environ 1 m d'épaisseur dont les caractéristiques sont prises en compte dans le dimensionnement de la plate-forme. Selon l'arase recherchée, le matériau sera amélioré ou stabilisé.

En déblai, les principales dispositions constructives sont schématisées ci-dessous :



En bloc technique ou en remblai contigu, comme en remblai ordinaire, le zonage peut être envisagé pour répondre à des contraintes ou à des choix techniques (Figure 4). Cela nécessite d'utiliser des matériaux traités ou non-traités et d'appliquer des méthodologies de mise en œuvre particulières.



B.2 - Amélioration des matériaux

(Ce paragraphe fait référence au § B.1 du GTS)

B.2-1 Action sur la teneur en eau

Le GTS [2] développe parfaitement les enjeux du traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols humides. Les sols concernés sont les sols sensibles à l'eau se trouvant, au moment de l'exécution des travaux, dans un état humide, voire très humide, qui ne permet pas leur mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes avec les techniques de terrassements habituelles.

B.2-2 Action sur l'argilosité

Le projet TerDOUEST a démontré la faisabilité du traitement des argiles très plastiques, grâce à l'application d'une méthodologie adaptée et à l'utilisation de matériels de malaxage performants de type pulvimixeur. Le chantier de référence de Héricourt (en Haute-Saône, voir Figure 8 et Figure 9) a été réalisé en appliquant les règles de compactage du GTR [1] des sols A3 pour un sol classé A3/A4, permettant d'obtenir 95% de l'OPN et de garantir la stabilité sous poids propre d'un remblai de 5 mètres de haut.

Principales performances obtenues à Héricourt

Dans les conditions de réalisation du remblai expérimental d'Héricourt, les résultats suivants ont été obtenus [14] [15] :

- ❖ Mouture : une mouture 0/50 est obtenue dès le premier passage de pulvimixeur puis 0/31,5 mm après deux ou trois passes de pulvimixeur ; la mouture ne s'améliore plus au-delà de trois passages
- ❖ Profondeur de malaxage : réglage sur une plateforme de bonne portance d'une couche foisonnée d'argile de 0,50 m d'épaisseur
- ❖ Consignes de compactage pour un objectif remblai : 8 passes de compacteur vibrant pied dameur (VP5) à 3 km/h pour une couche de 0,30 mètre d'épaisseur
- ❖ Délais de maturation : le délai maximal entre le malaxage et le compactage n'a pas excédé 4 heures ;
- ❖ Ordre de grandeur des portances obtenues : à court terme (8 heures après le compactage) les valeurs E_{DYN2} sont supérieures à 50 MPa sur l'arase traitée
- ❖ Masses volumiques sèches : valeurs supérieures à 95% de la référence OPN ($\rho_d > 1,37 \text{ t/m}^3$)
- ❖ Valeurs des teneurs en eau mesurées en cours de chantier sur les différentes couches (numérotées R1 à R11) ; la référence OPN est indiquée par un trait rouge (Figure 5) :

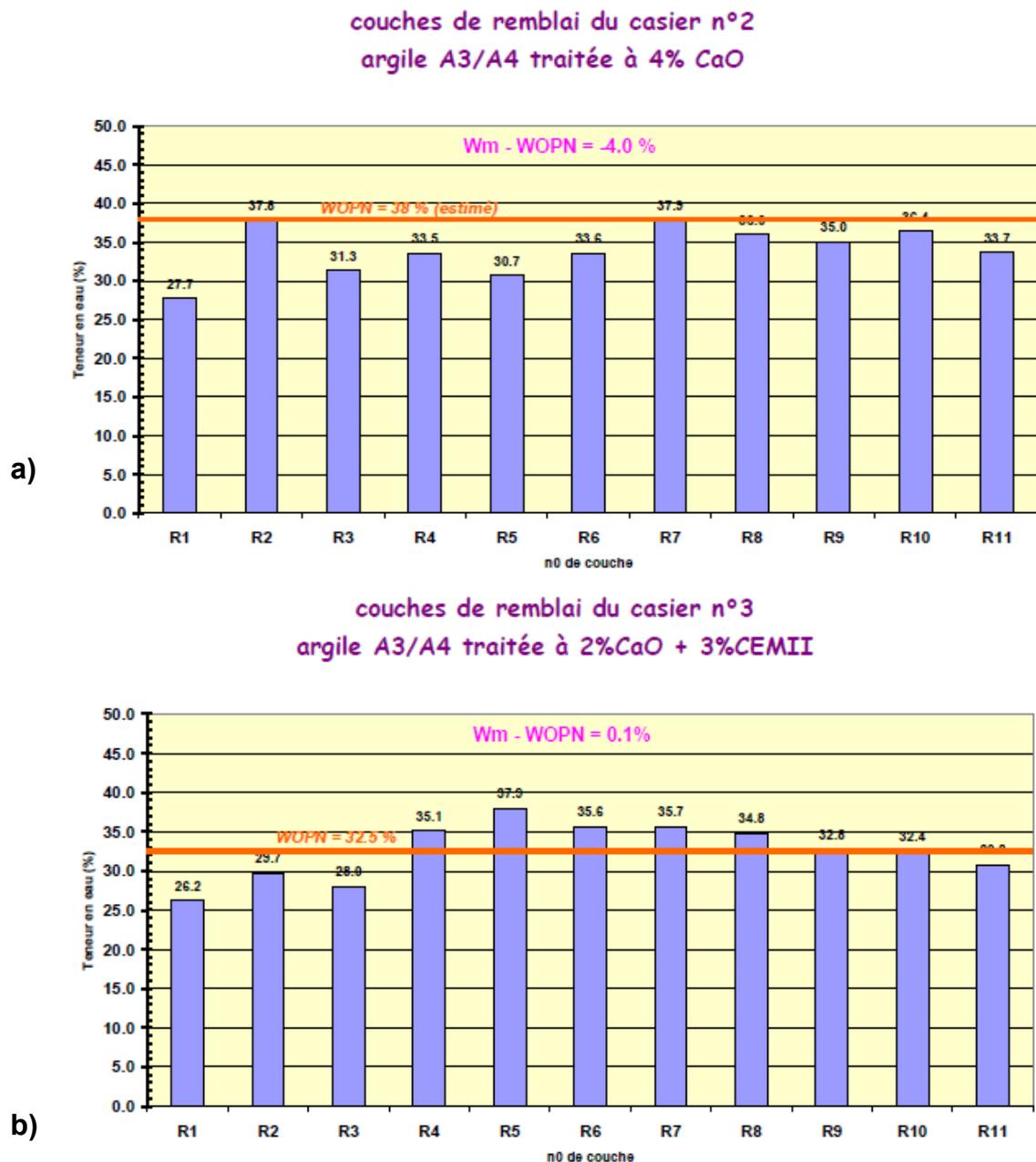


Figure 5 : Synthèse des teneurs en eau mesurées à la réalisation du remblai en argile A3/A4 respectivement traitées à la chaux (a) et chaux-ciment (b).

❖ Evolution des teneurs en eau volumique dans les talus et à la base du remblai : l'enregistrement des données sur 4 ans (voir Figure 6 et Figure 7) montrent des variations plus ou moins cycliques. La base de remblai est fortement sollicitée par les variations de nappe (comme le montrent les courbes vertes et bleues), et le comportement du matériau correctement traité et compacté ne remet pas en cause la stabilité d'ensemble (comme l'illustre la Figure 8), même si les teneurs en eau varient (courbes roses et violettes).

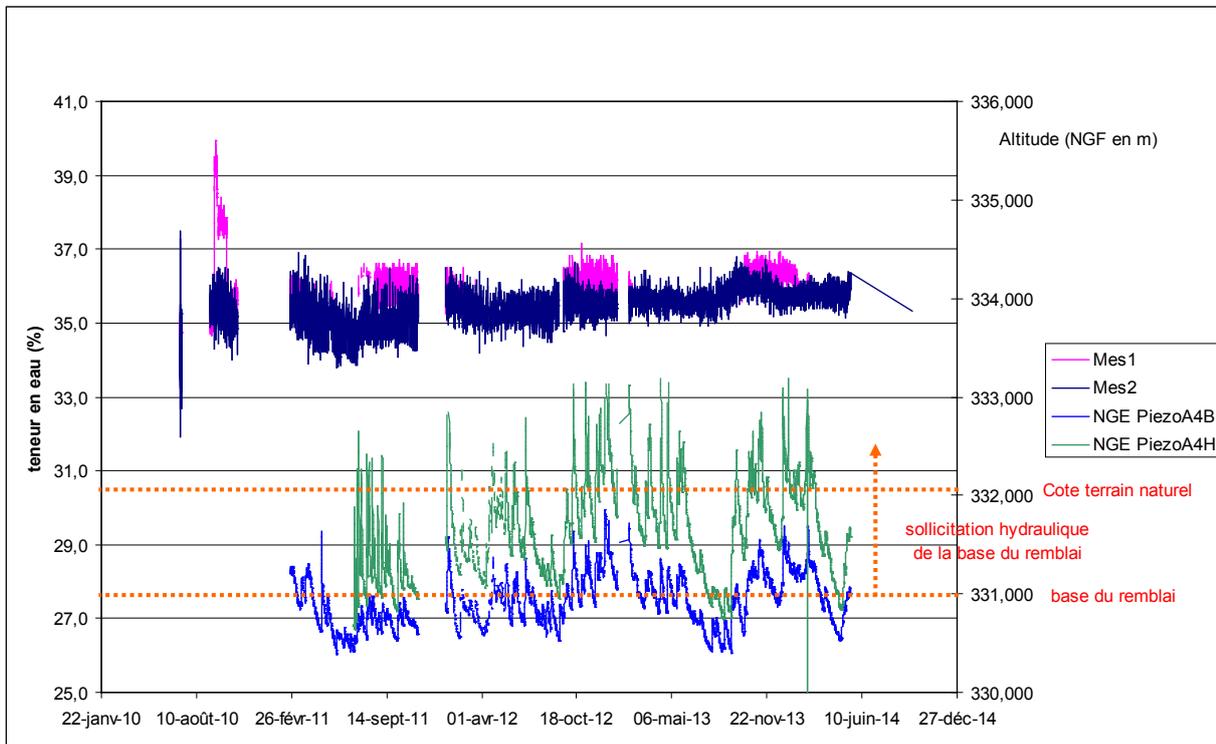


Figure 6 : Evolution des teneurs en eau volumique à la base du remblai en argile traitée 4% au CaO.

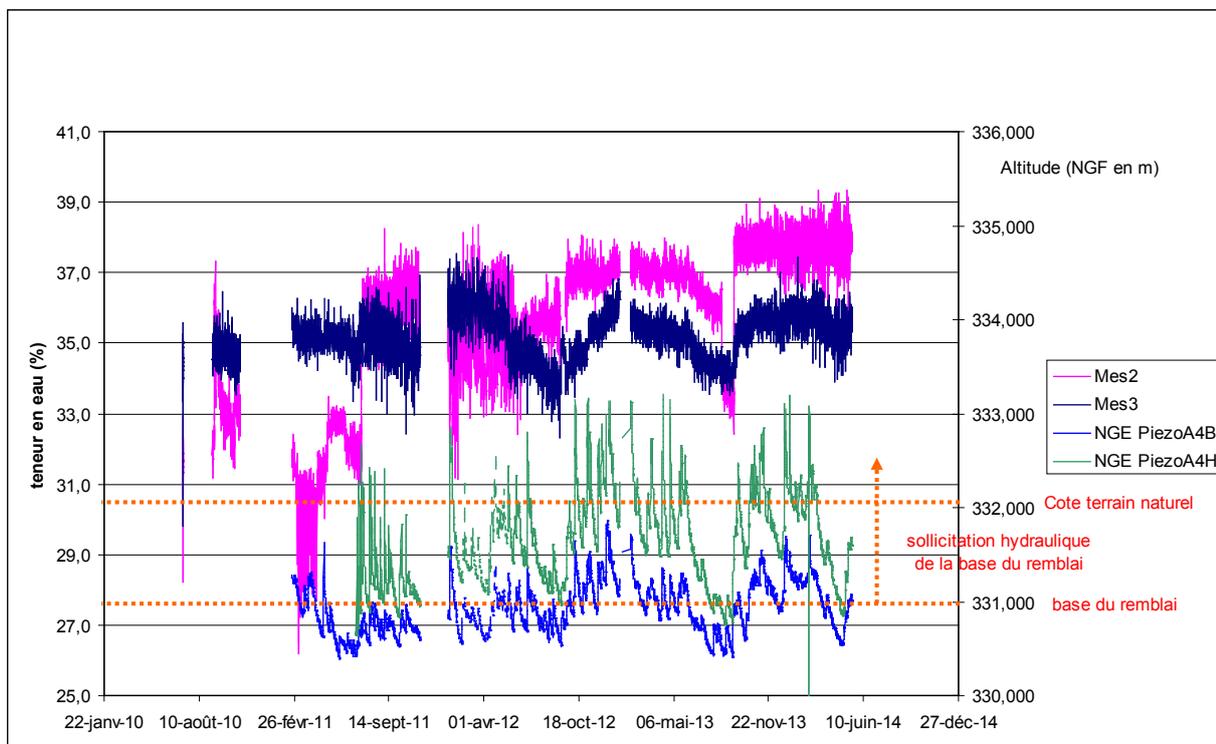


Figure 7 : Evolution des teneurs en eau volumique à la base du remblai en argile traitée 2% CaO et 3% de ciment



Figure 8 : Vue du remblai expérimental (mai 2015) cinq ans après sa construction

Préconisations de réemploi d'argiles très plastiques



Figure 9 : Chantier expérimental de Héricourt (70) avec l'utilisation des argiles A3/A4 traitées en remblai (a) avant traitement ; (b) malaxage ; (c) compactage en remblai ; (d) vue finale

Le projet TerDOUEST permet donc d'ouvrir la voie au réemploi des matériaux argileux très plastiques, classés A4 selon la norme NF P11-300, qui ont les particularités suivantes :

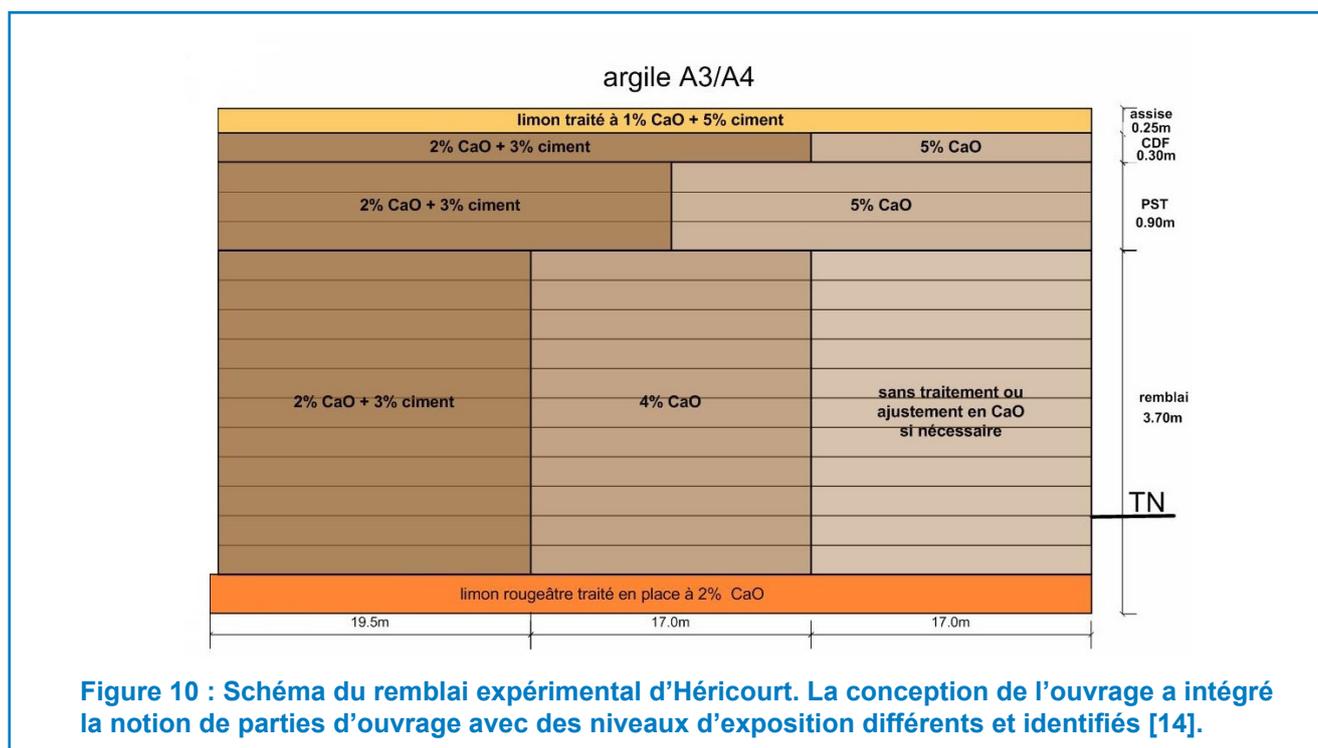
- ❖ Ce sont des argiles ou des argiles marneuses avec un $I_p > 40$ ou une $VBS > 8$
- ❖ Ce sont des sols très cohérents et très peu perméables
- ❖ Ils changent de teneur en eau lentement mais avec d'importants retraites ou gonflements
- ❖ Ils ont un angle de frottement très faible, et une cohésion susceptible de chuter fortement avec l'humidification du matériau

Les études réalisées dans TerDOUEST confirment que le traitement de ces matériaux, en fonction du liant utilisé et de son dosage :

- ❖ Permet de réduire l' I_p et la VBS , en liaison avec la floculation argileuse par la chaux
- ❖ Déplace la limite de retrait et diminue l'amplitude de retrait / gonflement
- ❖ Augmente la cohésion et légèrement l'angle de frottement

Le remblai expérimental d'Héricourt, réalisé et ausculté pendant et après le projet TerDOUEST, conclut au bon comportement des argiles plastiques avec les préconisations suivantes :

- ❖ Identification du matériau et étude de traitement spécifique
- ❖ Mise en œuvre limitée sur remblai de faible hauteur (< 5 mètres)
- ❖ Traitement systématique du remblai : traitement à la chaux et/ou traitement chaux/ciment. Le point de fixation de la chaux (norme ASTM D6276-99a [18]) renseigne sur le dosage minimal en chaux à retenir
- ❖ L'état hydrique « sec » est à proscrire ; ajustement après traitement de la teneur en eau pour viser l'état hydrique « moyen » [1]
- ❖ Utilisation d'une surface de bonne portance pour faciliter l'opération de traitement
- ❖ Malaxage au pulvimixeur avec un objectif de mouture de 0/40 à 0/50 mm
- ❖ Compactage avec un compacteur à pieds dameurs



B.3 - Stabilisation des matériaux

(Ce paragraphe fait référence au § B.2 du GTS)

B.3-1 Généralités

Le projet TerDOUEST a permis d'élargir la liste des essais attendus pour caractériser la performance dans le cadre d'une stabilisation. De nombreux essais de comportement peuvent être utilisés pour cela comme la limite de retrait, la résistance au cisaillement, les indices IPI et CBR, I.CBR après immersion, la VBS, etc.

L'intérêt de la stabilisation de sol par traitement est de pouvoir augmenter les performances du matériau, d'adapter la géométrie de l'ouvrage ou encore de substituer des matériaux granulaires par des matériaux fins rendus insensibles à l'eau.

Liste des caractéristiques recherchées par parties d'ouvrage

La stabilisation des matériaux peut être appliquée, autant que de besoin, à l'ensemble des cas de remblais présentés en introduction du chapitre B.

Pour chaque partie d'ouvrage, l'action du traitement de sol vise à atteindre un ou plusieurs objectifs, tels que :

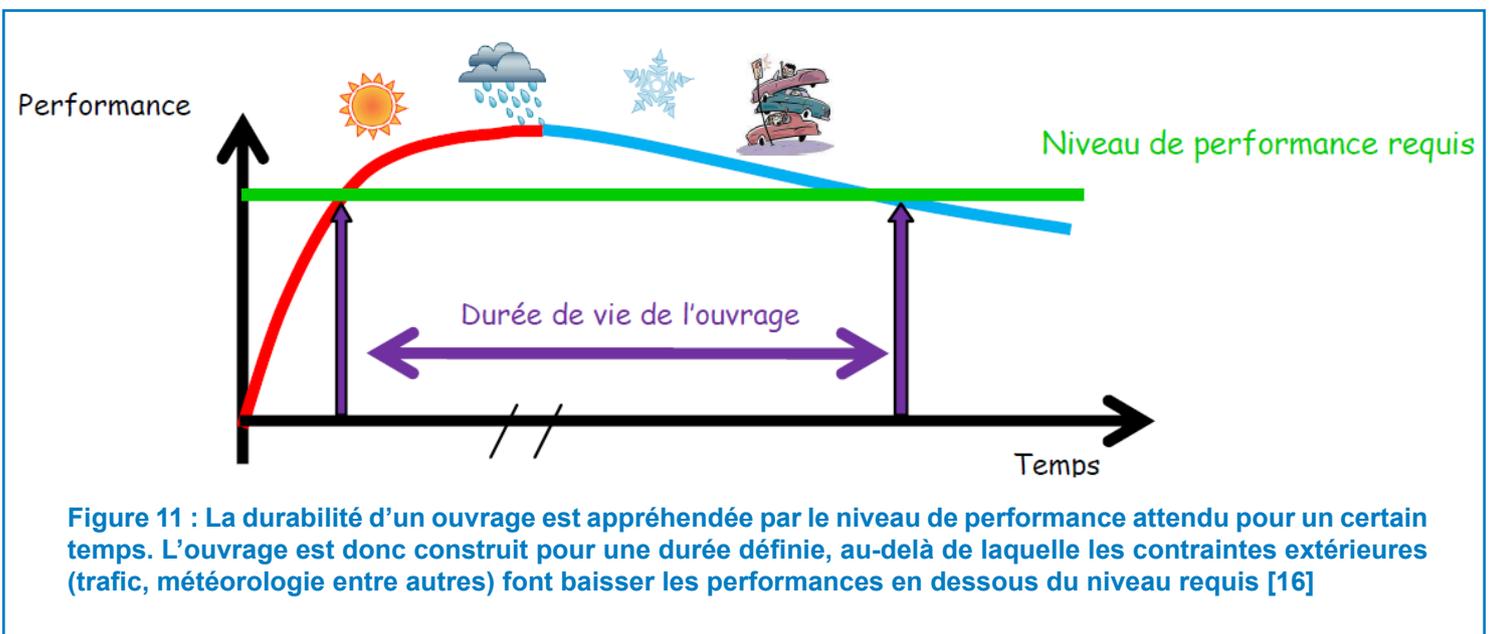
- ❖ Recherche d'une portance
- ❖ Maîtrise du tassement
- ❖ Insensibilité à l'eau
- ❖ Insensibilité au gel
- ❖ Résistance au cisaillement
- ❖ Résistance en compression
- ❖ Résistance en traction/ module
- ❖ Résistance à l'érosion
- ❖ Diminution du retrait-gonflement
- ❖ Maîtrise de la perméabilité

B.3-2 Durabilité

La notion de durabilité doit être abordée par rapport à l'usage recherché pour un ouvrage et des contraintes qui s'appliqueront durant toute la durée de vie de cet ouvrage [16]. La Figure 11 illustre clairement deux notions :

- ❖ La performance attendue d'une partie d'ouvrage / d'un ouvrage pour assurer sa fonction
- ❖ La durée de vie de la partie d'ouvrage / d'un ouvrage au-delà de laquelle des opérations de maintenance ou de réfection sont attendues

Ainsi, la durabilité d'un matériau traité se traduit par son aptitude à conserver les caractéristiques requises, dans les conditions d'usage de l'ouvrage et pour une durée déterminée. Sur la base des résultats obtenus en étude, la durabilité du traitement ne peut être obtenue que si elle est accompagnée d'une technique de fabrication et de mise en œuvre appropriée et maîtrisée.



Les caractéristiques obtenues en étude puis en réalisation (à court terme), peuvent chuter avec le temps et les contraintes extérieures, mais ne doivent pas passer sous le seuil des caractéristiques requises, utilisées pour la justification de l'ouvrage.

Pour définir les dosages adaptés et les conditions de réalisation et de contrôle du traitement, il est indispensable d'analyser :

- ❖ L'homogénéité du gisement et la représentativité des échantillons analysés
- ❖ Les résultats des études de traitement : l'analyse (pouvant être intégrée dans l'analyse de risque) doit tenir compte d'une possible différence entre des échantillons préparés en laboratoire et la réalité du chantier
- ❖ La maîtrise des conditions de réalisation des travaux (homogénéisation des matériaux, mise en œuvre en couche, densification, ...)
- ❖ Les résultats des essais in situ à court terme et ceux attendus à long terme (dimensionnants pour la durée de vie de l'ouvrage).

Plus les exigences de performance attendues sont importantes, plus le matériau avant traitement doit être homogène (notion de gisement) et plus les modalités de traitement sont exigeantes et se rapprochent des méthodes de traitement pour une couche de forme.

Dans le GTS [2], les seules indications sur la durabilité concernent l'étude à 90 jours (ou éventuellement 180 jours) pour les matériaux traités pour couche de forme et les essais I.CBR immersion / IPI.

Le projet TerDOUEST a permis de préciser les sollicitations qui étaient attendues en fonction de la position du matériau traité au sein de l'ouvrage [17]. Ainsi, un matériau situé en bord de talus n'aura pas la même histoire et ne subira pas les mêmes contraintes que le même matériau situé en cœur de remblai : l'influence des circulations d'eau peut jouer un rôle sur la durabilité à travers les phénomènes de dissolution / décalcification et précipitation.

Pourtant, peu de travaux permettent de préciser ces conditions en fonction de leur position dans l'ouvrage. Le GTS [2], dans sa partie B, appréhendait indirectement ces notions par le biais d'essais différents pour accepter les matériaux traités en partie supérieure des terrassements, en zone d'accès difficile, en base de remblai de grande hauteur ou en talus raidi, sans autre précision de géométrie ou de conditions hydriques. Les paragraphes qui suivent définissent plus précisément que ce qui existe dans le GTS [2] les performances recherchées et les essais les plus représentatifs pour évaluer la performance.

B.3-3 Applications

Le projet TerDOUEST a permis de tester les performances des matériaux traités avec l'aide d'autres essais et d'autres paramètres que ceux préconisés traditionnellement par le GTS [2]. Ainsi, dans les tableaux qui suivent, on trouvera des indications complémentaires à celles du GTS [2].

Les tableaux permettent de trouver les éléments d'évaluation de performance pour la partie d'ouvrage considérée, selon deux configurations : un cas dit général, et un cas particulier de performance supplémentaire au cas général. Les essais indiqués dans la ligne « Étude de traitement » sont ceux que l'on estime les plus pertinents pour évaluer la performance. Les indications qui figurent dans la ligne « Méthode de traitement » sont des recommandations de mise en œuvre sur chantier.

Les « critères à contrôler » sont ceux recommandés pour évaluer la performance in situ en fin de chantier.

Partie Supérieure des Terrassements

(Ce paragraphe fait référence au § B.2.1.1 et 2.2 du GTS)

Les Parties Supérieures des Terrassements entrent pleinement dans le dimensionnement des plates-formes. Le travail réalisé en traitement de sol peut donc bénéficier à la structure.

Dans le GTR [1], la PST4/AR2 est réalisée à partir de matériaux sensibles à l'eau, traités sur une épaisseur minimale de 0,30 m et avec une action du traitement qui doit être durable. À cet effet, le GTS [2] privilégie l'objectif $I.CBR_{immersion} > IPI$ obtenu après traitement. Pour garantir ce résultat, la méthodologie de traitement doit être adaptée pour permettre d'obtenir les performances visées. En cas de besoin, l'évaluation de la sensibilité au gel doit faire l'objet d'études spécifiques complémentaires.

Tableau 1 : Niveaux de performance des matériaux traités en Partie Supérieure de Terrassement

PST	Niveau de performance 1 (cas général) le traitement est prévu ponctuellement pour améliorer des états hydriques	Niveau de performance 2 (cas particulier) le traitement est recherché pour stabiliser durablement l'arase
Objectif	AR1	AR2
Fonction recherchée du matériau	Amélioration de la traficabilité (PST3 maximum)	Stabilisation des matériaux vis-à-vis de la portance (PST4)
Etude de traitement	IPI	$I.CBR_{immersion} > IPI$ avec mesure du gonflement (G) – essai pH pour la chaux* – essai d'aptitude au traitement si nécessaire (G_v)
Méthode de traitement préconisée	Traitement en place (charrue ou autre)	- Traitement en place au pulvérisateur à arbre horizontal - Mouture de l'ordre de 0/40 mm - Dosage minimal appliqué > 1% pour prendre en compte la précision de l'épandage
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif $\geq q_4$) EV_2	Compactage (objectif $\geq q_4$) EV_2 représentatif du long terme

* l'essai pH correspond au test d'Eades and Grim de 1966 (ASTM D6276-99a permettant de déterminer le point de fixation de la chaux des sols [18])

Base de remblai en matériaux rendus insensibles à l'eau [20]

Dans les zones inondables, les facteurs d'instabilité sont liés à l'immersion prolongée des matériaux et aux décrues, qui peuvent entraîner une diminution des performances mécaniques, des risques d'érosion interne et d'érosion de surface (ravinement, affouillement), des glissements, etc.

Dans les cas où il est nécessaire de rendre la base des remblais insensible à l'eau, le critère à appliquer est $I.CBR_{immersion} > IPI$. En complément, l'évaluation des caractéristiques intrinsèques (c' , ϕ' , module) pourra s'avérer nécessaire.

Dans les cas plus complexes, on pourra compléter les investigations par des essais caractérisant la résistance à l'érosion interne par des essais d'érosion de trou (voir Figure 16), la tenue à l'érosion de surface par le biais de l'essai MOJET (MOBILE Jet Erosion Test, voir Figure 15), et éventuellement la résistance à la dispersion du matériau dans l'eau par l'essai d'émiettage (voir Figure 17), pour concevoir des solutions appropriées.

Tableau 2 : Niveaux de performance en base de remblai en matériaux rendus insensibles à l'eau

Base de remblai en matériaux rendus insensibles à l'eau	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas particulier)
Fonction recherchée pour le matériau	Résistance à une remontée de nappe ou à une inondation à vitesse de courant peu élevée et de courte durée	Idem niveau de performance 1 + Résistance à une inondation à vitesse de courant élevée et/ou de longue durée
Etude de traitement	Définir le dosage en liant pour l'objectif $I.CBR_{immersion} > IPI$ Compactage au pied dameur dans le cas des sols fins	Définir le dosage en liant pour l'objectif $I.CBR_{immersion} > IPI$ Définir les conditions de stabilité du talus Perméabilité si nécessaire Tenue à l'érosion Résistance à la dispersion si nécessaire
Méthode de traitement préconisée	Mise en œuvre côté humide de l'optimum	Mise en œuvre côté humide de l'optimum, compactage au pied dameur si matériau A et C1A. Mise en œuvre spécifique sur les talus : - Mouture de l'ordre de 0/40 mm (pulvérisateur à arbre horizontal préconisé) - Accrochage entre couches (pied dameur, scarification...)
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif $\geq q4$)	Homogénéité du traitement Compactage (objectif $\geq q4$) Essais d'érosion (p.m.)

Partie basse des remblais de grande hauteur

Elle correspond à la partie du remblai comprise entre le terrain naturel et le niveau moins 15 m par rapport à l'arase.

Le traitement permet d'apporter les performances mécaniques nécessaires à la stabilité de l'ouvrage. L'étude doit apporter les éléments qui seront utiles au dimensionnement.

Tableau 3 : Niveaux de performance en partie basse de remblai de grande hauteur

Partie basse de remblai de grande hauteur	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas particulier)
Fonction recherchée pour le matériau	Stabilité et absence de tassement sous poids propre	
Etude de traitement	Dosage à définir pour une qualité de compactage donnée, fonction de : <ul style="list-style-type: none"> - l'essai d'aptitude au traitement - l'I.CBR_{immersion} > IPI - les caractéristiques mécaniques (c', φ', éventuellement oedométriques) - les Rc à 28 jours (valeur à définir en fonction hauteur du remblai) - les Rc à 14 jours + 14 jours d'immersion (pour la résistance à l'immersion) 	
Méthode de traitement préconisée	Mise en œuvre à l'état « m » côté humide de l'optimum Mouture de l'ordre de 0/40 mm (pulvimixeur à arbre horizontal préconisé)	
Critère(s) à contrôler	Homogénéité du traitement Objectif de compactage cohérent avec ceux imposés à l'étude (q4 ou q3) Préconiser le balayage croisé des compacteurs sur les surfaces	

Remblais contigus aux ouvrages

Les matériaux utilisés en remblais contigus (ou blocs techniques) entrent dans le dimensionnement de l'ouvrage [19]. Les propriétés intrinsèques telles que la cohésion et l'angle de frottement ou encore le module d'élasticité sont des informations importantes à connaître pour justifier le dimensionnement de l'ouvrage.

Le niveau de performance 1 ou 2 est à définir en fonction des enjeux lors de la conception des ouvrages.

Ces valeurs qui entrent dans le dimensionnement doivent être durables : les ouvrages d'art routiers sont en général dimensionnés pour un minimum de 70 ans, les ouvrages ferroviaires pour 100 ans.

Tableau 4 : Niveaux de performance en remblais contigus

Remblais contigus (ouvrage hydraulique, réseaux, ouvrage d'art, mur de soutènement)	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas particulier)
Fonction recherchée pour le matériau	Caractéristiques mécaniques conformes au dimensionnement de l'ouvrage (c' , ϕ') Module de déformation si nécessaire	Caractéristiques mécaniques conformes au dimensionnement de l'ouvrage (c' , ϕ') Résistance à l'érosion (interne ou externe) si nécessaire Absence de gonflement ou de tassement
Etude de traitement	I.CBR _{immersion} > IPI, G IPI minimum	I.CBR _{immersion} > IPI, G Rc à 2 jours, Rc à 14 jours + 14 jours immersion Compatibilité physico-chimique si nécessaire Essais de cisaillement, essai d'érosion si nécessaire
Méthode de traitement préconisée	- Traitement en place au pulvérisateur à arbre horizontal - Mouture de l'ordre de 0/40 mm - Dosage minimal appliqué > 1%	- Traitement en place au pulvérisateur à arbre horizontal ou en centrale - Mouture de l'ordre de 0/20 mm - Dosage minimal : chaux 2 % ou liant hydraulique 3%.
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif $\geq q4$) EV ₂ si nécessaire	Compactage (objectif q3) Essais d'érosion (p.m.) EV ₂ si nécessaire

Purges, substitutions ou bêches

Il s'agit de remplacer un matériau impropre à la fonction recherchée par un matériau qui remplit cette fonction.

Les actions de purges et substitutions sont possibles dans différents cas : assise de remblai, PST en déblai, zone de transition déblai-remblai, etc.

La réalisation d'une bêche est spécifiquement demandée pour stabiliser un ouvrage sur pente.

Les méthodes de traitement préconisées dépendent dans chacun des cas des objectifs recherchés.

Tableau 5 : Niveaux de performance en purges, substitutions ou bêches

Purges, substitutions ou bêches	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas particulier)
Fonction recherchée pour le matériau	Amélioration	Stabilisation
Etude de traitement	IPI	I.CBR _{immersion} > IPI, G Autres résultats conformes aux exigences de l'objectif recherché
Méthode de traitement préconisée	Méthode adaptée à l'objectif, au volume et à l'espace disponible.	Méthode adaptée à l'objectif, au volume et à l'espace disponible.
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif \geq q4) EV ₂	Compactage (objectif \geq q4) EV ₂ Variable selon l'objectif recherché

Talus raidis

Les matériaux naturels ont des caractéristiques intrinsèques qui fixent les angles des talus assurant leur stabilité. Le traitement peut permettre de raidir ces angles sous réserve du respect des conditions de mise en œuvre de cette partie de l'ouvrage qui doit être plus soignée que pour le remblai ordinaire adjacent.

Une attention particulière doit être apportée au réglage des talus (méthode excédentaire...) qui doit être réalisé de manière à ne pas déstructurer le matériau compacté.

Tableau 6 : Niveaux de performance en talus raidis

Talus raidis	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas particulier)
Fonction recherchée pour le matériau	Assurer la stabilité du talus dans des conditions normales d'usage	Assurer la stabilité du talus dans des conditions particulières : gel-dégel, agressivité des eaux internes ou externes, résistance à des poussées...
Etude de traitement	c' et φ' Rc à 2 et 28 jours	Essai d'aptitude c' et φ' Rc à 2 et 28 jours Résistance à l'immersion (Rc 14 jours +14 jours immersion) Autres résultats conformes aux exigences de l'objectif recherché
Méthode de traitement préconisée	- traitement au pulvérisateur à arbre horizontal ou traitement en centrale - Mouture de l'ordre de 0/40 mm	- traitement au pulvérisateur à arbre horizontal ou traitement en centrale - Mouture de l'ordre de 0/40 mm - accrochage entre couches (pied dameur, scarification...)
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif q4)	Compactage (objectif q3)

Ouvrage à perméabilité maîtrisée

Dans certains cas, il peut être utile de rechercher des perméabilités faibles ($< 10^{-6}$ m/s) : fonds de déblais avec des sols argileux, environnements vulnérables (aléa dissolution, ressource en eau vulnérable), fonds de bassins ...

Il ressort des études de TerDOUEST [21] que la perméabilité d'un matériau traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, peut convenir à la réalisation d'ouvrages à faible perméabilité. Le traitement permet, dans ce cas, de répondre à la fois à un objectif de performance mécanique et de perméabilité pour l'ouvrage.

Il a été prouvé que l'obtention de perméabilités faibles repose sur le principe de mise en œuvre déjà connu et pratiqué pour les barrages avec des matériaux non traités, à savoir :

- ❖ Mise en œuvre côté humide du Proctor ($w > 1,10 w_{OPN}$)
- ❖ Compactage par pétrissage au compacteur à pieds dameurs
- ❖ Compacité $\geq 95\%$ de l'Optimum Proctor Normal.

Ces résultats s'expliquent par une réorganisation texturale due au traitement et au compactage, qui conduit à une modification de la porométrie, en diminuant la proportion des macropores (supérieurs à $1 \mu\text{m}$) et en augmentant celle des micropores (inférieurs à $1 \mu\text{m}$). Cela se traduit par une diminution de la masse volumique sèche, sans variation notable de la perméabilité (pour une même énergie de compactage).

En marge du projet TerDOUEST, des essais en laboratoire, validés par des mesures en vraie grandeur sur le remblai expérimental de Rouen, ont permis de constater que des sols A1 et A2, traités à 2% et 3% de chaux, vive ou hydratée, mis en œuvre et compactés selon les conditions préconisées ci-dessus, permettaient d'obtenir des valeurs de perméabilité inférieures à 10^{-8} m/s dès le jeune âge (28 jours), et qui sont restées stables sur une période d'observation de 2 ans.

Cependant, la perméabilité globale d'un ouvrage par rapport à celle du matériau traité qui le compose est, quant à elle, dépendante du comportement de l'ouvrage dans le temps et notamment de sa capacité d'adaptation aux conséquences des effets thermiques et des tassements différentiels. Si de tels effets sont à craindre, le recours à des matériaux traités trop rigides (cas du traitement associant les liants hydrauliques) est à écarter au profit de matériaux (traités ou non) plus souples.

Tableau 7 : Niveaux de performance en faible perméabilité

Faible perméabilité	Niveau de performance 1 (cas général)	Niveau de performance 2 (cas général)
Fonction recherchée pour le matériau	Perméabilité	Idem niveau 1 + Caractéristiques mécaniques spécifiques
Etude de traitement	Essai d'aptitude $I.CBR_{immersion} > IPI$ Perméabilité	
Méthode de traitement préconisée	$w\% > 1,1 w_{OPN}$ Pulvérisateur à arbre horizontal Compacteur pied dameur	
Critère(s) à contrôler	Compactage (objectif $\geq q4$) Perméabilité	

B.4 – Réalisation : études, mise en oeuvre, contrôles

B.4-1 – Nouvelles pratiques pour la réalisation des études de traitement

Les études de traitement pour stabiliser les parties d'ouvrages détaillées (Figure 2, Figure 3 et Figure 4) doivent s'adapter aux objectifs de performances attendus et détaillés dans les paragraphes du chapitre B3.3.

Le GTS [2] détaille de manière très complète les études nécessaires pour l'amélioration en remblai et la stabilisation pour la couche de forme. A l'issue du projet TerDOUEST, il est proposé de compléter ces approches dites traditionnelles par de nouveaux essais et de nouvelles approches :

- 1 - Essais de caractérisation du matériau et de l'homogénéité du gisement
- 2 - Essai d'aptitude au traitement
- 3 - Essai pH pour le traitement à la chaux
- 4 - Essais de résistance à l'érosion et d'émiettement dans l'eau
- 5 - Essai de résistance au cisaillement (évaluation de c' et ϕ')
- 6 - Essai de gonflement à l'œdomètre
- 7 - Résistance mécanique, avec et sans immersion
- 8 - Essai de perméabilité

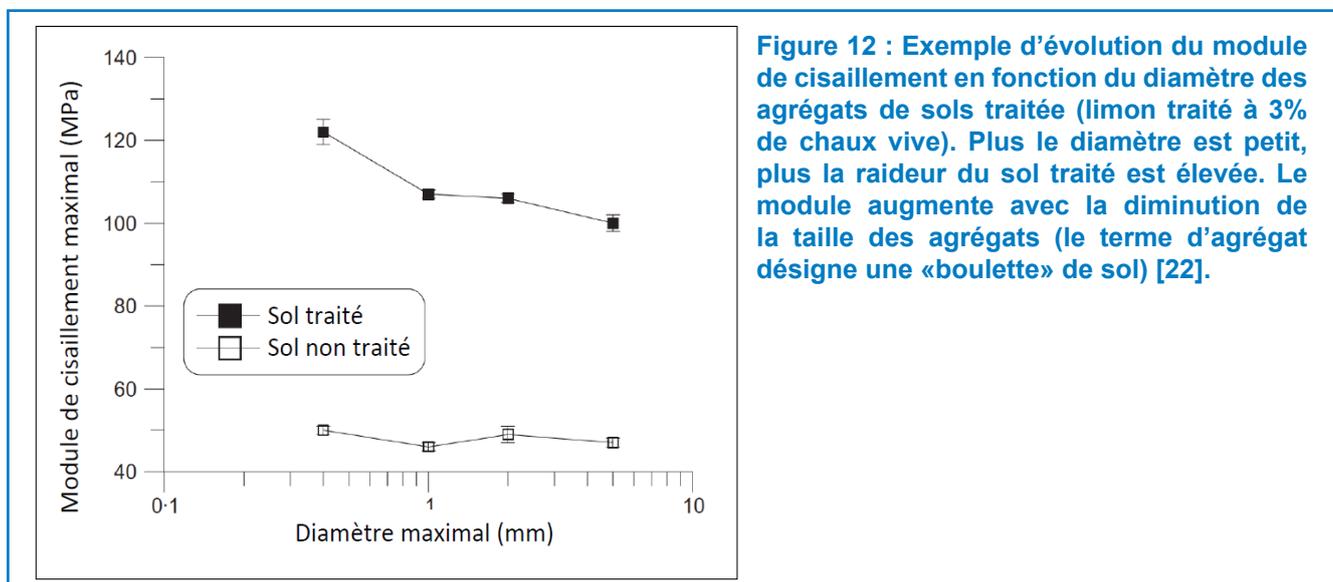
Ces essais ne sont pas listés par ordre de priorité : celui-ci est à définir à l'initiative du géotechnicien, en fonction des enjeux.

Il est important de préciser que pour chacun de ces essais, les conditions de préparation des éprouvettes sont prépondérantes sur le résultat à obtenir. Chacun de ces points doit faire l'objet d'un descriptif précis dans le cadre du PV d'essai.

Conditions de réalisation des éprouvettes

TerDOUEST a confirmé l'importance des conditions de réalisation des éprouvettes et a permis de préciser leurs effets sur les résultats tels que :

❖ La finesse de la mouture : plus la mouture est fine, meilleure est la performance du mélange (voir Figure 12).



❖ La durée du malaxage : le temps de malaxage a une influence sur la répartition du liant au sein de la matrice [23]. Il est important d'adapter le temps de malaxage à la finesse de la mouture recherchée. Le malaxage permet la bonne répartition du produit de traitement et ainsi le développement de la performance.

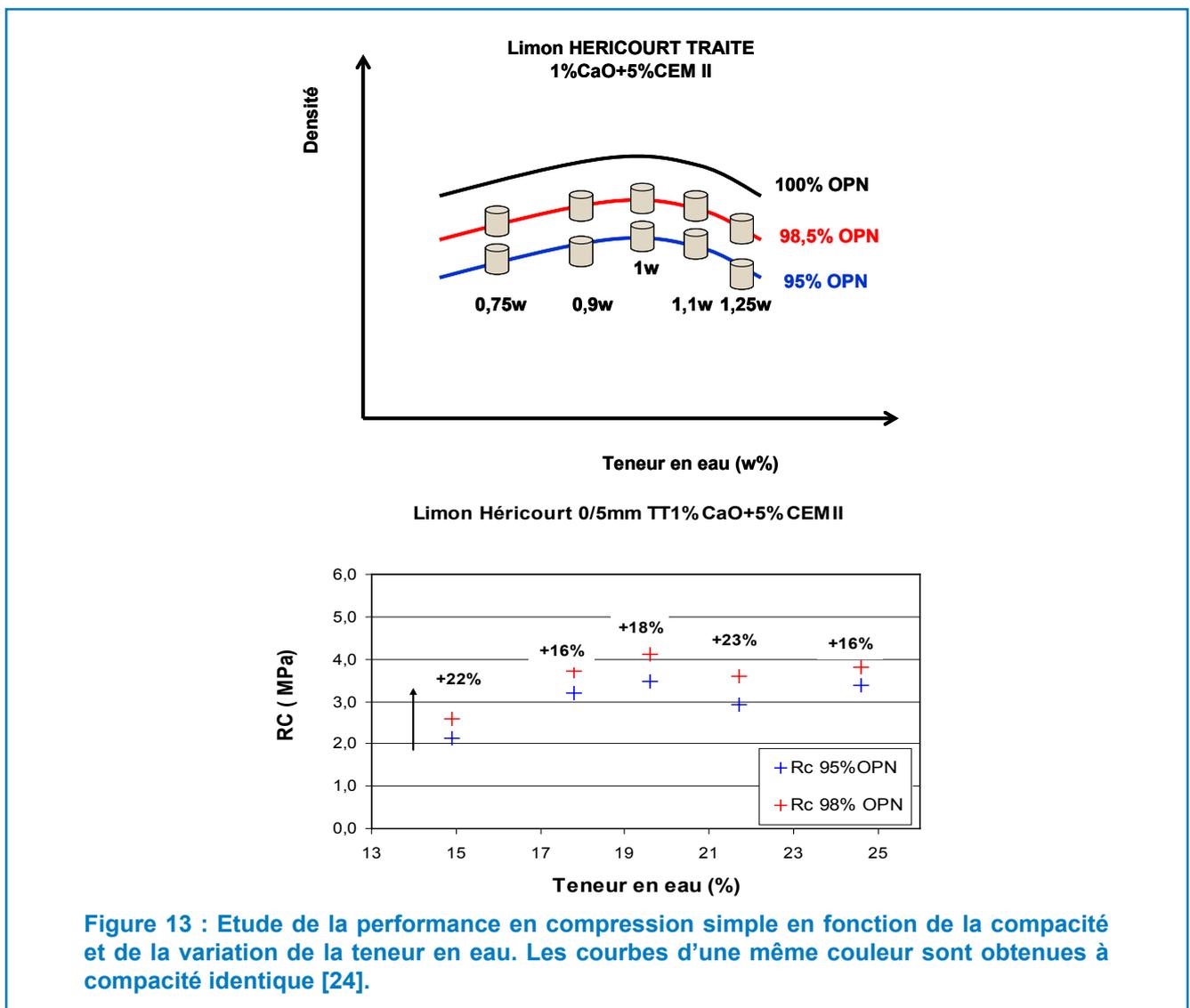
❖ Les conditions de réalisation des éprouvettes : les résultats des essais sont étroitement liés :

* Aux délais de réalisation des éprouvettes (malaxage, compactage)

** Au mode (air, eau) et au temps de conservation des éprouvettes

*** Au délai de cure avant mise en immersion

❖ La compacité : augmenter la compacité (entre l'énergie normale et modifiée) permet d'augmenter de manière significative les performances mécaniques du matériau traité (cf annexe 7 du GTS) (voir Figure 13), de l'ordre de + 20%.



❖ La teneur en eau : des teneurs en eau trop faibles (Figure 13), inférieures à 0,9 w_{OPN} , font diminuer les performances mécaniques. Une augmentation de l'énergie de compactage se traduisant par une augmentation de la compacité permet de compenser partiellement ceci.

Les essais et approches nouvelles

1- Caractérisation du matériau et de l'homogénéité du gisement

Dans le cas des opérations de traitement des sols, la nature géologique des formations est une étape importante à connaître avant les identifications GTR [1].

Ainsi, on aura une première approche concernant la minéralogie des matériaux, tels que présence de pyrite, de gypse, de matière organique, de micas... qui peuvent perturber le déroulement de la prise (§ A.3).

Selon l'enjeu du chantier, il conviendra d'affiner ces informations par des analyses spécifiques : dosage en sulfate, analyses Diffraction des Rayons X (DRX), lixiviation, Microscope Electronique à Balayage (MEB)...

L'homogénéité du gisement est un préalable pour connaître le volume de matériau qui sera disponible pour le chantier et sur lequel on pourra mener l'étude de traitement. L'homogénéité peut se caractériser sur la base des VBS, de l' I_p , de l'analyse granulométrique. Ces critères sont à considérer au même titre que celui proposé par le GTS pour les couches de forme, qui sensibilise sur la variation de la masse volumique sèche de l'Optimum Proctor Normal. Ce critère, relativement lourd à mettre en œuvre, peut se révéler insuffisant ou peu pertinent.

Le tableau C1-II du GTS permet de préciser le nombre d'essais à réaliser en fonction du volume du gisement.

Tableau 8 : Tableau C1 – II du GTS : Nombre minimal d'essais nécessaires pour caractériser un gisement

Volume (V) de couche de forme à réaliser (m ³)	Essais d'identification géotechnique	Formation connue et supposée homogène †	Formation connue et supposée moyennement homogène †	Formation inconnue
V < 10 ⁴	Nature *	1	3	9
	État hydrique ☉	2	4	16
10 ⁴ < V < 10 ⁵	Nature *	V / 10 ⁴	3V / 10 ⁴	9V / 10 ⁴
	État hydrique ☉	2V / 10 ⁴	4V / 10 ⁴	16V / 10 ⁴
V > 10 ⁵	Nature *	10	30	90
	État hydrique ☉	20	40	160

* Les essais concernés ici sont ceux permettant de classer le sol suivant sa nature selon la classification de la norme NF P11-300

☉ Principalement évalué à partir de mesures de la teneur en eau naturelle supposées représentatives de la saison des travaux. Si la période de travaux n'est pas connue et que ce facteur est influent (dans le cas de gisement à faible profondeur ou influencé par les fluctuations annuelles d'une nappe, par exemple), une réflexion appuyée autant que possible sur des mesures ou des constatations est nécessaire pour estimer, sur un cycle annuel, les états hydriques extrêmes possibles

† Cette appréciation suppose être donnée par un géotechnicien ayant une bonne connaissance des formations locales

2 - Essai d'aptitude au traitement

On se référera à la norme NF P94-100 qui rappelle que l'essai est utile pour vérifier l'absence de gonflement et le niveau de résistance atteint. La valeur de résistance obtenue ne doit pas servir pour le dimensionnement.

Une augmentation des délais de cure des sols traités avant leur immersion peut avoir une influence positive sur les résultats.

3 - Essai pH selon le test d'Eades and Grim de 1966

L'essai pH, tel que cité dans la littérature, fait l'objet d'une norme américaine ASTM D6276-99a [18].

Dans le cas où la stabilisation est recherchée (avec un traitement à la chaux uniquement), cet essai permet de définir un ordre de grandeur du dosage en chaux minimal à appliquer. En effet, la formation de phases secondaires dépend de plusieurs facteurs dont la teneur en chaux.

Plusieurs études suggèrent que les phases cimentaires n'apparaissent pas si la quantité de chaux ajoutée n'est pas suffisante. La quantité de chaux à introduire doit être supérieure à un seuil appelé « Point de Fixation de la Chaux » (PFC).

Ce seuil correspond à la quantité minimale de chaux qu'il faut ajouter pour satisfaire complètement l'échange cationique (qui correspond à la saturation des argiles en calcium). Au-delà de ce seuil, une partie de la chaux est utilisée pour satisfaire complètement l'échange cationique et l'autre partie pour le développement des réactions pouzzolaniques.

Des dosages supérieurs à 2% ne sont pas à exclure en fonction de la performance recherchée (pérennité du traitement) et de l'argilosité du matériau.

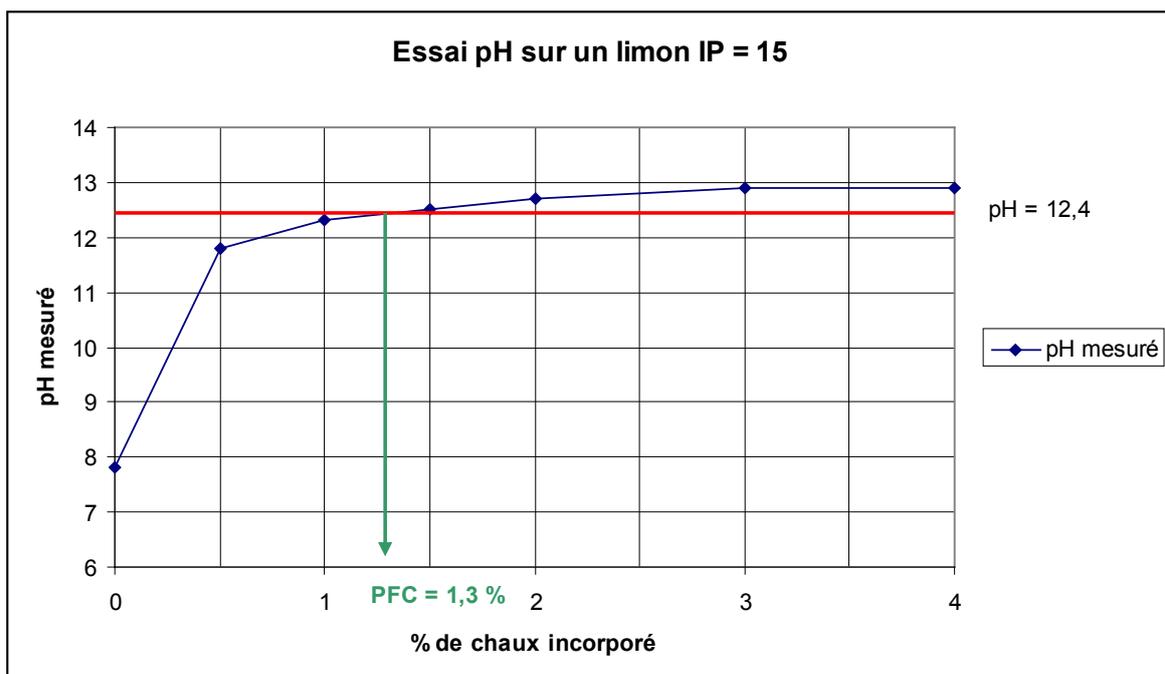


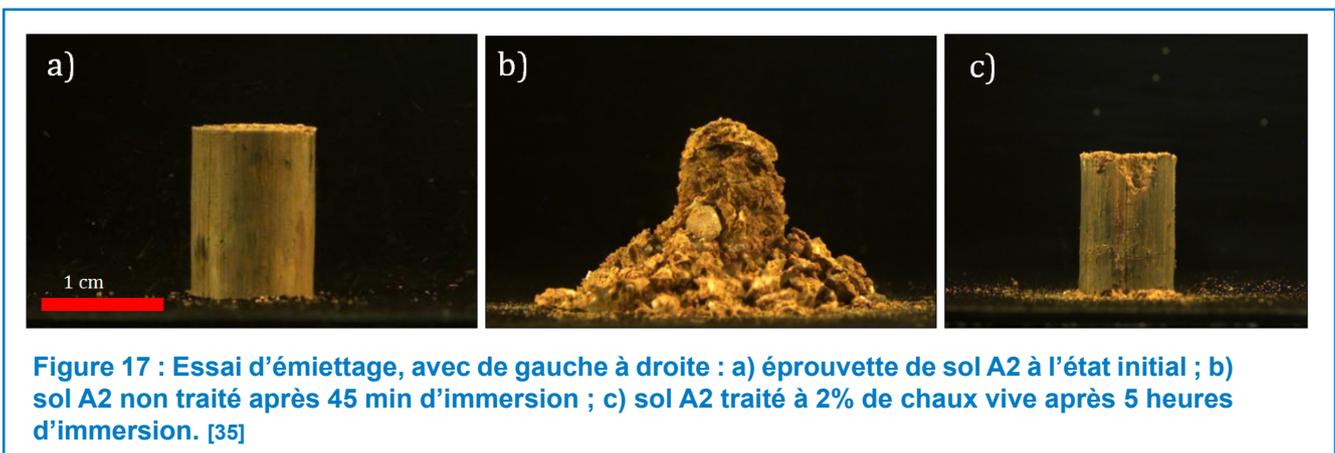
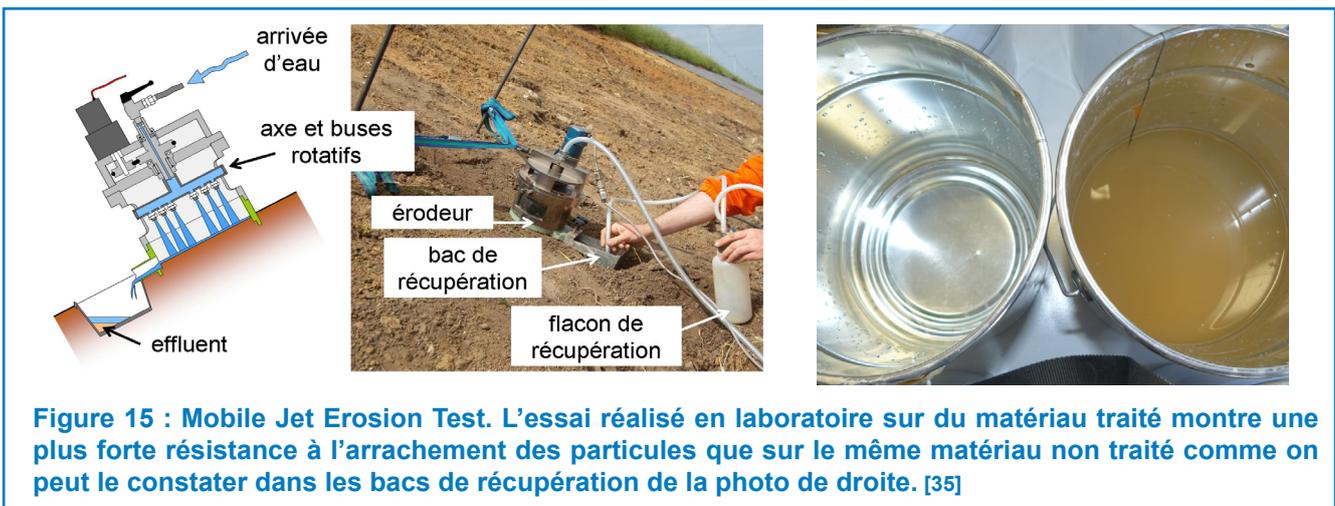
Figure 14 : Evolution du pH d'une suspension de sol+chaux dans l'eau, en fonction du dosage en chaux.

4 - Essais de résistance à l'érosion et d'émiettement dans l'eau

Les essais qui permettent de caractériser la résistance à l'érosion ne sont pas encore normalisés. Ils permettent de caractériser néanmoins la résistance à l'érosion interne (phénomène de renard...) et à l'érosion de surface (ravinement, affouillement, batillage...) grâce à des essais d'érosion sur site (MOJET – MOBILE Jet Erosion Test – voir Figure 15) ou par des essais en laboratoire (essai d'émiettement - Figure 17, et essai d'érosion de trou - Figure 16).

Des essais menés sur des matériaux traités aux liants ont montré que le traitement améliorait les performances des matériaux par rapport aux phénomènes érosifs liés à l'eau.

A titre d'exemple, les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus sur des matériaux traités à la chaux [25].



Les figures ci-dessus illustrent la différence de comportement entre un sol à l'état naturel et un sol traité (ici à la chaux vive).

5 - Essai de résistance au cisaillement

Les essais traditionnellement réalisés sur des éprouvettes de sols non traités peuvent être utilisés pour rechercher les paramètres c' et ϕ' des matériaux traités. Cependant les normes d'essais actuelles ne précisent pas les modalités d'essais qui permettent de prendre en compte l'efficacité de la prise dans le temps (délai de cure), les conditions de réalisation de l'éprouvette et les contraintes qui s'exercent dans le remblai.

Il s'agira de préférence de tester les éprouvettes avec des essais triaxiaux Consolidé Drainé (CD). Dans ce cas, les résultats obtenus sont à interpréter avec discernement par des géotechniciens confirmés, car les valeurs sont souvent très élevées.

6 - Essai de gonflement à l'œdomètre

Des essais simples permettent d'évaluer les effets du gonflement : il suffit de mesurer la pression de gonflement (méthode dite du gonflement libre) sur des échantillons de sols testés à l'œdomètre. Pour ce qui concerne les matériaux traités, il convient de compléter le PV d'essai en précisant les modalités de confection de l'éprouvette (mouture, délais de cure avant réalisation de l'essai, modalité de compactage, compacité ...). La Figure 18 et la Figure 19 montrent l'intérêt d'un traitement pour réduire voire annuler le potentiel de gonflement des argiles et ceci d'autant plus que le dosage en liant est élevé [26].

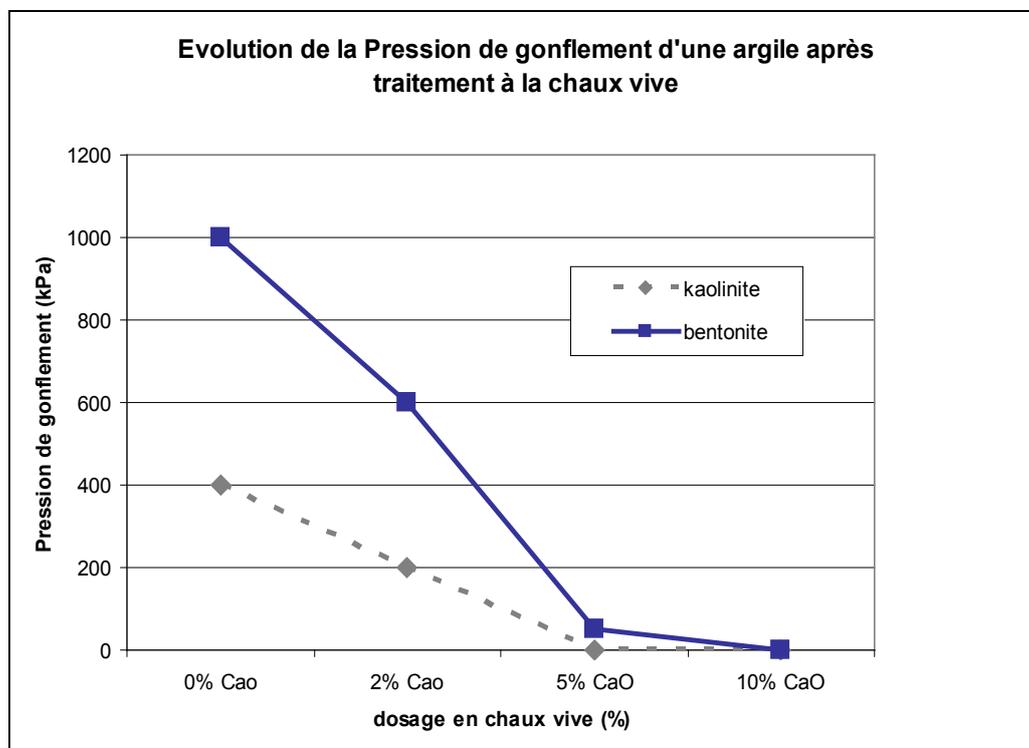


Figure 18 : Evolution de la pression de gonflement de deux argiles type (IP = 162 pour la Bentonite, composée à 85% de smectite gonflante et IP = 27 pour la Kaolinite, composée à 90% de kaolinite) en fonction du dosage en chaux vive (résultat CRMD). Les échantillons ont été confectionnés à 100% de la W_{OPN} . La pression de gonflement diminue d'autant plus que le dosage en chaux vive augmente [26].

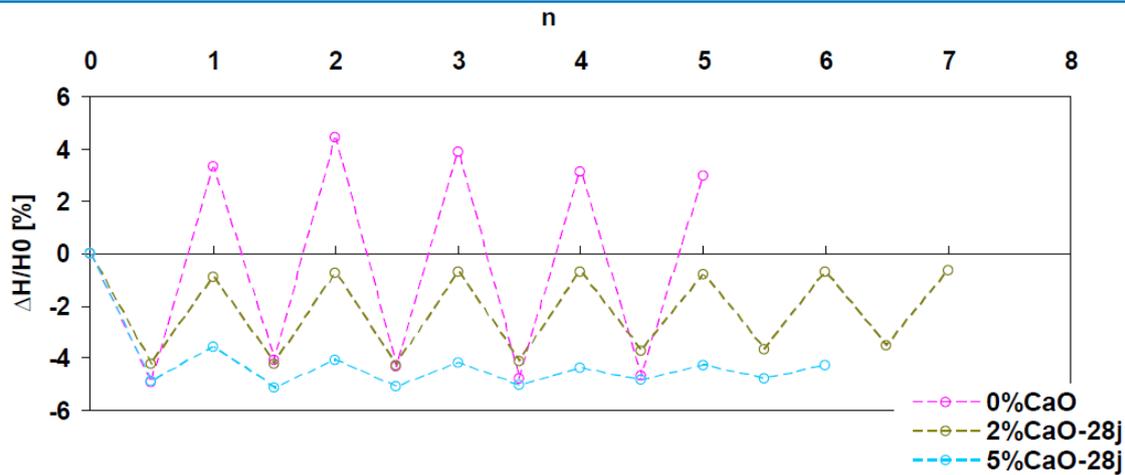


Figure 19 : Evaluation du gonflement sur une argile A3 / A4 (Héricourt) traitée à la chaux après plusieurs cycles de séchage puis d'imbibition (méthode osmotique) et après une cure de 28 jours. Le matériau naturel a un potentiel de retrait-gonflement de près de 8% de variation en hauteur. Ce pourcentage diminue à 3% avec un traitement à la chaux de 2%, et passe à environ 1,5% de variation avec un dosage en chaux de 5% [17].

7 - Résistance mécanique, avec et sans immersion

Ces études mécaniques (compression simple ou diamétrale) sont couramment réalisées pour les traitements pour couche de forme. Dans le cas des remblais, les mêmes approches peuvent être développées. Les délais de cure préconisés sont a minima ceux du GTS (cf page 84 du GTS, §2.2) mais d'autres modes de conservation peuvent être préconisés.

En cas de vérification de la résistance à l'immersion, on pourra faire soit des essais après 14 jours de cure à l'air suivis de 14 jours dans l'eau, ou comme pour les couches de forme (page 108 du GTS, §3.6.2), 28 jours de cure à l'air suivis de 32 jours d'immersion.

L'utilisation de méthode avec immersion et étuvage, est très pessimiste et très conservatrice, mais elle est cependant très souvent prise comme référence dès que l'on tente d'évaluer la durabilité. D'autres méthodes moins brutales, de type osmotique ou plus généralement de contrôle de la succion en gardant le sol non saturé [17], s'approchent de la réalité, et l'impact des cycles est beaucoup plus mesuré.

8 - Essai de perméabilité

Un matériau est perméable si les vides qu'il renferme sont continus. La valeur de perméabilité dépendra de la taille et de la distribution des pores. Plus les pores seront petits, plus la perméabilité sera faible. Dans le cas des matériaux traités, les perméabilités sont faibles à très faibles, ce qui nécessite un temps de saturation plutôt long. Il est important de maîtriser les conditions de réalisation des éprouvettes ayant une incidence sur la perméabilité : temps et vitesse de malaxage, mouture, teneur en eau (côté humide du Proctor), compactage (par pétrissage)...

Les essais suivants peuvent être pratiqués pour évaluer la perméabilité des matériaux traités :

- ❖ En laboratoire : essai oedométrique, essai triaxial, essai au perméamètre. Dans ce cas, la réalisation des essais de perméabilité doit prendre en compte le niveau de compactage, le délai de cure, la qualité du contact du matériau avec les parois du moule. Il convient de vérifier également l'absence de fissure de retrait pouvant fausser l'interprétation de l'essai.
- ❖ In situ : essai au simple anneau, au double anneau, essai Nasberg.

B.4-2 – Réalisation : retours d'expérience sur ouvrages anciens, évolution des pratiques (cas des A4)

Le projet TerDOUEST a permis de faire un retour d'expérience sur un ouvrage ancien réalisé en matériaux traités et deux ouvrages expérimentaux.

Il s'agit :

- ❖ Des remblais raidis de la LGV Est [27]
- ❖ Du remblai expérimental de l'autoroute A304 [28]
- ❖ Du remblai expérimental d'Héricourt [29]

On pourra ajouter à cette liste :

- ❖ L'auscultation de la couche de forme de la LGV Atlantique – lot 33 [30] en sable B5 traité au ciment, dont les mesures montrent un très bon comportement au bout de 20 ans avec des valeurs de résistances très élevées, supérieures à celles constatées initialement.

Les enseignements tirés de ces travaux conduisent à insister sur le respect des règles en matière de réalisation des travaux :

- ❖ L'homogénéité du gisement en nature et teneur en eau. Il s'agit a minima de rester dans la classe GTR du matériau identifié lors de l'étude et de considérer les écarts par rapport à la VBS ou l' I_p , le passant à 80 μ m, ou éventuellement pd_{OPN}
- ❖ La maîtrise de la mouture : le contrôle s'assurera d'une mouture inférieure à 40 mm si l'objectif est de stabiliser les matériaux
- ❖ La maîtrise du dosage et de sa répartition sur l'épaisseur prévue. Les conditions de traitement doivent permettre d'obtenir une bonne homogénéisation du mélange, le dosage à appliquer sur chantier est celui défini par l'étude. Le dosage effectivement épandu doit prendre en compte la dispersion liée au matériel, à la technique d'épandage (la correction appliquée doit garantir que le dosage est à minima celui de l'étude en tout point)
- ❖ Le respect du délai de maniabilité et du temps de maturation dans le cas d'un pré-traitement à la chaux. On rappelle que ce délai est déterminé en laboratoire à 20°C : il faut l'adapter aux conditions réelles du chantier ; à défaut on pourra adopter la règle suivante : une variation de 10° fait varier le délai d'un facteur « 2 » (par exemple : 6 h à 20° = 3 h à 30°)
- ❖ La maîtrise du compactage : les objectifs de compactage sont variables selon les parties de remblai réalisées et le niveau de performance recherché (q4 ou q3 selon les tableaux du paragraphe B.3-3)
- ❖ La protection de surface selon les cas (émulsion, eau, surépaisseur, végétalisation ...).

Le respect de ces préconisations conduit à assurer la durabilité des performances, y compris dans le cas des matériaux à forte plasticité (cas des A3 et des A4).

B.4-3 – Contrôles

Les contrôles habituellement retenus pour vérifier la qualité des travaux et les performances sont ceux prévus dans le GTS. Ils porteront notamment sur :

- ❖ Les matériaux
- ❖ La qualité des produits de traitement
- ❖ La mise en œuvre (dosage, mouture, épaisseur, compactage...)
- ❖ La géométrie
- ❖ Les performances (déflexion, portance...)
- ❖ Les délais de cure
- ❖ ...

On attirera l'attention sur la pratique des carottages en place qui sont délicats à réaliser. La vitesse de rotation, le fluide utilisé, la pression sur l'outil ou le type d'outil sont (entre autres) des paramètres pouvant grandement influencer la qualité du résultat. De mauvaises conditions de réalisation de l'opération peuvent induire de la fissuration, une désagrégation du matériau, une rotation de l'éprouvette dans le carottier et donc altérer l'intégrité des carottes.

C'est pourquoi, en l'état actuel des choses, le seul résultat factuel pouvant être utilisé après un contrôle par carottage est la vérification de l'épaisseur du traitement et éventuellement la vérification des masses volumiques.

La recherche de performances spécifiques pour des applications particulières peut conduire dans certains cas à retenir, en plus des essais traditionnels, les essais de type :

- ❖ Essai pressiométrique
- ❖ Essai pénétrométrique
- ❖ Mesure de perméabilité
- ❖ Essais de cisaillement

Leur interprétation doit être faite avec beaucoup de précaution compte-tenu du peu de retour d'expérience dans leur pratique, et de l'influence non négligeable du délai de cure sur les performances des matériaux traités

C - Couche de forme traitée en place

Le projet TerDOUEST a peu fait évoluer les connaissances déjà nombreuses dans le domaine des couches de forme traitées.

Depuis la rédaction du GTS, on a pu constater des évolutions de matériels qu'il est intéressant de relever ici, notamment concernant :

- ❖ Les nouvelles générations d'épandeur : dosage plus précis
- ❖ Les nouvelles générations de malaxeur : puissance plus élevée – mouture plus fine
- ❖ Les nouvelles générations de centrales : capacité de traiter des sols fins humides à la chaux – mouture fine
- ❖ L'utilisation d'arroseuse - enfouisseuse d'eau : dosage plus précis, meilleure répartition de l'eau

TerDOUEST a permis de réactiver les réflexions sur la prédiction des performances mécaniques à long terme en se basant sur des mesures à court terme mais à des températures élevées (40 à 50°C). D'autres réflexions sont toujours d'actualité concernant les effets du gel sur les performances d'un sol fin traité à la chaux.

Le remblai expérimental d'Héricourt est surmonté d'une couche de forme en matériau A3/A4 traité à la chaux seule et à la chaux et au ciment. Cette couche a été sollicitée dynamiquement avec des essais spécifiques. Il est encore trop tôt pour se prononcer sur le comportement à long terme de ces matériaux utilisés en couche de forme.



D - Développement Durable

Dans le cadre du projet TerDOUEST, les acteurs du domaine des terrassements ont décidé de s'associer pour établir conjointement une méthodologie et un jeu d'indicateurs pertinents pour évaluer l'impact sur les trois piliers du développement durable (environnement, économie et sociétal) des travaux de terrassements et de traitement des sols [31].

La démarche de TerDOUEST propose à l'ensemble des acteurs, qu'ils soient Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre ou Entrepreneurs, des éléments permettant de procéder à une analyse de l'impact de ces travaux.

Pour procéder aux analyses selon les normes et les différents indicateurs, les limites du système « terrassement » ont été fixées. Elles vont de l'origine des matières premières utilisées pour la réalisation des travaux de terrassements, y compris la couche de forme, jusqu'à la gestion des déchets et des excédents de chantier.

Par ailleurs, il faut préciser que la notion de cycle de vie (du berceau à la tombe), notion clé utilisée pour l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), n'est considérée pour les ouvrages de terrassement que pour la phase de construction de l'ouvrage en terre. Les étapes « vie en œuvre » et « fin de vie » d'un ouvrage n'ont pas vraiment de sens dès lors que l'ouvrage reste en l'état ad vitam aeternam après sa phase de construction et dans la mesure où les conditions d'usage ne changent pas (trafic, sollicitations...).

Ainsi, s'il est pertinent de mener une réflexion « développement durable » dans les limites du système terrassement fixées ci-dessus, il ne faut pas oublier que, ramenés à l'unité de temps, les impacts dus aux travaux de terrassement comparés à l'utilisation totale de l'infrastructure, sont faible à négligeables.

D.1 - Détermination des indicateurs

Le projet TerDOUEST a permis d'établir une liste d'indicateurs pertinents au regard des trois piliers du développement durable répartis en trois groupes d'indicateurs discriminants, vis-à-vis des enjeux du Développement Durable.

Ces lots d'indicateurs ajoutent aux indicateurs environnementaux découlant de la norme d'Analyse de Cycle de Vie (NF EN ISO 14040 « Analyse du cycle de vie – Principes et Cadres »), des indicateurs complémentaires à caractère économique et sociétal.

Il est de la responsabilité des Maîtres d'Ouvrage de pondérer chacun d'eux d'un coefficient pour procéder à l'analyse globale des projets selon les enjeux qui leur sont propres. Les indicateurs de développement durable (DD) proposés par TerDOUEST sont les suivants :

Intitulés	Modalités de calcul
1. Indicateurs environnementaux	
Emission de GES (Changement climatique)	Quantité de Gaz à Effet de Serre émis exprimée en équivalent CO ₂
Acidification atmosphérique	Quantité de gaz acides émis exprimée en équivalent SO ₂
Consommation de ressources énergétiques	Consommation d'énergie primaire non renouvelable exprimée en MJ
Consommation de ressources non renouvelables	Somme des masses de matériaux naturels prélevés en carrière ou en emprunt et des quantités de minéraux utilisés pour la fabrication des liants en tonne
Consommation directe d'eau par le chantier	Consommation directe d'eau par le chantier en incluant les eaux de surface, eaux de nappe phréatique, eaux du réseau potable et eaux de pluies si collectées sur le chantier
Potentiel d'eutrophisation	Emissions dans l'air et l'eau conduisant à une eutrophisation des eaux de surface. Le calcul est réalisé suivant les modalités exposées dans la norme NF P01-010 et le résultat exprimé en équivalent ion phosphate.
Production de déchets	Tonnages de déchets (inertes, non dangereux, dangereux) générés directement et indirectement par le chantier
Surfaces défrichées et restaurées	Total des surfaces défrichées en zone agricole et forestière (ha), Rapport entre surfaces restaurées suivant les définitions et surfaces défrichées en zone agricole et forestière.
2. Indicateurs sociétaux	
Exposition des riverains aux nuisances du chantier	Durée des travaux de terrassement
Taux de fréquence d'accidents liés au chantier	Calcul du TF sur la base des données internes de l'entreprise selon la formule de la CNAM-TS.
Sécurité routière des riverains	Nombre de poids lourds x kilométrage moyen des poids lourds sur voie publique
3 Indicateurs économiques	
Coût de construction	Coût de construction
Création d'emplois directs locaux	Nombre d'emplois créés en CDI, CDD ou intérim dans un territoire avoisinant les 45 km du tracé.
Recours direct aux entreprises locales	Montant des matières premières et des services achetés
Fatigue du réseau routier	Nombre de mouvements de poids lourds avec un PTAC supérieur 10 tonnes.
Valorisation des déblais	Volume de déblai réutilisé pour la réalisation du chantier (remblai, couche de forme, assise, merlons, digues)
Valorisation des déchets du BTP	Volume et % de matériaux issus des filières de recyclage et de valorisation des déchets du BTP utilisés sur le chantier.

Ces indicateurs peuvent être utilisés pour procéder à une analyse de risque (selon le §D.3) en comparant des solutions de chantiers de terrassement faisant appel ou non à des techniques de traitement des sols.

On mentionnera l'existence d'un projet européen (ECOLABEL) visant à élaborer une certification européenne pour les routes, avec la prise en compte d'indicateurs de développement durable.

D.2 - Retour d'expérience RN 7

Le chantier de terrassement et de traitement de sols de la déviation de la RN 7 Chaingy-La Pacaudière, a été l'occasion pour le projet TerDOUEST de procéder à une analyse de cycle de vie à partir des données réelles recueillies sur le chantier [32].

Les informations obtenues ont été intégrées dans le logiciel ECORCE et sont disponibles aujourd'hui dans une version internationale multi-bases de données (<http://ecorcem.ifsttar.fr>). Ce logiciel présente les résultats des analyses selon la norme d'Analyse de Cycle de Vie permettant une évaluation environnementale des impacts quantifiant notamment les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), la consommation d'énergie (EE), les ressources...[33].

Ainsi la consommation globale moyenne de gasoil sur ce chantier a été de 0,98 litre/m³. Cette valeur permet de confirmer des estimations connues de longue date. Dans le cadre particulier de ce chantier, nous avons également obtenu des valeurs plus fines de consommations d'engins en les différenciant entre eux et en étudiant en détail le mouvement de terres et les distances parcourues par les différents engins [34]. Il est toutefois difficile de les généraliser.

Des variantes avec et sans traitement de sol ont pu être étudiées grâce à ces données pour mettre en perspectives différentes solutions au plan environnemental.

D.3 – Analyse de risque

La spécificité des chantiers de terrassement est liée à la nature même de l'objet qui est travaillé, à savoir le sol, avec toute sa complexité héritée de son histoire géologique.

Sur l'ensemble des postes liés à la réalisation d'un ouvrage, les travaux de terrassement subissent ainsi la majeure partie des aléas pouvant être rencontrés. Cela se répercute notamment sur les coûts, les délais, les performances et les impacts sur l'environnement et justifie l'intérêt de conduire une analyse de risque quantifiant ces différents postes.

Les études techniques, menées à chaque phase du projet, permettent de réduire les risques et de définir la conception des ouvrages en terre et la réutilisation des matériaux du site en toute connaissance de cause.

L'analyse du risque est une méthode qui permet d'identifier les aléas, et d'en quantifier les conséquences.

La méthodologie présentée ci-dessous est issue des travaux de TerDOUEST dont le parti pris a été de réaliser l'analyse de risque en comparant un cas de chantier en « matériau traité » et un cas de chantier en « matériau non traité » [35].

Terminologie

Dans le cadre du projet TerDOUEST, les définitions suivantes ont été adoptées :

Aléa: évènement redouté et incertain. C'est lorsque l'aléa survient que le risque peut apparaître. Contrairement au risque, l'aléa n'est pas quantifiable. Il convient d'évaluer sa probabilité d'apparition et sa gravité.

Risque : c'est l'éventualité que les travaux ne s'exécutent pas conformément aux prévisions en raison de l'apparition d'un ou plusieurs aléas. Ces écarts par rapport aux prévisions peuvent être considérés comme acceptables, difficilement acceptables, voire inacceptables. Le risque est identifiable et quantifiable.

Identification des aléas

La première étape de la démarche consiste à identifier les grandes familles d'aléas pouvant générer des risques.

Les différentes familles d'aléas choisis ont été classées en 4 grandes catégories :

1. Les aléas liés à l'environnement physique du chantier (géologie, urbanisation, hydrologie...)
2. Les aléas liés à l'imprécision des données d'entrée (qualité des études en topographie, géotechnique, hydrogéologie...)
3. Les aléas liés aux conditions météorologiques
4. Les aléas liés à la réalisation des travaux de terrassement (programmation, conduite du chantier, méthodologie...).

Pour chaque famille d'aléas, il est précisé les évènements redoutés lors du déroulement du chantier et les impacts attendus lors de la réalisation des travaux. Ces impacts travaux sont assimilables aux risques et peuvent être différents en fonction du choix de la solution de couverture du risque.

Le tableau ci-après présente des exemples d'aléas identifiés par famille et donne un exemple d'évènements redoutés en comparant les conséquences pour un cas de chantier en « matériau traité » (T) et un cas de chantier en « matériau non traité » (NT).

Tableau 10 : Exemples non exhaustifs d'aléas [35]

Thème étudié	Aléas redoutés
1- Aléas liés à l'environnement physique du chantier	
Terrain (géologie, hydrogéologie, géotechnique)	
Ressources en matériaux	Capacité de production des carrières locales inférieures aux prévisions
Purge	Augmentation des volumes de purge
Disponibilité de matériaux naturels valorisables en PST ou CDF dans le cadre du projet.	Diminution du volume de matériaux nobles élaborés à partir des déblais
Valorisation des déblais	Matériaux inaptes au traitement
Hydraulique de surface	Zones humides non identifiées dans les études
Activité humaine	
Travaux en zone péri-urbaine ou industrielle	Présence de sols pollués
2- Aléas liés à l'imprécision des données d'entrée	
Données d'entrée topographiques + libération emprise + données réglementaires (protection environnement)	Volume de déblai inférieur aux prévisions
	Volume de remblai supérieur aux prévisions
Données géotechniques	Volume de matériaux réutilisables inférieur aux prévisions
3- Aléas liés aux conditions météorologiques	
Données météorologiques	Pluviométrie supérieure aux prévisions
	Gel au moment de la réalisation des arases et PST
4- Aléas liés à la réalisation des travaux	
Circulation à l'extérieur des emprises	L'itinéraire de transport prévu n'est pas autorisé
	Circulations de poids lourds interdites en période de ramassage scolaire
	Augmentation des déviations provisoires de 10 %
Période de démarrage des travaux	Démarrage en période défavorable

Evaluation et hiérarchisation des risques

Chaque aléa doit faire l'objet d'une analyse permettant d'évaluer la gravité (G) en cas de survenue de cet aléa et sa probabilité d'apparition (P).

Détermination de la gravité : G

Pour chacun des aléas, la gravité est la somme des impacts sur les indicateurs DD retenus.

Détermination de l'Impact : I

Pour chaque aléa, l'impact est évalué, indicateur DD par indicateur DD, sur une échelle de 1 à 4 :

- ❖ 1 = impact négligeable
- ❖ 2 = impact peu important
- ❖ 3 = impact important
- ❖ 4 = impact très important

Tableau 11 : Exemple d'évaluation de la gravité pour un aléa donné (les chiffres sont donnés à titre indicatif)

				Impact par indicateur DD (I)						Gravité (G)
Poste étudié	Aléa redouté	Solution pour traiter l'aléa	Conséquences	GES	Consommation de ressources non renouvelables	Exposition des rivrains (délai)	Sécurité routière	Coût	...	
Ressources régionales en matériaux	Capacité de production des carrières locales inférieures aux prévisions	T	Valorisation plus importante des matériaux du site par traitement	3	1	1	1	2	...	G_T
		NT	Augmentation des distances de transport des matériaux d'apport	1	3	2	3	3	...	G_{NT}

Avec G = somme des impacts sur les 17 indicateurs

T = solution avec traitement et NT = solution sans traitement

Détermination de la probabilité : P

La probabilité que l'aléa se produise est évaluée également sur une échelle de 1 à 4. L'échelle correspond aux critères suivants :

- ❖ 1 = peu probable (soit 1 chance sur 50 que l'aléa se produise)
- ❖ 2 = assez probable (soit 1 chance sur 20 que l'aléa se produise)
- ❖ 3 = probable (soit 1 chance sur 10 que l'aléa se produise)
- ❖ 4 = très probable (soit 1 chance sur 5 que l'aléa se produise)

Détermination de la criticité : C

Les mesures de l'impact et de la probabilité permettent de déterminer la criticité de chaque risque en croisant probabilité et gravité selon le modèle de la Figure 20. La détermination de la criticité permet d'évaluer l'acceptabilité (ou non) d'un risque.

La détermination des critères d'acceptabilité des risques (c'est-à-dire l'attribution des couleurs de remplissage de chacune des cases) appartient au Maître d'ouvrage.

Figure 20 : Exemple de répartition des critères d'acceptabilité pour un aléa donné

Probabilité	4				
	3				
	2				
	1				
		1 <i>(17-29)</i>	2 <i>(30-42)</i>	3 <i>(43-55)</i>	4 <i>(56-68)</i>
		Impact			

Les bornes indiquées en italique sont données dans le cas où les 17 indicateurs sont retenus pour l'évaluation de l'aléa

- Risque inacceptable
- Acceptabilité à décider en fonction du risque et de ses caractéristiques
- Risque acceptable

Ce tableau fait ensuite l'objet d'une exploitation permettant d'évaluer entre autres l'impact économique et ce, en terme de surcoût par rapport au montant initial des travaux de terrassement.

Bibliographie

Références dans le texte

- [1] LCPC/SETRA (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, Fascicules 1 et 2 (aussi appelé GTR). Edition LCPC (actuellement IFSTTAR) 2ème Edition de 2000. Réf. D9233-1
- [2] LCPC/SETRA (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique (aussi appelé GTS). Edition LCPC (actuellement IFSTTAR). Réf. D9924.
- [3] CFTR (2007). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – application à la réalisation des assises de chaussées. Guide technique. Edition Sétra (actuellement Cerema). Référence 0718.
- [4] Convention d'engagement volontaire, signée le 25 mars 2009 par la FNTP, le SPTF, l'USIRF, Syntec-Ingénierie, le ministère de l'Ecologie, du développement durable, des transports et du logement, l'Assemblée des Départements de France.
- [5] Dictionnaire en ligne de l'AIPCR : <http://www.piarc.org/fr/Dictionnaires-Terminologie-Transport-Routier-Route/>
- [6] Techniques de l'Ingénieur (2010). Chaux aérienne – Contexte, fabrication, domaines applicatifs (C923)
- [7] Techniques de l'Ingénieur (2011). Chaux aérienne – Applications en génie civil (C5445)
- [8] Idrrim (2015). Note d'Information IDRRIM n° 29 de février 2015 « Norme NF EN 459 : chaux de construction ».
- [9] Techniques de l'Ingénieur (2008). Ciments (C920 - 1)
- [10] Techniques de l'Ingénieur (2009). Liants hydrauliques routiers (C 921 - 1)
- [11] IFSTTAR (2012). Identification du processus de modification / agrégation du sol. Livrable A.1 du module A, projet TerDOUEST.
- [12] Le Borgne T. (2010). Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [13] CFTR (2007). Conception et réalisation des terrassements. Fascicule 1 : Etudes et exécution des travaux. Guide technique. Edition Sétra (actuellement Cerema). Référence 0702-1.
- [14] Cerema (2012). Rapport de synthèse des travaux de construction du remblai expérimental d'Héricourt. Livrable C.2.2 du module C, projet TerDOUEST.
- [15] Hung C. (2011). Projet de recherche TerDOUEST, construction d'un remblai de référence pour tester le réemploi d'argiles très plastiques. Revue Travaux n° 877. Décembre 2010 – janvier 2011. pp.36-43.
- [16] AFNOR (2003). NF EN 1990. Eurocodes structuraux. Base de calculs de structures (aussi appelé Eurocodes 0 ou EC0).
- [17] Laego (2012). Influence des sollicitations externes sur le comportement d'un sol traité. Livrable B.1 du module B, projet TerDOUEST.
- [18] ASTM D6276-99a (2006)e1. Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, www.astm.org
- [19] Sétra (2012). Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art – murs de soutènement et culées de ponts. Note d'Information Ouvrages d'Art – série (OA) n° 34.

- [20] Laego (2012). Comportement des bases de remblais en zone inondable. Livrable B.1.3 du module B projet TerDOUEST.
- [21] IFSTTAR, Lhoist (2012). Etude sur la perméabilité des sols traités à la chaux vive. Livrable A.3.2 du module A projet TerDOUEST.
- [22] Tang A. M., Vu M. N., Cui Y. J. (2011). Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil. *Géotechnique* 61 (5), pp. 421-429.
- [23] Razakamanantsoa A., David J.P., Reyssac E. (2012). Influence des modalités de préparation de l'argile d'Héricourt traité à la chaux et au ciment sur leur comportement mécanique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur JNGG 2012. Bordeaux, 4 au 6 juillet 2012. Actes des journées.
- [24] IFSTTAR, Lhoist, Laego, Cimbéton, SPTF, Navier, CRMD (2012). Couplage entre les aspects microscopiques et les propriétés géotechniques : approches multi-échelle. Livrable A.3 du module A projet TerDOUEST.
- [25] Haghghi I. (2012). Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques. Thèse université Paris Est.
- [26] CRMD (2012). Etude des relations entre les propriétés mécaniques et les paramètres de confection des éprouvettes. Livrable A.3.1 du module A, projet TerDOUEST.
- [27] Laego, SNCF, SPTF (2012). Caractérisation des matériaux de la LGV Est. Synthèse des essais. Livrable B.2.2 du module B, projet TerDOUEST.
- [28] CRMD, Cerema (2012). Caractérisation des matériaux de l'A304. Synthèse des essais. Livrable B.2.1 du module B projet TerDOUEST.
- [29] Cerema (2013). Rapport de suivi du remblai expérimental. Livrable C.3 du module C projet TerDOUEST.
- [30] Cerema (2011). Couche de forme LGV Atlantique. Colloque Géorail 2011. Paris.
- [31] Egis, SNCF, Lhoist, Cimbéton, SPTF, Ifsttar (2012). Rapport sur les indicateurs environnementaux pertinents. Livrable D.1.1 du module D, projet TerDOUEST.
- [32] Ifsttar (2012). Application des indicateurs sur le chantier de Roanne. Livrable D.1.2 du module D, projet TerDOUEST.
- [33] Capony A, Dauvergne M, Lorino T, Muresan B, Jullien A. (2011). Earthworks and environmental monitoring- A case study for environmental impacts Modelling. AIPCR New Delhi, 17th-19th February 2011 , 9p. Actes du séminaire « Réduction de l'empreinte carbone lors de la construction des routes » . Comité technique A.1 « Préservation de l'environnement»
- [34] Capony A, Muresan B, Dauvergne M, Auriol JC, Ferber V, Jullien A. (2013). Monitoring and environmental modelling of earthwork impacts. A case study. *Resources, Conservation & Recycling*, may 2013 , Vol.74, pp124-133.
- [35] SNCF, Egis, Lhoist, Cimbéton, SPTF, Ifsttar (2012). Rapport méthodologique d'analyse et de maîtrise des incertitudes des projets. Livrable D.2 du module D, projet TerDOUEST.

Liste des normes citées dans le document :

- ❖ NF EN 196-1 : « Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : détermination des résistances mécaniques »
- ❖ NF EN 197-1 : « Ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».
- ❖ NF EN 459–1 : « Chaux de construction – partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformités ».
- ❖ NF EN 459–2 : « Chaux de construction – partie 2 : méthodes d'essais »
- ❖ NF EN 459–3 : « Chaux de construction – partie 3 : évaluation de la conformité »
- ❖ NF EN 13282-1 : « Liants hydrauliques routiers – partie 1 : liants hydrauliques routiers à durcissement rapide – composition, spécifications et critères de conformité ».
- ❖ NF EN 13282-2 : « Liants hydrauliques routiers – partie 2 : liants hydrauliques routiers à durcissement normal – composition, spécifications et critères de conformité ».
- ❖ NF EN 13282-3 : « Liants hydrauliques routiers – partie 3 : évaluation de la conformité ».
- ❖ NF EN ISO 14044 : « Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices ».
- ❖ NF P11-300 : « Exécution des terrassements – classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de formes d'infrastructures routières ».
- ❖ NF P11-301 : « Exécution des terrassements – terminologie ».
- ❖ NF P94-100 : « Sols : reconnaissance et essais – matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement ».

Autres sources documentaires :

Lucile Saussaye (2012). « *Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification.* » - Thèse de doctorat de l'ESITC de Caen.

Kevin Lemaire (2012). « *Évolution des caractéristiques physico-chimiques, microstructurales et hydromécaniques de limons traités aux liants lors d'une circulation d'eau.* » - Thèse de doctorat de l'université de Nantes.

Nicolas Maubec (2010). « *Approche Multi-Echelle du Traitement des Sols à la Chaux-Interactions avec les Argiles. Material chemistry.* » - Thèse de doctorat de l'Université de Nantes.

Laure Delavernhe (2011). « *Étude multi-échelle de la réactivité des altérites lors du traitement à la chaux. Material chemistry.* » - Thèse de doctorat de l'Université de Nantes.



L'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) fédère l'ensemble des acteurs publics et privés agissant dans le domaine des infrastructures de mobilité et espaces urbains.

Créé en 2010 à l'initiative du Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie, de l'Assemblée des Départements de France, et des fédérations nationales de l'ingénierie privée et des Travaux Publics, l'Institut propose un cadre de réflexion et d'actions pour co-produire et partager un référentiel commun.

Lieu de convergence et d'échanges, il a pour objectif de répondre de manière homogène aux problématiques techniques et stratégiques et de faire évoluer les patrimoines d'infrastructures et espaces publics vers une conception et une gestion durables ainsi qu'une plus grande optimisation de leur utilisation. L'IDRRIM a également pour vocation d'assurer la promotion et le rayonnement du savoir-faire technique français en Europe et à l'International.

Rassemblant 49 membres représentatifs des secteurs publics et privés (services de l'Etat, collectivités locales, ingénierie publique et privée, entreprises, associations partenariales, organismes de formation et de recherche) et plus de 54 collectivités, entreprises et ingénieurs à titre individuel, l'Institut fédère l'ensemble des acteurs publics et privés des infrastructures de transport autour de ses 9 comités opérationnels thématiques.



Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

9, rue de Berri - 75008 Paris - Tél : +33 1 44 13 32 99

www.idrrim.com - idrrim@idrrim.com

 @IDRRIM

Association loi 1901

 Tracer ensemble
les voies durables de la mobilité 