

Recommandations pour le diagnostic et le suivi des remblais routiers



Guide méthodologique

Recommandations pour le diagnostic et le suivi des remblais routiers



Ce guide technique a été rédigé dans le cadre d'un groupe de travail piloté par le Cerema Infrastructures de transport et matériaux. Il est issu d'un projet de guide rédigé dans le cadre d'une opération de recherche LCPC 11B031 « Diagnostic et réparation des ouvrages géotechniques » soutenue par la DGITM.

Ce guide technique a fait l'objet d'une relecture de la part du comité méthodologique de l'IDRRIM.

Rédacteurs :

- Alain BIENAIME (DIR Nord - SPT - IECD)
- Yasmina BOUSSAFIR (Université Gustave Eiffel)
- Olivier MALASSINGNE (Cerema Ouest)
- Anthony MATYNIA (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Ludovic MIARD (Cerema Centre Est)
- Fabrice ROJAT (Cerema Centre Est)
- Dominique SAINT-EVE (Cerema Est)

Remerciements :

Le groupe de rédaction tient à remercier tout particulièrement Nicolas BUCHART (Cerema Ouest), Sébastien HERVE (Cerema Ouest), Thibaut LAMBERT (Cerema Est), Véronique BERCHE (SCSNE), Thierry DUBREUCQ (Université Gustave Eiffel), le Conseil Général de l'Aisne, Patrick LOCHON (AITF) et le SPTF pour leur relecture approfondie.

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Recommandations pour le diagnostic et le suivi des remblais routiers*
Bron : Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-094-6



Sommaire

Introduction	5
1 - Diagnostic d'un remblai : généralités	7
1.1 - Les trois types de remblais	7
1.1.1 - Les remblais courants	7
1.1.2 - Les remblais contigus aux ouvrages	7
1.1.3 - Les autres types de remblais	8
1.2 - Que contient le diagnostic ?	9
2 - Description générale d'un remblai et de son environnement	10
2.1 - La constitution d'un remblai routier	10
2.2 - Les règles de conception des remblais	12
2.2.1 - La préparation et l'amélioration du sol support	13
2.2.2 - Les règles de conception de l'interface sol support / remblai	13
2.2.3 - Les règles de conception du corps de remblai	14
2.2.4 - Cas des remblais de grande hauteur (> 15 m)	16
2.3 - Les règles de mise en œuvre des remblais	16
2.3.1 - Les matériaux constitutifs du corps de remblai	17
2.3.2 - Les règles de compactage	18
2.4 - L'environnement immédiat du remblai	20
2.4.1 - L'environnement naturel du remblai	20
2.4.2 - Les couches supérieures et les équipements	22
2.4.3 - Les systèmes de drainage et d'assainissement	23
2.4.4 - Les ouvrages en interaction avec le remblai ou sa zone d'influence	24
2.4.5 - Les réseaux	25
3 - Les évolutions et les désordres de remblais	26
3.1 - Les principales évolutions des remblais	26
3.1.1 - Les évolutions internes	26
3.1.2 - Les évolutions externes	30
3.2 - Le catalogue des désordres	31
3.3 - Les facteurs d'évolution défavorable	37
3.3.1 - La géométrie du remblai	37
3.3.2 - Les matériaux constitutifs du remblai	37
3.3.3 - Le sol support	37
3.3.4 - L'eau, l'assainissement et le drainage	38
3.3.5 - L'atmosphère, le site, l'environnement et les conditions d'exploitation	38
4 - Diagnostic des remblais	39
4.1 - La démarche générale	39
4.2 - Le prédiagnostic	40
4.2.1 - Les éléments menant au prédiagnostic	42
4.2.2 - Le prédiagnostic	44
4.3 - Du prédiagnostic au diagnostic	46



5 - Techniques d'investigation et de suivi	49
5.1 - Les techniques d'investigation	49
5.1.1 - La réalisation de prélèvements et d'essais de laboratoire	49
5.1.2 - La réalisation d'essais <i>in situ</i>	50
5.1.3 - Les techniques d'investigation non destructives	52
5.2 - Les techniques de suivi instrumenté	53
5.2.1 - La mise en œuvre de dispositifs de suivi (ou l'actualisation de mesures)	53
5.2.2 - Les systèmes de mesure mis en œuvre en cours de construction	54
5.2.3 - Les systèmes de mesure mis en œuvre au cours de la vie du remblai	54
5.3 - Cas du recalcul de l'ouvrage en terre	58
5.3.1 - Généralités	58
5.3.2 - La modélisation des remblais	58
6 - Repères pour l'entretien et la réparation des remblais	59
6.1 - La prévention des désordres	59
6.1.1 - La prévention des désordres : rôle de l'entretien courant	59
6.1.2 - L'entretien spécialisé	62
6.2 - Quelques principes de réparation des remblais	62
6.2.1 - L'étanchéification de la plateforme	62
6.2.2 - Les interventions sur les dispositifs de drainage et d'assainissement	62
6.2.3 - Les substitutions de talus	63
6.2.4 - La mise en place d'un épaulement	63
6.2.5 - Les renforcements par inclusions	65
6.2.6 - Les renforcements par soutènement	65
6.2.7 - Les autres techniques de réparation	66
Bibliographie	67
Glossaire	69
Annexes	70



Introduction

L'origine de la rédaction d'un guide méthodologique pour le diagnostic des pathologies de remblais routiers provient de trois constats :

- les remblais, construits pour la plupart entre 1970 et 1980, vieillissent. Ce vieillissement aura pour conséquence probable une augmentation des pathologies dans les années à venir. Par ailleurs, ce vieillissement pourrait s'accroître sous l'influence des évolutions climatiques ;
- l'apparition de désordres nécessite souvent un surcoût d'entretien visant à assurer un niveau de service acceptable pour l'utilisateur ou à rétablir la sécurité de l'ouvrage. Dans un contexte budgétaire en réduction, il est primordial de rationaliser la méthodologie de diagnostic, d'entretien et de réhabilitation des remblais ;
- l'étude de la pathologie des ouvrages est toujours riche d'enseignement afin d'améliorer et de réviser les méthodes de conception et de mise en œuvre. Des recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènements dits de liste II ont d'ores et déjà été publiés dans les collections LCPC/Sétra [33]. Cependant, rien n'existe actuellement sur la thématique des ouvrages de terrassements.

Ce guide répond principalement à quatre objectifs :

- proposer une méthodologie de diagnostic des remblais ;
- optimiser l'entretien des remblais en permettant une évaluation correcte des désordres ;
- disposer pour un remblai donné d'un état des lieux clair permettant au gestionnaire d'optimiser ses stratégies de réparation ;
- proposer aux gestionnaires des solutions de réparation et de réhabilitation.

Compte tenu de la multiplicité des situations possibles, des limites sont apparues pour la rédaction d'un guide exhaustif sur le diagnostic, l'entretien et la réhabilitation de tous les types de remblais. Le périmètre d'étude de ce guide a donc été volontairement limité à de grands types de pathologies dont les impacts respectifs sur la vie de l'ouvrage peuvent être qualifiés. Cette limitation s'est appuyée sur les enquêtes nationales sur la pathologie des remblais conduites par le Réseau Scientifique et Technique (RST) du ministère de l'Équipement en 1992 [2], en 1999 [3] et en 2005 [4]. Ces enquêtes ont permis notamment d'une part de répertorier les principales pathologies des remblais et d'autre part de montrer qu'une source de désordres mal diagnostiquée est fréquente, notamment parce que le spécialiste consulté n'est pas forcément un géotechnicien (ce qui est par exemple le cas lors de l'apparition de fissures dans la chaussée).

En préambule, il faut préciser que jusqu'en 1976, période qui correspond à la politique des renforcements coordonnés, il n'existait pas de préconisations formalisées pour la réalisation des ouvrages de terrassements et en particulier des remblais. Seules étaient considérées des règles de l'art implicites des entreprises et une connaissance locale des matériaux.

En 1976, les premières préconisations de réalisation des terrassements ont été formalisées grâce à la publication de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR) [6].

En 1992, de nouvelles recommandations ont été écrites dans le guide pour la réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) [7]. Ce guide synthétise quinze années d'expérience dans le domaine des terrassements. Il améliore et complète les recommandations de la RTR. Il définit notamment une classification des matériaux et des préconisations de réemploi qui constituent depuis lors, la référence en matière de travaux de terrassement sur le territoire métropolitain.

En 2000, le guide de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) [8] synthétise une expérience française de plus de trente ans et présente les différents aspects (principes généraux, études de laboratoire, techniques et matériels d'exécution, assurance qualité, etc.) du traitement de sols avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.

En 2007, un guide technique pour la conception et la réalisation des terrassements [9] a été rédigé afin de faire un recueil actualisé des règles de l'art et de compléter des points non abordés par le GTR.



Par ailleurs, la prise en compte du développement durable dans la réalisation des terrassements exprimée par la directive cadre sur les déchets 2008/98/CE [10], le Grenelle Environnement (2009) et la convention d'engagement volontaire (déclinaison de la loi Grenelle dans le domaine des travaux publics, signée en 2009) ont favorisé l'émergence de la caractérisation et l'acceptabilité de matériaux alternatifs aux ressources naturelles. Les nouvelles règles de l'art adaptées à ces matériaux alternatifs sont historiquement mal connues. Des guides techniques régionaux tentent néanmoins de préciser leurs conditions de mise en œuvre.

On gardera donc à l'esprit, dans les démarches de diagnostic, que la conception ou la construction d'un remblai a pu être abordée avec des méthodes diverses au cours de l'histoire, ne se basant pas nécessairement sur des normes et recommandations aussi détaillées que celles que nous connaissons aujourd'hui.

Pour aider à la démarche du diagnostic, ce guide est composé d'une première partie décrivant la structure des remblais, leur fonctionnalité et leurs modes de construction, car il est important d'aborder le diagnostic en ayant une idée précise de l'objet que l'on va diagnostiquer. Ensuite, les différents types de désordres, leurs évolutions et leurs origines sont définis. La méthodologie de diagnostic et des exemples de techniques d'entretien et de réhabilitation des remblais terminent ce document.

Le présent guide ne concerne que les remblais classiques en section courante et les remblais contigus aux ouvrages d'art. Sont exclus les autres remblais (remblais renforcés, remblais spéciaux, etc., voir chapitre 1.1.3) qui peuvent souffrir d'autres types de pathologies et qui doivent faire l'objet d'investigations différentes.



1 Diagnostic d'un remblai : généralités

Le terme « remblai » couvre un large panel d'ouvrages en terre destinés à surélever durablement le niveau du sol support par un apport de matériaux. Dans le cadre de projets d'infrastructures, différents types de remblais sont généralement rencontrés. Ces types de remblais diffèrent par le rôle qui leur est dévolu.

Le diagnostic d'un remblai et l'appréciation d'une pathologie sont fortement liés à la fonction du remblai. Par exemple, des pathologies acceptables pour des merlons phoniques ne le seront peut être pas pour un remblai sous-jacent à une chaussée routière. En effet, dans le second cas, même si la tenue globale de l'ouvrage en terre n'est pas remise en cause, des réparations lourdes pourront être entreprises afin de garantir la sécurité de la voirie et des usagers.

Le diagnostic est enclenché lorsque le gestionnaire ne peut identifier la cause des pathologies et souhaite mettre en œuvre la solution de réparation la plus appropriée à sa situation. Ce diagnostic peut être demandé dès l'apparition des premiers désordres ou plus tardivement, soit après plusieurs réparations inefficaces, soit à un moment plus approprié dans le temps.

1.1 - Les trois types de remblais

On peut classer les remblais selon leur fonction d'usage.

1.1.1 - Les remblais courants

Les remblais courants ont pour fonction essentielle de garantir la géométrie des projets conformément aux exigences du projeteur routier et de supporter la structure de chaussée. À ce titre, leurs évolutions doivent être limitées afin de garantir un niveau de service correct sur la voirie.

La conception et la mise en œuvre de ces remblais se font suivant les recommandations du GTR [7] et du guide à conception et réalisation des terrassements [9] qui garantissent théoriquement à l'ouvrage en terre une tenue à long terme.

1.1.2 - Les remblais contigus aux ouvrages

Les remblais contigus aux ouvrages ont pour fonction essentielle d'assurer la transition entre la section courante et les ouvrages d'art (rigides) et d'épauler l'ensemble des ouvrages inférieurs de franchissement (buses hydrauliques, traversées pour faune, etc.).

Dans les marchés publics, le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) exige souvent des niveaux de compactage supérieurs à ceux de la section courante (qualité q3 au lieu de q4 par exemple⁽¹⁾), afin de limiter les problèmes de tassement différentiel. En pratique, la mise en œuvre de ces remblais présente des difficultés liées à la proximité de l'ouvrage (en général construit avant), qui interdit l'usage de matériels lourds (exiguïté de la zone à compacter, vibrations). Pour plus de précision sur ce type de remblai, nous invitons le lecteur à se référer à la note d'information « Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art » [16].

(1) Les références q3 et q4 sont définies dans le GTR [7].



1.1.3 - Les autres types de remblais

Certains remblais ont une fonction spécifique. Parmi ces remblais, et de façon non exhaustive, il convient de citer :

- les remblais digues : les remblais digues ont pour fonction de maintenir en eau un ouvrage de type bassin, lac ou autre plan d'eau et/ou de prévenir le risque d'inondation (crues, etc.). Pour cela, les remblais digues doivent être capables de résister à un contact prolongé avec l'eau. Ils peuvent avoir une fonction de remblai routier dans certains cas ;
- les merlons phoniques : les merlons phoniques ont pour fonction de constituer un atténuateur de bruit. Ils possèdent souvent une pente de talus assez importante et un compactage médiocre, pouvant être la cause de désordres ;
- les merlons : ces merlons ont pour fonction de créer un obstacle à toute chute de blocs dont la trajectoire pourrait atteindre ou croiser la chaussée ;
- les remblais ferroviaires : les remblais ferroviaires ont pour fonction de supporter une voie ferrée. Ces remblais peuvent être construits à partir de règles de conception et de mise en œuvre proches de celles appliquées pour les remblais routiers, mais ils obéissent à des contraintes d'exploitation différentes ;
- les remblais dépôts : les remblais dépôts ont pour fonction de stocker des matériaux excédentaires ou impropres en l'état à une mise en remblai courant ;
- les aménagements paysagers : les aménagements paysagers ont pour fonction 1. de permettre le stockage de matériaux excédentaires ou impropres en l'état à une mise en remblai courant et/ou 2. de rendre à l'agriculture ou au paysage une part plus importante des terrains situés dans l'emprise des travaux. Les avantages en termes d'entretien futur et de stabilité générale doivent également être signalés ;
- les remblais renforcés : les remblais renforcés ont pour fonction 1. de réduire l'emprise au sol (cas courant en agglomération) et 2. de renforcer la stabilité générale de l'ouvrage. Ces remblais sont traités par les normes NF P94-270 et NF EN 14475 pour leur conception et leur exécution et dans le guide technique Sétra/LCPC de 2003 [1] pour leur pathologie ;
- les remblais spéciaux et allégés (pneusols®, polystyrène expansé en remblai, etc.) : les fonctions peuvent être diverses et répondent en général à des cas particuliers de chantier. Le polystyrène expansé en remblai est souvent utilisé pour alléger le remblai, limiter le tassement ou encore réduire les efforts de poussée sur les soutènements [17]. Les « pneusols® » [21] peuvent être utilisés sur des zones compressibles en allègement, ou en protection de voûte d'ouvrage de franchissement hydraulique (effet Marston) et comme remblais renforcés. Les mécanismes de dégradation des remblais spéciaux sont difficilement comparables à ceux des autres remblais. Par expérience, leurs pathologies sont rares ;
- les remblais de tranchée : ces remblais de tranchée ont pour fonction de combler une fouille. Les règles de remblayage des tranchées et réfection des chaussées sont exposés dans le guide technique Sétra/LCPC (1994) [15] ;
- les remblais supports de fondations : ces remblais ont pour fonction de transmettre les charges apportées par les fondations au sol support, soit à la suite d'une purge, soit pour permettre une diffusion des contraintes, ou encore pour économiser du béton (culée perchée). Ces remblais sont traités par le document « Caractéristiques des matériaux de remblai supports de fondations » [32].

Ces fonctions spécifiques impliquent des exigences spécifiques. Par exemple, la présence de terriers d'animaux fouisseurs, rarement gênante pour les remblais courants, sera une pathologie notable pour une digue car elle conduit à une réduction du chemin hydraulique. De même les merlons phoniques sont souvent mis en œuvre sans compactage, avec des matériaux ne respectant pas forcément les recommandations du GTR [7].

Seuls les remblais suivants seront inclus dans le périmètre de ce guide :

- les remblais courants d'infrastructure routière y compris les remblais de grande hauteur ;
- les remblais contigus aux ouvrages.

Les autres types de remblais seront exclus du périmètre.



1.2 - Que contient le diagnostic ?

Il n'existe à ce jour aucun document permettant de cadrer une commande du type « diagnostic d'un ouvrage en terre » *stricto sensu*. On peut néanmoins se référer à la norme NF P94-500 qui prévoit dans le cadre des missions G5, la réalisation de mission géotechnique permettant d'établir des diagnostics.

On peut distinguer :

- le diagnostic, qui permet d'évaluer l'état d'usage de l'ouvrage ausculté et de proposer des solutions de réparations ;
- l'expertise qui établit la chaîne des responsabilités dans l'apparition des désordres.

Le présent guide a vocation à donner des éléments permettant d'évaluer uniquement l'état d'usage des ouvrages en terre et d'identifier l'origine géotechnique des désordres.

Le diagnostic est confié à un expert (NF X50-110), c'est-à-dire une personne qualifiée ayant une bonne connaissance des ouvrages à étudier et une expérience suffisante pour proposer des solutions de réparation efficaces et pragmatiques.

Comme présenté dans le chapitre 5, le diagnostic pourra être scindé en plusieurs étapes, d'importance inégale en temps et en coût.

2 Description générale d'un remblai et de son environnement

Quel que soit le type de remblai rencontré, il faut savoir que l'ouvrage final est le résultat de deux phases importantes :

1. *la phase de conception* : opération créatrice qui consiste à élaborer un projet de remblai, en partant des besoins exprimés, des propriétés physiques et mécaniques des matériaux à utiliser, des moyens existants et des possibilités technologiques. Cette phase repose sur un enchaînement d'études géotechniques de niveau croissant [22] et leur formalisation dans le cadre du marché travaux ;
2. *la phase de construction* : opération consistant en la mise en œuvre de matériau pour créer le remblai conformément au dossier de conception. Cette phase repose sur le savoir-faire de l'entreprise et du maître d'œuvre, ainsi que sur les moyens de contrôles associés à l'exécution de la tâche.

La connaissance des règles de conception et de construction du remblai est primordiale pour appréhender au mieux les mécanismes d'apparition des pathologies. Les erreurs de conception comme les erreurs de réalisation peuvent être à l'origine des désordres.

Un autre élément important dans le diagnostic est l'environnement immédiat du remblai. Celui-ci peut être à l'origine des désordres ou les aggraver. Il convient de connaître cet environnement afin d'évaluer son rôle dans le développement de la pathologie de l'ouvrage de manière pertinente. Le diagnostic d'un remblai ne se limite donc pas qu'à l'ouvrage et doit inclure l'étude de l'environnement immédiat.

Après avoir décrit les différentes parties constituant un remblai, nous proposons dans cette partie de rappeler quelques règles de conception et de mise en œuvre. Ensuite, l'environnement immédiat du remblai et son influence sur la pérennité de l'ouvrage sont abordés.

2.1 - La constitution d'un remblai routier

La constitution interne du remblai est donnée dans la Figure 1. Selon les situations, on distingue plusieurs parties :

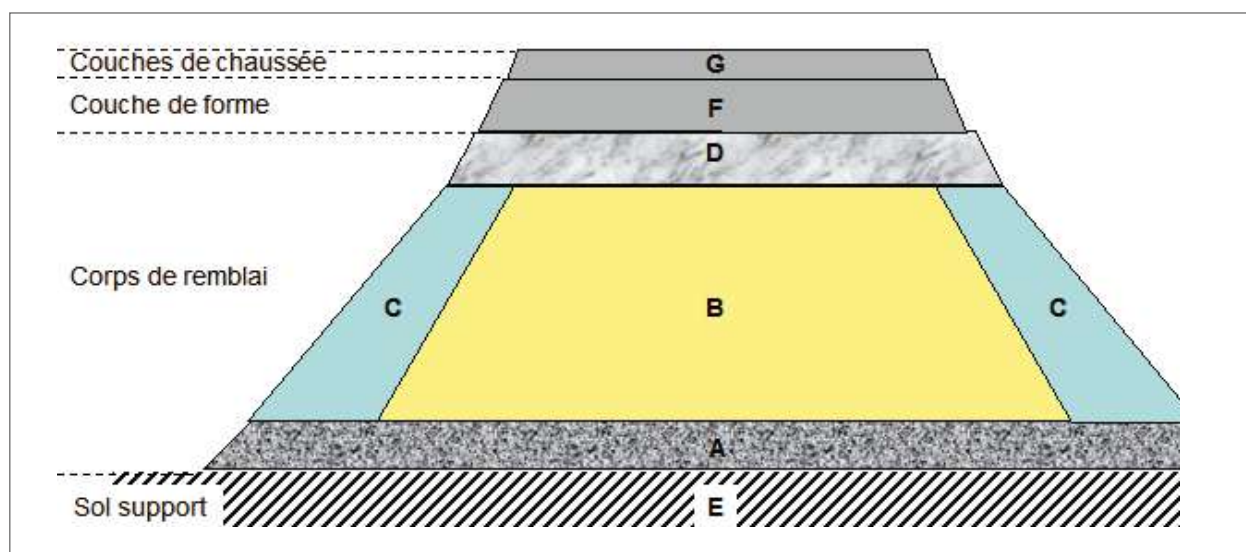


Figure 1 : Schéma des différentes parties d'un remblai



- **le corps de remblai** : le corps du remblai est lui-même constitué de plusieurs sous-parties :
 - **A : la base de remblai** : elle correspond à la zone de transition entre le sol support (E) et le cœur remblai (B). Cette base assure deux fonctions : 1. stabiliser l'ouvrage en terre, surtout dans le cas des ouvrages de grande hauteur et 2. assurer la stabilité de l'ouvrage en cas de remontées d'eau libre ou d'eau capillaire provenant du sol support (zone humide, nappe sub-affleurante) ou d'arrivées d'eau latérales dans les zones inondables,
 - **B : le noyau du remblai** : il correspond à la zone située entre la base du remblai (A) et la partie supérieure des terrassements (D). Cette zone est peu sollicitée par les contraintes extérieures (trafic, météo, etc.),
 - **C : la zone latérale du remblai** : elle correspond à la partie de remblai en talus, et selon les cas à l'encagement et/ou l'épaulement ; cette zone doit assurer la stabilité de la pente de talus définie par le concepteur, le confinement de certains matériaux, et, s'il y a lieu, la protection du noyau du remblai vis-à-vis des conditions extérieures (météo, cycles humidification/séchage, gel/dégel, fousseurs, etc.),
 - **D : la partie supérieure des terrassements** : cette zone d'environ 1 m d'épaisseur est située entre le cœur du remblai et la couche de forme (F). Elle entre dans le dimensionnement de l'infrastructure qui surmonte le remblai et assure une fonction mécanique dans le long terme.

La base, le noyau, les zones latérales et la partie supérieure du remblai peuvent être constitués du même matériau. On parle alors de remblai homogène (Fig. 2).

La base, le noyau, les zones latérales et la partie supérieure du remblai peuvent être aussi réalisés avec des matériaux et ou des techniques de mises en œuvre différentes. On parle alors de remblai hétérogène.

- **la zone d'influence** : selon la norme NF P94-500, la zone d'influence est définie comme le volume de terre au sein duquel il y a interaction entre d'une part l'ouvrage ou l'aménagement de terrain et d'autre part l'environnement (sols, ouvrages, aménagements de terrains ou biens environnants). En pratique, la zone d'influence comprend le sol support (E) environnant. Elle s'étend conventionnellement de part et d'autre du remblai sur une distance égale à trois fois sa hauteur. Néanmoins, son extension peut être plus importante si les besoins du site le justifient (remblai sur pente par exemple) ;
- **les éléments surmontant le remblai** :
 - la couche de forme (F),
 - les couches de chaussée, les accotements, les terre-pleins et les équipements (G).
- **les dispositifs d'assainissement et de drainage** :
 - les ouvrages traversants (buse, etc.),
 - les dispositifs de drainage sous remblai et les fossés de pied de remblai,
 - l'assainissement et le drainage de la chaussée.

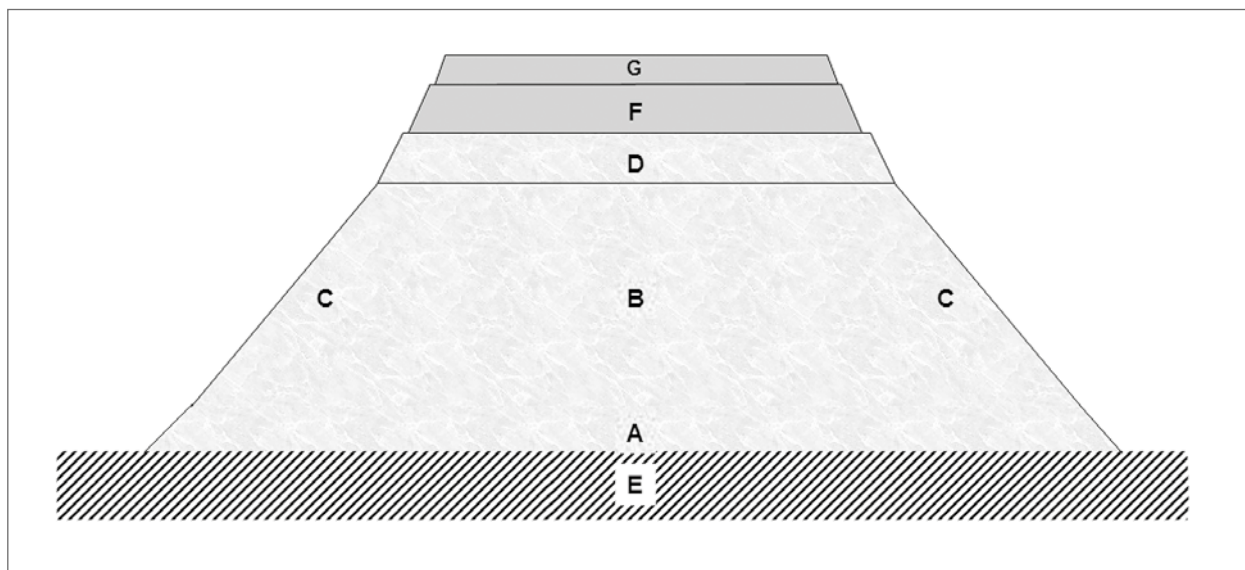


Figure 2 : Schéma d'un remblai homogène



La hauteur des remblais routiers est un sujet qui est traité dans le GTR [7] et dans le Guide de Conception des Terrassements [9] de manière plutôt simple. A l'époque de leur rédaction, trois catégories de hauteur étaient distinguées et permettaient de décliner règles de compactage et règles de conception. Ces hauteurs permettaient de sensibiliser le maître d'ouvrage et les concepteurs à la difficulté de réalisation de l'ouvrage en terre.

Pour mémoire, les hauteurs sont les suivantes :

- les remblais de faible hauteur (< 5 m) ;
- les remblais de moyenne hauteur (entre 5 et 15 m) ;
- les remblais de grande hauteur (> 15 m).

Aujourd'hui, nous savons que la hauteur n'est pas le seul critère permettant de définir la conception d'un ouvrage en terre. Les pathologies qui surviennent sur ces ouvrages montrent en effet qu'un remblai peut être affecté par des désordres, quelle qu'en soit sa hauteur.

Les facteurs à prendre en compte dans l'analyse de la pathologie (et pour améliorer la conception) sont :

- l'environnement naturel et théosopique : pentes, cavités, sols supports, nappes, circulations d'eau, etc. ;
- la nature du matériau que l'on va mettre en œuvre pour réaliser l'ouvrage (sensibilité à l'eau, nature évolutive, etc.)
- les techniques de réalisation de cet ouvrage : épaulement encagement etc. ;
- la hauteur pour vérifier la stabilité du sol support, la stabilité interne et «externe» de l'ouvrage.

2.2 - Les règles de conception des remblais

Les règles les plus couramment rencontrées et utilisées pour la conception des remblais sont évoquées dans le Guide de Conception des Terrassements [9]. Une mauvaise application de ces règles notamment en lien avec une méconnaissance de l'environnement du remblai, ou avec une mauvaise connaissance des matériaux qui seront mis en œuvre entraînera forcément l'apparition de désordres. On trouvera ci-dessous un rappel des règles les plus courantes en matière de conception de remblai.

Ces schémas correspondent à la conception actuelle des remblais, la conception historique peut avoir évolué dans le temps (Fig. 3).



Figure 3 : Conception ancienne d'un remblai avec la présence d'un hérisson
(Source: Cerema Ouest)



2.2.1 - La préparation et l'amélioration du sol support

Le sol support doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour supporter le poids du remblai au moment des travaux et après construction de l'ouvrage. La mauvaise qualité des terrains d'assise peut imposer des mesures particulières (purge, montage par phases, préchargement, amélioration de sol), notamment en cas de sols supports compressibles, de cavités souterraines, de sols liquéfiables en zone sismique. Ces mesures auront vocation à assurer la stabilité de l'ouvrage et éviteront des phénomènes de tassement, d'effondrement (Fig. 4), de rupture.

Ces travaux sont à distinguer des travaux de préparation, ou d'amélioration d'arase. Les travaux de préparation concernent la frange superficielle du sol (généralement située entre 0 et 1 mètre de profondeur). Ils peuvent notamment consister en un décapage de la terre végétale ou en des purges localisées.



Figure 4 : Zone d'effondrement de la chaussée par suite de remontée d'une cavité karstique dans le remblai
(Source : Cerema Normandie-Centre, Jargeau, 2001) - photo prise après rebouchage de la cavité (à gauche)
aperçu du phénomène de soutirage par les cavités karstiques, en pied de remblai (à droite)

D'autres types de travaux de préparation sont quelquefois prévus pour faciliter les terrassements et la mise en œuvre du remblai (matelas granulaire, réduction de la teneur eau par traitement ou aération, etc.). Ces travaux sont programmés lorsque la météorologie au moment des travaux est défavorable ou lorsque l'état hydrique des sols en surface est humide à très humide.

Dans le cas de remblai en profil rasant ou de hauteur inférieure à 1,5 m, le concepteur prend en compte l'évolution par humidification des propriétés intrinsèques des matériaux dans le long terme. En effet, il y a, dans cette situation, une interaction forte entre le dimensionnement de l'infrastructure et le terrain naturel, ce dernier constituant pour partie ou totalité la PST et l'arase. des terrassements.

2.2.2 - Les règles de conception de l'interface sol support/remblai

Les dispositions suivantes sont couramment rencontrées dans la conception de l'interface entre le corps de remblai et le sol support [11, 12]. Ces dispositions sont prévues pour prendre en compte l'environnement immédiat du remblai.

Les dispositions de drainage à l'interface déblai-remblai : ces dispositions ont pour objectif d'éviter que les nappes, les sources et les écoulements divers, présents dans le terrain naturel, viennent alimenter le corps de remblai :

- *les dispositions de drainage à l'interface remblai – sol support* (Fig. 5) : ces dispositions servent notamment à :
 1. évacuer les eaux durant le tassement du sol support, notamment dans les configurations de remblai sur sol support compressible [18] ;
 2. éviter la saturation progressive de la base du remblai par remontées capillaires lorsque ce dernier est posé sur un sol support saturé ou présentant une succion plus faible ;
 3. capter les sources et écoulements divers présents dans certaines configurations de remblai sur pente ;



Figure 5 : Exemple de dispositifs de drainage sous remblais
(Source : Université Gustave Eiffel, 2009)

- les dispositions de redans lorsque le remblai s'appuie sur une pente, en profil en long ou en profil en travers : ces dispositions ont pour objectif de limiter les risques de glissement le long d'une interface trop régulière. Les redans peuvent être complétés par des dispositifs drainants et/ou par des bèches en pied de talus de remblai.

2.2.3 - Les règles de conception du corps de remblai

Pour les remblais de faible hauteur, la géométrie (pentes de talus) est souvent déterminée en respectant les règles de l'art. Seules les caractéristiques du matériau et son aptitude au réemploi (conditions de mise en œuvre et de compactage) sont alors examinées, en référence au GTR [7]. Certains cas nécessitent des études complémentaires : les remblais de grande hauteur, les remblais en zone inondable, les remblais sur pente, les remblais en zone compressible, etc.

2.2.3.1 - La base de remblai

La base de remblai (Fig. 1) doit rester stable en cas d'humidification excessive, assurer la stabilité de la partie de remblai qu'elle supporte et résister aux phénomènes d'érosion interne et externe, etc.

En général, le haut de la base de remblai doit être au-dessus (généralement de 0,5 à 1,0 m) du niveau de la crue de référence définie par le maître d'ouvrage, lorsque le remblai se situe en zone inondable. Dans le cas des remblais de très grande hauteur, la hauteur est définie par rapport à une étude de stabilité prenant en compte les caractéristiques des matériaux qui seront mis en œuvre.

Le matériau qui constitue la base de remblai est choisi pour assurer la stabilité de l'ouvrage quel que soit l'aléa. Des règles de compactage spécifiques peuvent s'appliquer en fonction des préconisations définies par l'étude de stabilité (objectif de densification ou angle de frottement recherché) et en fonction du type de matériau mis en œuvre.

2.2.3.2 - Le noyau du remblai

Le noyau du remblai constitue une partie du remblai qui nécessite une mise en œuvre soignée. Ses défauts peuvent conduire à des pathologies graves sur le long terme (tassements, instabilités, accumulations d'eau, etc.).

Toutefois, le noyau du remblai est en théorie moins sollicité par l'eau et le trafic que les autres parties. Les concepteurs peuvent prévoir d'y mettre en œuvre des matériaux sensibles à l'eau ou des matériaux alternatifs [23]. Cette mise en œuvre reste cadrée par les règles de réemploi et de contrôle définies par le GTR ou par des études spécifiques au matériau envisagé.

En fonction des enjeux environnementaux et des conditions de stabilité recherchées, le noyau du remblai peut être protégé par un dispositif de caisson ou d'encagement (voir 2.2.3.4.2). L'épaisseur totale de la zone latérale du remblai est alors définie au cas par cas.



2.2.3.3 - La partie supérieure des terrassements

La partie supérieure de terrassements est la zone d'environ 1 m d'épaisseur qui constitue le haut des remblais. Elle fait souvent l'objet d'exigences de qualité spécifiques car elle contribue au dimensionnement de la structure.

La surface supérieure de la PST est appelée l'arase (AR). Les arases sont classées en fonction de leur module de déformabilité (EV2 ou Edyn), plus communément appelé portance. La classe d'arase influence le dimensionnement de la couche de forme et de la chaussée sus-jacente [7].

2.2.3.4 - La zone latérale du remblai

2.2.3.4.1 - Le talus

La géométrie de la pente de talus doit être dimensionnée pour garantir la stabilité du remblai. Elle dépend de la hauteur et des caractéristiques mécaniques à long terme du matériau constitutif.

Pour les remblais de faible hauteur (< 5 m) et de moyenne hauteur (< 15 m), les pentes sont usuellement dimensionnées de manière empirique en fonction du type de matériau (GRT [9]).

Pour les remblais de grande hauteur (> 15 m, GRT [9]) et pour des chantiers importants, une étude de stabilité est généralement réalisée en s'appuyant sur les poids volumiques et les caractéristiques mécaniques (angle de frottement, cohésion) du matériau constitutif du remblai. Cette étude débouche sur le choix d'une géométrie garantissant la tenue à long terme de l'ouvrage en terre [5].



Figure 6 : Exemple d'érosion régressive du bord de talus, sous la glissière en béton armé
(Source : Cerema Normandie-Centre)

Les talus peuvent éventuellement être aménagés en plusieurs risbermes pour obtenir des conditions de stabilité plus favorables. Ces risbermes créent des replats intermédiaires qui sont des zones d'imbibition préférentielles. Elles nécessitent donc un soin particulier en termes d'assainissement (notamment lorsqu'elles sont pentées vers le remblai) et d'entretien, afin qu'il ne se crée pas de zones de stagnation d'eau.

Il convient également de citer toutes les techniques qui permettent de raidir ou de garantir la stabilité du talus (remblai renforcé, enrochement, amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux en bord de talus, etc.).

Enfin, sur la plupart des remblais, les talus font l'objet d'une végétalisation qui permet de limiter l'impact visuel de l'ouvrage et d'assurer une protection contre l'érosion et les ravinements (Fig. 6). On peut également citer parmi les dispositions paysagères les « terrassements morphologiques » qui consistent à venir appuyer sur les pentes du remblai un dépôt de matériaux excédentaires en pente douce, donnant l'illusion du sol support. Dans ce dernier cas, les éventuels problèmes de stabilité sont couramment liés à l'absence de drainage à l'interface avec le remblai routier.



2.2.3.4.2 - Les techniques d'encagement

La fonction de l'encagement est de protéger le noyau du remblai des échanges avec l'atmosphère (eau, air, etc.), en général en le confinant dans une enveloppe de 1 à 2 mètres de sols peu à très peu perméables. Dans les régions où la ressource est riche en matériaux évolutifs (marne, schiste, etc.), cette technique peut être mise en œuvre. Elle est rarement identifiable de l'extérieur.

L'encagement peut également jouer le rôle de renforcement de talus.

2.2.3.4.3 - Les techniques d'épaulement

La fonction de l'épaulement est d'améliorer la stabilité interne par la mise en place en zones latérales du remblai de matériaux présentant un angle de frottement plus élevé. Ce terme est aussi employé pour les banquettes latérales stabilisatrices et les risbermes intermédiaires, qui améliorent la stabilité externe au poinçonnement du sol support et au glissement profond en modifiant la géométrie.

La présence d'un épaulement peut être le signe de problèmes antérieurs d'instabilité soit du sol support soit du remblai lui-même. Il est facilement identifiable sur le terrain car souvent limité en hauteur par une risberme.

2.2.4 - Cas des remblais de grande hauteur (> 15 m)

Il est recommandé pour ces remblais d'établir un dimensionnement spécifique et de constituer un dossier d'ouvrage. Ce dimensionnement devrait inclure systématiquement un calcul de stabilité et peut comporter, en fonction du contexte géologique, diverses analyses complémentaires (évolutivité du sol sous compactage, sensibilité aux retraits-gonflements, caractérisation de matériaux non conventionnels, etc.). Cela nécessite de disposer d'essais en laboratoire suffisamment représentatifs des caractéristiques des matériaux dans les conditions de mise en œuvre prévues.

Depuis 2010, il appartient au maître d'ouvrage de décider du suivi ou non de ces ouvrages. La surveillance et l'entretien peuvent s'inspirer des prescriptions de L'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA [13]).

Remarque : L'ITSEOA de 1979 considérait comme un remblai de grande hauteur tout remblai supérieur à 10 m. L'expert chargé d'analyser les pathologies d'ouvrages construits entre 1979 et 2010 devrait théoriquement disposer de renseignements conséquents sur la nature et la structure du remblai. Cependant, il est rare d'obtenir aujourd'hui ces renseignements (dossiers perdus ou incomplets, etc.).

2.3 - Les règles de mise en œuvre des remblais

Les matériaux constitutifs du corps de remblai, leur état hydrique au moment des travaux et la qualité du compactage sont des éléments clés de la tenue à long terme de l'ouvrage. Ils doivent donc faire l'objet d'attention lors de la mise en œuvre.

La mise en œuvre des remblais est guidée par deux éléments :

- le dossier de conception des ouvrages, traduit en termes contractuels dans le marché de travaux (CCTP, dossier de plan) ;
- le mouvement des terres et la stratégie adoptés par l'entreprise pour l'ordonnancement des travaux. Ces deux éléments coïncident fortement lorsque le niveau des reconnaissances géotechniques et des études menées en phase de conception est optimum.

La mise en œuvre des remblais est généralement conforme à la stratégie de l'entreprise et aux matériaux réellement rencontrés lors de la réalisation du mouvement des terres. Elle peut être très différente de ce qui aura été prévu dans le dossier de conception, et ceci d'autant plus que le dossier de conception aura été incomplet ou que le scénario de base proposé dans le marché aura été modifié par des variantes.

Seul un dossier de récolement complet reflétera les travaux effectivement réalisés.



2.3.1 - Les matériaux constitutifs du corps de remblai

Les matériaux réellement mis en œuvre dans un remblai proviennent en général des déblais les plus proches selon un schéma défini par l'entreprise dans ce que l'on appelle le mouvement des terres. Ce scénario simple peut être contredit par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre en cas d'enjeux techniques ou environnementaux particuliers détaillés dans le CCTP du marché.

Sauf spécification contraire, l'application des règles techniques et des critères de réemploi des matériaux dans le cadre de travaux de terrassement se fait conformément au GTR [7] et au GTS [8]. Pour les travaux antérieurs à 1992, c'est la RTR de 1976 qui s'appliquait. Pour les techniques de traitement des sols antérieures à 2000, les règles étaient plus empiriques et souvent définies au cas par cas dans les études géotechniques [24].

Au moment des travaux, l'entreprise définit la classification géotechnique des matériaux et leur répartition dans les déblais. Elle indique, en fonction de l'état hydrique du matériau et des conditions météorologiques, les principales modalités d'extraction et de mise en œuvre (tri, amélioration, compactage, hauteur maximale des remblais...) qu'elle appliquera dans son mouvement des terres.

Usuellement, on classe les remblais en deux grandes catégories selon la nature et l'agencement de leurs matériaux constitutifs.

2.3.1.1 - Les remblais homogènes

Le respect des règles techniques usuelles garantit théoriquement une certaine pérennité d'un remblai homogène. Toutefois, cette pérennité se heurte à :

- l'hétérogénéité naturelle du déblai d'où sont extraits les matériaux réutilisés. Comme ces derniers ne peuvent être que partiellement caractérisés durant les études de projet ou d'exécution, il est probable que des hétérogénéités locales persistent dans un remblai supposé homogène ;
- la difficulté de mettre en œuvre certains matériaux. Par exemple, la mise en œuvre des matériaux rocheux évolutifs (comme des marnes de classe R32) nécessite une réduction préalable de la granulométrie afin d'obtenir un mélange de petits blocs non déstructurés et d'une matrice fine compactable. Si cette réduction est insuffisante, les couches de remblai présentent alors un pourcentage de vides important ce qui favorise l'apparition de pathologies ;
- dans certains cas, la possibilité de déformations à moyen terme malgré le respect des règles de mise en œuvre usuelles. Par exemple, les prescriptions du GTR [7] ne permettent pas de s'affranchir des phénomènes de gonflement et de retrait des matériaux argileux. Ces phénomènes sont une cause récurrente de dégradations des plateformes routières.

2.3.1.2 - Les remblais hétérogènes

Un corps de remblai est dit hétérogène lorsqu'il est constitué d'au moins deux matériaux et/ou de caractéristiques éloignées. Ces remblais sont caractérisés par une hétérogénéité de la granulométrie, de la perméabilité et des propriétés mécaniques.

L'hétérogénéité d'un remblai peut se manifester suivant le profil en long et/ou le profil en travers.

2.3.1.2.1 - Les hétérogénéités suivant le profil en long

Les hétérogénéités suivant le profil en long sont normalement connues et organisées par le mouvement des terres qui affecte aux différents matériaux déblayés une zone de remblai.

2.3.1.2.2 - Les hétérogénéités suivant le profil en travers

Les hétérogénéités suivant le profil en travers peuvent avoir des origines diverses :

- *les dispositions constructives spécifiques* : lorsque des remblais de type « sandwich » (ou multicouches, déconseillés dans la pratique), « en caisson » (ou encagement), en « noyau » et/ou lorsque des dispositifs visant à confiner des matériaux sensibles voire faiblement pollués sont mis en œuvre, des hétérogénéités peuvent apparaître ;
- *l'organisation du chantier de terrassements* : lorsqu'un aménagement (piste de chantier, couche de protection hivernale non purgée, etc.) nécessaire à la construction du remblai a été intégré dans le corps de remblai, des hétérogénéités peuvent apparaître ;



- *les élargissements ou les réparations de remblai* : lorsque les matériaux d'élargissement ou de réparation sont d'une nature différente de celle constituant initialement le corps de remblai, des hétérogénéités peuvent apparaître. Normalement, l'étude de conception réalisée en amont prévoit les dispositions nécessaires pour gérer correctement les circulations d'eau et assurer un contact satisfaisant entre le remblai existant et le nouveau matériau (purge de la terre végétale, redans, drainage, etc.) ;
- *l'absence de gestion ou de traçabilité des mouvements de terre* : lorsque les matériaux d'un remblai ont été mis en œuvre tels qu'ils se présentaient au hasard du déblai, des hétérogénéités peuvent apparaître ;
- *les hétérogénéités diverses* : lorsqu'un matériau, non prévu initialement dans les dispositions constructives du remblai est enfoui, des hétérogénéités peuvent apparaître. Ces matériaux peuvent être par exemple des déchets de chantier non triés, des végétaux, etc. ce qui n'est pas normalement admissible.

Comme les guides classiquement utilisés en terrassement (GTR [7], GTS [8], GRT [9]) ne les abordent que partiellement, les remblais hétérogènes doivent être traités avec attention lors de leur conception et de leur mise en œuvre. En effet, les hétérogénéités du remblai peuvent favoriser l'apparition de nappes perchées ou confinées au sein du remblai. Ces nappes créent alors des surpressions d'eau parasites qui favorisent l'imbibition progressive de certaines couches ou peuvent entraîner des ruptures (Figures. 7 et 8). Par ailleurs, des migrations de fines vers les vides des matériaux plus grossiers peuvent aussi se produire.



Figure 7 : Point de sortie d'eau piégée dans un remblai et se manifestant au moment de travaux de reprise de talus (Source : Cerema Ouest)



Figure 8 : Remblai sandwich présentant un contraste de perméabilité entre la couche noire imperméable et la couche ocre perméable (Source : Cerema Ouest)

Remarque : Tous les remblais composites comme les « pneusols® », les remblais en matériaux allégés, les remblais renforcés par armatures ou bandes sont considérés comme des remblais hétérogènes. Néanmoins, ces remblais ne sont pas traités dans ce guide et font l'objet de recommandations constructives spécifiques.

2.3.2 - Les règles de compactage

Usuellement, le remblai est mis en œuvre par couches successives d'épaisseur limitée. Chaque couche fait l'objet d'un compactage adapté afin d'assurer une densification suffisante pour limiter les tassements du corps de remblai et assurer la stabilité de l'ouvrage.

Le GTR [7] établit les règles de compactage du remblai de manière à ce que les matériaux compactés atteignent en moyenne 95 % de la masse volumique sèche obtenue à l'Optimum Proctor Normal. Les recommandations de compactage sont établies en fonction de la nature, de l'état hydrique du matériau, de l'engin de compactage utilisé et de la performance mécanique recherchée. Ces recommandations précisent notamment les épaisseurs maximales des couches, l'énergie de compactage nécessaire ainsi que l'élément de contrôle via le Q/S. Le compactage fait l'objet d'une synthèse de l'ensemble des contrôles (Q/S et autres méthodes) dans le dossier de récolement des travaux de terrassement.



Des recommandations supplémentaires figurent dans le guide à conception et réalisation des terrassements [9]. Elles traitent des dispositions constructives notamment pour les bords de talus, pour les remblais contigus aux ouvrages d'art ou pour les zones compressibles. Par exemple, ce guide recommande de compacter les bords de talus selon la méthode excédentaire (Fig. 9) ou d'adopter un profil en « W ». Ces méthodes permettent d'assurer un niveau de compactage homogène du talus.

De plus, ce guide recommande également de végétaliser les talus afin de les protéger contre l'érosion et les ravinements et de les embellir (Fig. 10).



*Figure 9 : Élimination du bord de talus excédentaire
(Source : Cerema Ouest)*



*Figure 10 : Remblai en zone inondable : végétalisation de la partie supérieure
et base en matériau insensible à l'eau (Source : Cerema Normandie-Centre)*



2.4 - L'environnement immédiat du remblai

L'étude de l'environnement immédiat du remblai est importante pour la compréhension des mécanismes de déformation des remblais. En effet, l'environnement du remblai peut créer, aggraver ou révéler des pathologies. Par exemple, des pathologies d'ouvrages (murs, ponts, buses, etc.) situés à proximité du remblai peuvent fournir des renseignements intéressants sur le comportement d'ensemble du remblai.

On listera ci-dessous les éléments naturels (cours d'eau, nature du sol support) et techniques (couche de forme, couches de chaussée, équipement, etc.) de la zone d'influence d'un remblai pouvant créer, aggraver ou révéler une pathologie de remblai.

2.4.1 - L'environnement naturel du remblai

2.4.1.1 - Les écoulements souterrains et surfaciques

Les écoulements souterrains (aquifères) peuvent entraîner des mouvements du sol support. Ces mouvements se manifestent au niveau du remblai par des tassements, des effondrements.

Les écoulements surfaciques (rivière, écoulement d'eau) peuvent entraîner une érosion voire une rupture du talus notamment lors d'une crue exceptionnelle (Fig. 11). Dans le cas de remblais construits à proximité d'une rivière ou dans un site potentiellement inondable, l'état du pied de remblai devra donc être examiné avec attention.



Figure 11 : Érosion d'un talus de remblai consécutive à la crue du Gier (69)
(Source : DIR Centre-Est)

2.4.1.2 - La nature du sol support

La nature du sol support influe, directement ou indirectement, sur la pérennité du remblai (Fig. 12). Lors d'un diagnostic, il est donc important de s'y intéresser. Plusieurs cas peuvent notamment se présenter :

- *présence d'un sol support compressible* : ce type de sol est susceptible de provoquer des tassements à court ou long terme du remblai ou une rupture durant la construction ;
- *présence d'un sol support liquéfiable* : ce type de sol est susceptible de provoquer une « rupture » du remblai après un séisme ou vibration importante (vibrofonçage de palplanches par exemple) ;
- *présence d'un sol support gonflant* : ce type de sol est susceptible de soulever des remblais de faible hauteur. Il y aura l'apparition de fissures ;

- *remblais construits sur une ancienne décharge, une carrière remblayée* : ce type de sol est susceptible de provoquer des tassements à court ou long terme du remblai ou une rupture durant la construction ;
- *remblais construits sur pente instable* : ce type de sol est susceptible de provoquer des ruptures locales ou des glissements d'ensemble du site (Fig. 12) ;
- *présence d'une cavité souterraine d'origine anthropique ou naturelle* : cette présence est susceptible de provoquer des effondrements ou des affaissements du remblai (fontis).

L'examen des risques d'instabilité globale du site, en prenant en compte la nature du sol support et les écoulements, constitue un complément indispensable à l'inspection du remblai. S'il s'avère que l'ouvrage est construit sur un site potentiellement instable, la zone d'influence et le sol support devront être examinés attentivement. Dans certains cas, la zone d'influence pourra être étendue à l'ensemble du massif instable.



Figure 12 : Rupture d'un remblai sur pente instable (Source : MEDDE)

2.4.1.3 - La faune et la flore

La faune et la flore peuvent créer, aggraver, ou encore révéler une pathologie. Par exemple, la présence d'animaux fouisseurs peut endommager un remblai.

De même, la présence de racines dans un remblai en matériaux sensibles au gonflement-retrait peut accentuer les pathologies par le phénomène de succion racinaire (Fig. 13).



Figure 13 : Fissuration par retrait en lien avec le réseau racinaire des arbres (Source : Cerema Sud-Ouest)



2.4.2 - Les couches supérieures et les équipements

2.4.2.1 - Les couches supérieures

2.4.2.1.1 - La couche de forme

La couche de forme constitue la couche de transition entre le remblai et le corps de chaussée. Pendant la phase de mise en œuvre des couches de chaussée, elle améliore la protection du remblai contre les aléas météorologiques. La couche de forme joue également un rôle mécanique complémentaire à celui de la chaussée et participe à son dimensionnement.

Certaines pathologies de remblais peuvent être liées à la couche de forme. Par exemple, il arrive qu'une couche de forme constituée de matériaux drainants ne présente plus d'exutoire en profil en travers du fait de son obturation par l'accotement en matériaux peu perméables. Il se crée alors à proximité du talus des stockages d'eau temporaires qui vont progressivement dégrader le corps de remblai et peuvent se traduire par des zones de flaches révélées visuellement ou lors d'inspection par mesures au déflectographe.

2.4.2.1.2 - Les couches d'assise de chaussée

Les couches d'assise ont généralement un effet bénéfique sur la stabilité du remblai. En effet, ces couches minimisent les variations de teneur en eau dans le remblai en lui assurant une certaine protection.

Cependant, cette protection n'est pas nécessairement pérenne. Par exemple, les couches d'assise peuvent présenter des fissures qui favorisent localement et sur le long terme l'imbibition du corps de remblai. De même, la présence de terre-pleins centraux plantés peut aussi constituer une zone d'infiltration préférentielle du corps du remblai. Ces infiltrations peuvent détériorer le remblai et induire des pathologies. Lors d'un diagnostic, il convient donc de prêter attention à la qualité de la chaussée (présence de fissures, etc.) et à la physionomie des aménagements (présence de terre-pleins centraux, de bande dérasée en enduit ou enherbée, etc.).

Par ailleurs, les différents types de chaussées sont plus ou moins sensibles à la déformation du corps de remblai. Par exemple, les chaussées rigides (chaussée béton, enrobé à module élevé, etc.) peuvent masquer sans pathologie visible certaines déformations du remblai. Ces pathologies, qui seraient apparues sur une chaussée souple, peuvent alors rester masquées pendant une longue période. Elles se révéleront subitement à la rupture de la chaussée.

Enfin, si le remblai est situé sur un sol support compressible ou un terrain instable, les rechargements successifs de la chaussée suite aux tassements du sol support peuvent entretenir le mouvement par apport de charges.

L'examen des déformations des couches de chaussées est riche d'enseignements sur les mouvements internes du remblai. Il est à noter la possibilité d'une expression différente des désordres (flache ou fissure) qui soit fonction de la structure de chaussée (souple ou rigide) malgré une même origine pour ce désordre.

2.4.2.2 - Les équipements et les autres surcharges

Les équipements de signalisation, de sécurité et de viabilité de la route ou encore les murs antibruit interagissent par leurs ancrages et/ou leurs charges avec le corps de remblai. Il est donc primordial de les observer.

Ces équipements interagissent de deux façons sur le remblai.

Premièrement, certains équipements (glissière de sécurité, poteaux, supports, etc.) peuvent constituer un point singulier « fragile » sur lequel des déformations du remblai peuvent apparaître de manière plus sensible. Dans ce cas, les équipements ne sont pas directement à l'origine de la pathologie, mais sont plutôt un élément révélateur, voire aggravant lorsque leur présence favorise les entrées d'eau ou crée des zones de prédécoupage (glissière métallique) ou favorise la stagnation de l'eau (glissière béton). Souvent, leur présence améliore la perception visuelle de la pathologie par des variations d'inclinaison (Fig. 14), des défauts d'alignement (murets, glissière) ou d'altitude.

Deuxièmement, certains équipements (panneaux à message variable, portiques, etc.), qui ont un massif d'ancrage conséquent, peuvent créer des surcharges locales. Dans ce cas, les équipements sont parfois directement à l'origine de la pathologie.



Figure 14 : Potence inclinée : l'inclinaison de la potence peut révéler une pathologie du remblai (Source : Cerema Ouest)

Certains types d'ouvrage sont également susceptibles d'engendrer des surcharges sur les remblais (dépôt, merlon, etc.).

2.4.3 - Les systèmes de drainage et d'assainissement

Les dysfonctionnements des systèmes de drainage et d'assainissement constituent des points critiques pour la pérennité des remblais. En effet, leurs défauts sont susceptibles d'entraîner des stockages d'eau au contact ou à l'intérieur du remblai. Ces stockages peuvent aboutir à une imbibition progressive du corps de remblai et/ou à des surpressions interstitielles générant un glissement, voire à de brusques déboussages. Par ailleurs, la circulation d'eau parasite peut éroder prématurément le remblai (Fig. 15), provoquer des instabilités locales, ou engendrer des départs de fines au cœur de l'ouvrage.

Vérifier la conception, l'état et le fonctionnement des systèmes de drainage et d'assainissement constitue un élément essentiel du processus de diagnostic du remblai. Les passages par caméra ou endoscope peuvent s'effectuer même sur des diamètres faibles (Fig. 16).

Les remblais ne sont généralement pas pourvus de systèmes de drainage interne puisque les dispositions constructives initiales sont supposées éviter les infiltrations d'eau. Les systèmes de drainage sont généralement situés à l'interface remblai-sol support ou au contact déblai-remblai. Ils servent soit à capter des sources ou des écoulements de nappes (tranchées drainantes) soit à évacuer les eaux issues de la consolidation d'un sol support compressible (tapis drainant).

En cas de réparation ou d'élargissement, il est en revanche courant que des systèmes de drainage soient mis en place au contact de l'ancien et du nouveau remblai, notamment lorsque les matériaux mis en œuvre présentent une perméabilité plus faible que ceux en place.

Vis-à-vis des eaux de surface, des dispositifs de collecte et d'évacuation sont nécessaires pour éviter les infiltrations dans le corps de remblai. Divers systèmes d'assainissement peuvent être mis en œuvre pour atteindre cet objectif : bourrelet de rive, cunette, caniveau à grille ou à fente, fossés, descentes d'eau, etc.

Lorsqu'il s'agit de dispositifs rigides, les mouvements du remblai, plus déformable, peuvent entraîner des dégradations (fissuration, rupture). Les caniveaux, fossés et descentes d'eau peuvent par ailleurs être colmatés par des systèmes racinaires denses ou des débris divers, végétaux ou non.



Figure 15 : Ravinements de talus de remblai dus à des débordements de descente d'eau
(Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 16 : Exemple d'auscultation de réseaux d'eau enterrés qui sont autant de point d'infiltration d'eau dans le remblai
(à gauche déboîtement de tuyau, à droite, effondrement et obstruction d'un tuyau) (Source : Cerema Est)

2.4.4 - Les ouvrages en interaction avec le remblai ou sa zone d'influence

De nombreux ouvrages (les culées d'ouvrage d'art, les ouvrages voûtés et les ouvrages hydrauliques) traversent les remblais afin de rétablir les circulations transversales, qu'elles soient hydrauliques, animales, routières ou ferroviaires. Généralement conçus en béton, ces ouvrages ne peuvent supporter que de faibles déplacements et sont donc dimensionnés en conséquence. Des tassements plus importants des remblais contigus peuvent alors être observés : ils trouvent souvent leur origine soit dans un défaut de compactage, soit dans un tassement différentiel du sol support, particulièrement visible lorsque l'ouvrage est fondé sur pieux.

Par ailleurs, certains ouvrages peuvent être à l'origine des désordres observés sur les remblais : les ouvrages et buses hydrauliques peuvent générer des circulations d'eau dans le corps du remblai suite à des fuites (déboîtement de buses, etc.) ou des défauts de tête.



Ce dernier cas est parfois constaté de part et d'autre d'un ouvrage de franchissement hydraulique (ruisseau, rivière, etc.) lorsque l'étanchéité de la tête amont de l'ouvrage (souvent une buse) est mal assurée et que le cheminement hydraulique peut se faire latéralement. Cela peut également être le cas lorsqu'un fonçage a été effectué dans un remblai contenant des blocs de taille importante, par déchaussement des blocs lors de l'opération et donc création de vides, avec possible remontée d'un fontis sur la plateforme en cas extrême (avec circulation d'eau).

Les culées de certains ouvrages, situées en point bas, peuvent faire aussi obstacle à l'écoulement des eaux et induire des désordres sur les remblais par stagnation d'eau et/ou entraînement des fines en cas de dysfonctionnement de leur système de drainage.

2.4.5 - Les réseaux

Les remblais sont généralement parcourus par de nombreux réseaux. Ces réseaux sont soit liés aux besoins de l'infrastructure elle-même (éclairage, signalisation, réseau d'appel d'urgence, etc.), soit liés à un besoin extérieur à l'infrastructure (transport d'information, transport d'énergie, transport de fluide, etc.).

La présence de ces réseaux peut être à l'origine de pathologies (Fig. 17). Par exemple, l'existence de fuites au sein des réseaux d'eau entraîne généralement des désordres. Si le débit de fuite est important, l'évolution des désordres peut être rapide.

Les réseaux peuvent constituer, selon la nature des matériaux utilisés en remblayage, des drains favorisant la circulation d'eau le long des canalisations ou des lits de pose, ou au contraire des écrans aux écoulements (béton auto-compactant, etc.).

L'enfouissement des réseaux est généralement réalisé par tranchée ouverte à la pelle ou à la trancheuse. Cette technique peut faire apparaître des points de faiblesse si le remblayage n'est pas conforme aux spécifications du guide technique de remblayage des tranchées [15], ou au contraire des points durs lorsque le remplissage est très rigide (béton par exemple). L'utilisation de la trancheuse peut également sectionner les drains de la chaussée ou du remblai et générer des désordres.



Figure 17 : Fissures correspondant à une tranchée de « fibre optique »
(Source : Cerema Sud-Ouest)



3 Les évolutions et les désordres de remblais

3.1 - Les principales évolutions des remblais

Les remblais étant fondamentalement des ouvrages souples et plus ou moins évolutifs, ils peuvent, sur le long ou le très long terme (plusieurs décennies), présenter des pathologies malgré l'absence de défauts majeurs à la conception et à la construction. Par exemple, les cycles annuels de séchage/humidification des matériaux de remblai argilo-limoneux ne se compensent pas parfaitement, ce qui se traduit à quelques mètres sous la surface par une augmentation lente mais irréversible des teneurs en eau. Cela est susceptible à long terme d'aboutir à des comportements pathologiques (évolution sous imbibition). En général, la compréhension de tels mécanismes d'évolution, lents, nécessite des investigations approfondies.

Des pathologies peuvent aussi se déclarer après des travaux divers sur le remblai (tranchée, fonçage, etc.), qui viennent modifier l'équilibre établi du sol. Chaque situation présente alors ses spécificités et il serait vain de chercher à toutes les lister ici.

Enfin, il arrive que certains désordres, liés visiblement à des mouvements lents du remblai au cours du temps, aient une origine mal définie. Souvent, ces mouvements sont arbitrairement qualifiés de « fluage du remblai », terme générique associant vraisemblablement plusieurs mécanismes de déformation.

Les évolutions des remblais ont été divisées en deux catégories :

- les évolutions « internes » : ces évolutions concernent uniquement le corps de remblai (Fig. 18) ;
- les évolutions « externes » : ces évolutions concernent la zone d'influence et le sol support.

Seuls les cas d'évolution les plus courants sont abordés, sans prétention d'exhaustivité.

3.1.1 - Les évolutions internes

3.1.1.1 - Le comportement interne d'un remblai

À un instant donné, le fonctionnement interne du remblai, incluant sa stabilité propre, est lié :

- aux caractéristiques mécaniques du matériau constitutif, en particulier sa résistance au cisaillement, elles-mêmes dépendantes :
 - des conditions de mise en œuvre : compactage (tridimensionnellement hétérogène), conditions météorologiques en phase travaux, respect des règles de construction, utilisation de la méthode excédentaire ou profil en W, etc. ;
 - de l'état de saturation et de son évolution (imbibition, dessiccation, etc.) ;
 - des évolutions irréversibles qui se sont éventuellement produites au cours de la vie de l'ouvrage (roche évolutive, tassement sous poids propre, évolution physico-chimique de sous-produit industriel, etc.) ;
- à la géométrie du remblai.

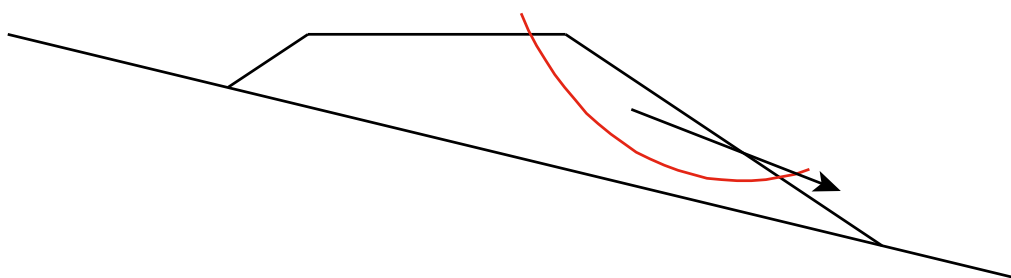


Figure 18 : Évolutions internes : le schéma représente un exemple de rupture du talus de remblai



L'étude initiale de la stabilité interne de l'ouvrage en terre ne doit pas faire oublier que, sur le long terme, des évolutions néfastes sont susceptibles d'affecter les corps de remblai. Ces dernières ne conduisent pas forcément à la « rupture » mais les déformations engendrées peuvent devenir inacceptables vis-à-vis des contraintes d'exploitation. Quelques mécanismes d'évolution sont abordés à titre d'exemple dans la section suivante.

3.1.1.2 - Les principales évolutions internes recensées

Après la construction du remblai, l'environnement naturel et technique et les interventions anthropiques génèrent des sollicitations qui altèrent le fonctionnement initial ou aggravent des défauts existants. Les pathologies affectant le fonctionnement interne du remblai sont fréquemment imputables aux principales évolutions listées ci dessous. Il est précisé que les évolutions liées aux changements climatiques peuvent constituer des facteurs aggravant.

3.1.1.2.1 - Tassement du corps de remblai

Localisé ou généralisé, le tassement du corps de remblai est en général consécutif à un défaut de compactage et/ou à une évolution du matériau (effondrement sous imbibition, retrait suite à une forte sécheresse, etc.). Il peut également être engendré par des entraînements de fines.

3.1.1.2.2 - Amorce de rupture globale ou locale du talus

La rupture du talus constitue un risque important pour le gestionnaire (Fig. 19), dans la mesure où elle peut remettre en cause la capacité de service du remblai, voire affecter la sécurité des usagers si la rupture est brutale.

Ces types d'évolution sont généralement liés :

- à des caractéristiques mécaniques insuffisantes des matériaux constitutifs du remblai au regard de la géométrie adoptée : évolution du sol sous imbibition, défaut de compactage, présence d'une couche médiocre et continue au sein de l'ouvrage par exemple ;
- aux conditions hydriques (Fig. 20) : en particulier, les réseaux d'écoulement parasites au sein du remblai (liés par exemple à des défauts de l'assainissement de surface ou de dispositifs de drainage) ou la présence de forts contrastes de perméabilité sont susceptibles de favoriser l'apparition de surpressions interstitielles nuisibles à la stabilité d'ensemble ;
- à l'environnement naturel local : déracinement d'arbres, terriers d'animaux, surcharge en crête de remblai, etc.

Il arrive par exemple que des talus en matériau argileux soient construits avec des pentes dépassant la valeur de leur angle de frottement (par exemple une pente à 3H/2V présente un angle de 34° avec l'horizontale) : le talus tient alors à court terme grâce à la cohésion apportée par la non-saturation des matériaux. Mais à moyen terme, l'imbibition par l'impluvium peut conduire à une baisse de la cohésion apparente liée à une saturation progressive du matériau amenant la rupture (Fig. 20).

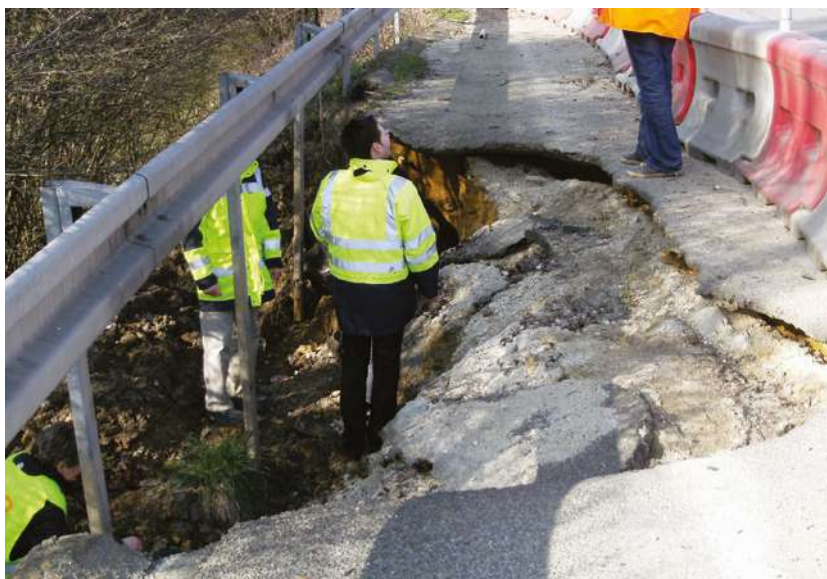


Figure 19 : Rupture locale de talus (Source : DIR Nord)



AVANT



APRÈS

Figure 20 : Exemple de rupture de talus liée à des infiltrations d'eau (Source : DIR Nord)

3.1.1.2.3 - Liquéfactions de surface et ravinements de talus

Par rapport à la rupture de talus, cette pathologie reste superficielle et ne remet pas en cause la stabilité interne. Ces deux phénomènes (Figures 21 et 22) sont généralement liés à des circulations d'eaux de surface mal canalisées, à un défaut de végétalisation ou à une mauvaise tenue de la terre végétale. La solifluxion peut être aussi parfois consécutive au gel-dégel. Il en résulte une érosion du talus, qui pourra se stabiliser progressivement (redéveloppement d'un couvert végétal pérenne) ou évoluer vers des situations préjudiciables à plus ou moins long terme.



Figure 21 : Liquéfaction de surface sur un merlon (Source : Cerema Ouest)



Figure 22 : Glissements superficiels (Source : Cerema Ouest)

3.1.1.2.4 - Reptation de talus

Les déformations (Fig. 23) sont générées par la succession des retraits et gonflements des argiles, généralement sur des matériaux de classe A2, A3 ou A4 selon le GTR [7]. Le mouvement est la combinaison des deux phénomènes de directions différentes, ce qui provoque un gradient de déformation au niveau du talus. Les évolutions se répercutent progressivement jusqu'à la plateforme, générant à long terme une rotation des crêtes de talus et une flexion d'ensemble accompagnées de fissures longitudinales. Il n'y a pas de surface de cisaillement préférentielle en profondeur. Le phénomène est plus particulièrement sensible dans le cas de bords de remblais mal compactés et dans les géométries favorisant les cycles d'imbibition/dessiccation (accotements très larges, succion racinaire, par exemple).

On notera qu'il peut exister également des phénomènes de fissuration en talus ou accotement liés au simple retrait des matériaux argileux en période sèche, sans qu'il y ait forcément un processus de reptation tel que décrit ci-avant. Les fissures apparaissent alors suite à un épisode de sécheresse intense, mais on ne retrouve pas nécessairement une évolution lente du talus au cours du temps. L'apparition de ces fissures favorise l'infiltration des eaux météorologiques.



Figure 23 : Fissuration sur chaussée et basculement des panneaux de circulation en accotement provoqués par des phénomènes de reptation de talus (Source : Cerema Sud-Ouest)



3.1.2 - Les évolutions externes

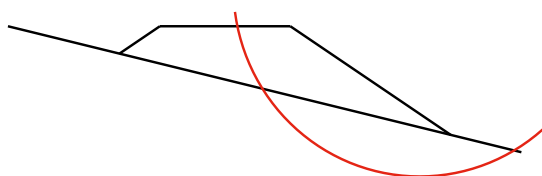
3.1.2.1 - Le comportement externe d'un remblai

Le comportement d'un remblai lié à des causes externes est principalement lié à la nature du terrain support du remblai. Plusieurs points sont usuellement examinés :

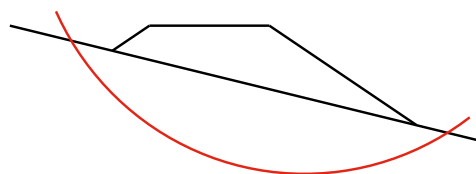
- les tassements du sol support sous le poids du remblai, notamment lors de la présence de sols compressibles : l'évolution des tassements est essentiellement liée au rééquilibrage des pressions interstitielles (phénomène de consolidation). L'amplitude et la durée des tassements sont évaluées lors des études et peuvent donner lieu à des dispositions constructives spécifiques (remblai allégé, drainage pour accélérer la consolidation, etc.). Dans certains cas, une composante de fluage, se poursuivant à long terme, peut néanmoins rester présente ;
- les remontées de vide à la surface: soutirage de matériau (suffosion),
- la capacité portante du sol support : la capacité portante du terrain peut limiter la hauteur maximale de remblai et induire des contraintes lors de la construction (phasage, surveillance, etc.). C'est en effet au cours de la réalisation des travaux que les risques d'une rupture par poinçonnement du sol support sont les plus présents. À nouveau, ces risques concernent essentiellement les terrains naturels compressibles ;
- la stabilité au glissement :
 - vis-à-vis de surfaces de rupture traversant le remblai et/ou le sol support,
 - vis-à-vis d'une rupture globale de l'ouvrage.

Des évolutions à court ou moyen terme sont également susceptibles de se produire lorsque le remblai vient s'appuyer sur une pente naturelle présentant une ou plusieurs couches continues de faible résistance mécanique. On étudie alors la possibilité d'apparition de surfaces de cisaillement englobant tout ou partie du remblai et on vérifie que des coefficients de sécurité suffisants sont atteints. Le calcul s'attache ainsi à vérifier si la surcharge apportée par le remblai ne peut pas rompre l'équilibre du sol support (Fig. 24).

Lorsque les ruptures externes interviennent longtemps après la construction, elles sont en général liées à une variation de la nappe ou à des circulations d'eau temporaires, ou encore à des interventions anthropiques remettant en cause l'équilibre initial.



a) Exemple de rupture associant le remblai et le sol



b) Exemple de grand glissement du site

Figure 24 : Fonctionnement externe

3.1.2.2 - Les principales évolutions externes recensées

Les évolutions externes se traduisent le plus souvent par des phénomènes de tassement ou d'amorce de rupture.

3.1.2.2.1 - Tassement du sol support

Les tassements du sol support peuvent avoir diverses origines : sol support compressible, débouillage de karsts, entraînement de fines, rabattement de nappe, etc.

Lorsque les tassements sont liés à la consolidation d'un sol support compressible, les déformations s'amortissent au cours du temps, à une vitesse qui dépend de la perméabilité du sol et des dispositions de drainage retenues. Elles sont généralement plus importantes dans l'axe du remblai que sur les côtés.



3.1.2.2.2 - Amorces de rupture du sol support

Les mécanismes sont du type de ceux illustrés en Fig. 24, les surfaces de rupture pouvant présenter des formes diverses en fonction du contexte géologique (glissement plan par exemple). On ajoutera également la rupture par poinçonnement du sol support, liée à une insuffisance de capacité portante (terrains compressibles essentiellement).

Ces différentes évolutions dépendent des caractéristiques hydriques et mécaniques des matériaux et des conditions hydrauliques locales.

On notera qu'il existe également d'autres cas particuliers d'évolutions externes (cavités souterraines, dissolution du sol par exemple) qui ne sont pas détaillés ici.

3.2 - Le catalogue des désordres

Un catalogue des désordres est proposé dans le Tableau 1 ci-après afin d'aider à l'établissement du relevé des défauts et désordres et à son analyse. La codification adoptée est la suivante :

- les lettres représentent l'ensemble de défauts observables au niveau d'une même partie de l'ouvrage en terre : Z = zone d'influence, P = plateforme, C = corps de remblai, D = drainage assainissement, O = ouvrage en interaction avec le remblai ;
- les chiffres représentent la numérotation des désordres, sans ordre d'importance ;
- les parties foncées correspondent à des désordres pouvant présenter un caractère grave, voire très grave.

Il est important de noter que le caractère évolutif des défauts et désordres sur un ouvrage en service, et des déformations notamment, est dans tous les cas assez inquiétant, et souvent précurseur de désordres plus graves. Il convient alors de prendre des dispositions rapides (de l'ordre de 1 à 5 jours) tenant compte de la sécurité lors des interventions.

Si le remblai inspecté est instrumenté (topographie, inclinomètre, piézométrie, etc.), il convient de vérifier la présence et le bon état apparent des dispositifs de suivi. Une campagne de relevés doit être programmée en parallèle du diagnostic. Ce relevé n'est pas obligatoirement réalisé par le géotechnicien et peut faire l'objet d'une intervention séparée.

N°	Défauts et désordres apparents	Origines possibles	Critères influençant la gravité
Défauts et désordres apparents au niveau de l'environnement naturel du remblai et de sa zone d'influence			
Z1	• fissuration du terrain amont (en arc de cercle), dans le cas d'un remblai sur pente	• amorce de grand glissement du site	• continuité, longueur et ouverture des fissures • présence et importance d'un rejet • fissures non traitées
Z2	• bourrelets de terrain	• mouvement général du site • poinçonnement du sol support par insuffisance de portance	• phénomène localisé ou étendu
Z3	• végétation importante et typique de zones humides	• présence d'eau : rupture de canalisation, problème d'assainissement, modification du régime de la nappe, etc.	• écoulement d'eau en continu • zone inondable • remblai rasant
Z4	• inclinaison anormale d'arbres	• grand glissement du site • autre mouvement général du site (reptation de pente, fluage, etc.)	• caractère évolutif du phénomène • phénomène localisé ou étendu
Z5	• érosion, ravinement du terrain	• dysfonctionnement ou absence de dispositifs de rétablissement de la circulation des eaux de surface • sortie de drains • drainage du terrain naturel défaillant • absence de végétation • approfondissement de fossés • matériaux facilement érodables	• phénomène localisé ou étendu • entraînement de matériaux • venues d'eau en amont du remblai • absence d'entretien des dispositifs existants • rapidité de l'évolution du phénomène • présence de sables fins (type sable à lapin)



N°	Défauts et désordres apparents	Origines possibles	Critères influençant la gravité
Z6	tassement du terrain naturel	- sol support compressible - rupture de canalisation enterrée - effondrement de cavités souterraines (naturelles ou anthropiques) ou de zones anciennes remblayées	- phénomène localisé ou étendu - site karstique ou minier - présence de vides à proximité de la surface - présence de travaux de génie civil à proximité (injections, battage de palplanche, fonçage, etc.)
Z7	effondrement local du terrain environnant	- effondrement de cavités souterraines - formation de cavité par entraînement de fines ou dissolution - rupture d'une canalisation enterrée	- importance de l'effondrement - sensibilité du sol support à la dissolution - présence de travaux de génie civil à proximité (injections, battage de palplanche, fonçage, etc.) - site karstique ou minier - rupture des canalisations enterrées ou des ouvrages hydrauliques (buses)
Défauts et désordres apparents au niveau des éléments surmontant le remblai (chaussée, accotements et terre-pleins, équipements)			
P1	fissuration de la plateforme en arc de cercle (Fig. 25)	- amorce d'une rupture d'ensemble du remblai, incluant ou non le sol support : - présence d'une couche de faibles caractéristiques mécaniques (origines diverses) - sol support sollicité au delà de sa limite de résistance - évolution sous imbibition de matériaux rocheux évolutifs mis en œuvre de manière incorrecte* - tassement par défaut de compactage localisé	- continuité, longueur, ouverture et profondeur des fissures - présence et importance d'un rejet - caractère évolutif du phénomène - fissures non traitées
P2	fissuration longitudinale de la plateforme (sans rejet) (Fig. 26)	- retrait sous l'effet de la sécheresse - problème de structure de chaussée - mouvement d'ensemble du remblai (origines diverses) - matériau rocheux évolutif mis en œuvre de manière incorrecte - évolution sous imbibition d'un sol mal compacté (sans rejet si tassement régulier) et/ou sensible à l'eau - reptation de talus par gonflements-retraits successifs ou par fluage - sol support gonflant (pour un remblai de faible hauteur) - remblai de réseau enterré mal compacté - travaux récents (remblayage, élargissement, etc.)	- continuité, longueur ouverture et profondeur des fissures - végétation à fort système racinaire à proximité de la chaussée - trafic de chaussée en augmentation - fissures non traitées
P3	fissuration avec rejet (affaissement de l'une des lèvres, Fig. 27 et Fig. 28)	- évolution sous imbibition d'un sol mal compacté et/ou sensible à l'eau - eaux de fonte - matériau rocheux évolutif mis en œuvre de manière incorrecte - cycles de gonflement/retrait du matériau - présence d'une couche de faibles caractéristiques mécaniques (origines diverses) - sol support sollicité au-delà de sa limite de résistance - amorce de rupture du remblai (voir origines P1) ou du talus (voir C1) - reptation de talus par gonflements-retraits successifs ou par fluage	- continuité, longueur, ouverture et profondeur des fissures - importance du rejet - caractère évolutif du phénomène - matériaux mis en œuvre à l'état sec ou en période de sécheresse - défauts d'assainissement permettant l'infiltration d'eau dans le remblai - déformations caractéristiques d'une loupe de glissement : rejet, courbe refermée et affaissement local ayant une échelle en rapport avec les dimensions de l'ouvrage - fissures non traitées



N°	Défauts et désordres apparents	Origines possibles	Critères influençant la gravité
P4	tassements visibles sur la plateforme, localisés (flaches, faïençage) ou généralisés	- sol support compressible - défaut de compactage de la PST - évolution sous imbibition d'un sol mal compacté et/ou sensible à l'eau - matériau rocheux évolutif mis en œuvre de manière incorrecte - mauvais traitement d'une zone de transition déblai-remblai - entraînement de fines par défaut de collecte des eaux - remontée de fontis, mise en tension de géotextile de renforcement	- apparition de rejets ou de fissures en arc de cercle - stagnation d'eau - présence de cavités souterraines (sites miniers ou karstiques) - matériaux de pst très hétérogènes en argilosité - mauvais traitement d'une zone de transition déblai-remblai
P5	déplacements latéraux	- fluage du sol support - présence d'une couche de faibles caractéristiques mécaniques (origines diverses) - évolution sous imbibition d'un sol mal compacté et/ou sensible à l'eau - matériau rocheux évolutif mis en œuvre de manière incorrecte - reptation du talus par gonflements-retraits successifs ou par fluage	- caractère évolutif du phénomène - glissement de grande ampleur
P6	inclinaison de poteaux ou de barrières de sécurité (Fig. 14)	glissement du talus (voir C1) ou grand glissement du site en cas d'inclinaison vers l'amont, reptation de pente en cas d'inclinaison vers l'aval	- caractère évolutif du phénomène - phénomène étendu
Défauts et désordres apparents au niveau du corps du remblai (noyau et talus)			
C1	glissement de talus (Fig. 20)	- présence de matériaux de faibles caractéristiques mécaniques (argileux) - pente de talus mal adaptée aux matériaux de remblai - évolution sous imbibition de matériaux rocheux évolutifs mis en œuvre de manière incorrecte - saturation du remblai liée à des venues d'eau ou des inondations - mise en charge due à un stockage d'eau au cœur du remblai (d'origines diverses)	- phénomène étendu sur un long linéaire - suintement d'eau et entraînement de matériau - présence de surcharges en tête - fouille en pied - pente supérieure à 3H/2V - période de pluviométrie ou d'inondation récente et importante - signes d'évolution régressive - présence ou mise en place d'un réseau enterré
C2	gonflement/bourrelets en talus	- évolution d'une couche de faibles caractéristiques mécaniques - tassement de la zone latéral du remblai par défaut de compactage - évolution sous imbibition de matériaux rocheux évolutifs mis en œuvre de manière incorrecte - mouvement général révélateur d'une rupture - loupe de glissement localisée	défauts P1, P3, P5, C4 et C5
C3	coulées superficielles, érosion et ravinement, glissement de peau (Fig. 21 et Fig. 22)	- évolution sous imbibition de sols sensibles à l'eau et/ou facilement érodables - caractéristiques mécaniques faibles en talus et/ou accotement (origines diverses) - matériau sollicité par des descentes d'eau non maîtrisées - absence de végétation en talus - mauvaise mise en œuvre de la terre végétale (météorologie défavorable, pas de préparation du support, etc.) - épaisseur de terre végétale trop importante (> 20 cm) ou pente trop raide pour la terre végétale	- phénomène étendu sur un long linéaire - rapidité de l'évolution du phénomène - accumulation de matériau en pied - alternance de gel-dégel, ou pluviométrie importante - arrivées d'eau, suintements - pente supérieure à 3H/2V



N°	Défauts et désordres apparents	Origines possibles	Critères influençant la gravité
C4	• inclinaison anormale d'arbres, de poteaux (Fig. 14)	• glissement du talus (voir C1) ou grand glissement du site en cas d'inclinaison vers l'amont, reptation de pente en cas d'inclinaison vers l'aval	• rapidité d'évolution du phénomène • phénomène étendu au-delà du remblai (zone d'influence)
C5	• présence de végétation dense et typique de zones humides (Fig. 31)	• absence ou manque d'entretien • contrastes de perméabilité dans les matériaux constitutifs du remblai (remblais « sandwich » notamment) • mauvais fonctionnement du dispositif d'assainissement ou de drainage (sortie de drain obstruée par exemple) • absence de drainage des venues d'eau en provenance des déblais adjacents ou du terrain naturel	• phénomène étendu • suintements et résurgences d'eau
Défauts et désordres apparents au niveau des systèmes d'assainissement et de drainage			
Partie supérieure : plateforme			
D1	• stagnation d'eau sur la chaussée	• absence ou défaut du dispositif de traitement des eaux (assainissement et drainage) • changement de dévers • tassement localisé de la plateforme (voir origines P4) ou point bas sur la chaussée	• absence de drainage • proximité d'un déblai • importance du phénomène
D2	• dégradation ou colmatage des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux	• défaut d'entretien • tassements et déformations du remblai • végétation envahissante	• infiltrations • stagnation d'eau • résurgences ou débordements
D3	• suintements, venues d'eau (remblais en pente notamment)	• défaut /absence de drainage, en particulier à l'interface déblai/remblai	• stagnation d'eau • défauts C1, C4, C5, P4, P6
Partie inférieure : talus et pied de remblai			
D4	• stagnation d'eau dans les dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux	• défaut d'entretien • mouvements de terrain divers	• infiltrations • importance du phénomène
D4 bis	• stagnation d'eau en risberme (Fig. 30)	• défaut d'entretien • géométrie des risbermes inadaptée • défaut du dispositif d'évacuation	• importance du phénomène • défauts C1 à C5
D5	• rupture des descentes d'eau	• défaut d'entretien • mouvements de terrain divers • mauvais captage des eaux de chaussée	• infiltrations • stagnations d'eau • érosion du talus
D6	• suintements, venues d'eau	• défaut /absence de drainage, en particulier à l'interface déblai/remblai • dysfonctionnement du système d'assainissement de surface • infiltrations depuis la plateforme (résurgence depuis le TPC ou l'accotement notamment) • remontée de la nappe dans le corps de remblai (remblais sur pente), • circulation d'eau non captée (source, ancien drainage, etc.)	• stagnation d'eau • permanence du phénomène
D7	• colmatage ou altération d'un dispositif de drainage (interface remblai / sol support en particulier)	• manque d'entretien • défaut de réalisation (initial ou lors d'une modification de géométrie) • végétation envahissante • vandalisme	• importance des venues d'eau affectant ou susceptibles d'affecter le remblai



N°	Défauts et désordres apparents	Origines possibles	Critères influençant la gravité
Défauts et désordres apparents au niveau des ouvrages en interaction avec le remblai			
01	- déformation et/ou fissuration - déboîtement d'éléments préfabriqués (Fig. 32)	- mouvements et tassements différentiels soit de l'ouvrage, soit du terrain environnant (remblai ou sol support) - défaut de conception de l'ouvrage (non prise en compte de l'effet marston par exemple) - défaut de construction de l'ouvrage - sollicitations non prévues - érosion des matériaux supports ou développement d'une cavité sous l'ouvrage	- évolution brutale et fort rejet - présence de cavités souterraines
02	contacts entre tablier et culée (Fig. 29)	- basculement de culée lié à des mouvements du remblai - mauvaise réalisation des remblais techniques - défaut de conception ou de construction de l'ouvrage ou des fondations	- fissures transversales en arrière de la culée - caractère évolutif
03	rupture	- glissement d'ensemble du remblai ou du sol support - défaut de conception ou de construction de l'ouvrage ou des fondations	- présence d'eau - origine de la rupture - ouverture des fissures
04	suintements, venues d'eau	présence d'eau dans le remblai	voir D1 à D7
Nota : Pour les ouvrages d'art (dont ouvrages hydrauliques de diamètre supérieur à 2 mètres), on se reportera aux analyses réalisées lors des inspections périodiques et/ou au guide technique adapté (IQOA pour le réseau routier national). On examinera également lors de l'inspection du remblai les ouvrages hydrauliques de diamètre inférieur à 2 m.			

Tableau 1 : Catalogue des désordres et des défauts apparents



Figure 25 : Fissures circulaires avec rejet témoignant d'une rupture du talus de remblai (Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 26 : La fissure longitudinale qui se manifeste au niveau des glissières ou en bord de remblai est due à des phénomènes de tassements différentiels caractéristiques d'un sous-compactage de bord de remblai (désordre P2). Ces phénomènes peuvent se manifester rapidement après la réalisation de l'ouvrage, lorsque le talus excédentaire n'a pas été réalisé ou éliminé, ou le plus souvent lors d'un élargissement de remblai. (Source : Université Gustave Eiffel)



Figure 27 : Affaissement et fissure avec rejet consécutifs à la sécheresse de 2003 (Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 28 : Affaissement d'un accotement consécutif à la sécheresse de 2003 (Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 29 : Tassement différentiel du remblai contigu à un ouvrage, bien visible sur les glissières de sécurité (Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 30 : Stagnation d'eau en risberge intermédiaire (remblai en cours de construction) (Source : Cerema Ouest)



Figure 31 : Végétation typique de zones humides (prêles, rond blanc dans la figure) en pied de remblai (Source : Cerema Sud-Ouest)



Figure 32 : Déboîtement d'éléments de buse préfabriquée, remontée de matériaux
(Source : Cerema Sud-Ouest)

3.3 - Les facteurs d'évolution défavorable

Les facteurs d'évolution défavorable sont les facteurs susceptibles de provoquer ou d'aggraver certaines pathologies. Ce concept est à rapprocher des « facteurs de risque de désordres » des guides de diagnostic des murs de liste II [1].

Ces facteurs permettent d'analyser la sensibilité du remblai, dans son état de dégradation actuel, à des évolutions préjudiciables. Ils peuvent constituer des indicateurs vis-à-vis de l'urgence des mesures de sauvegarde, ou permettre de hiérarchiser techniquement les priorités d'intervention entre plusieurs remblais. Ils sont pris en compte dans la démarche de diagnostic (Chapitre 5).

On rappellera que des études insuffisantes et/ou une mise en œuvre de mauvaise qualité constituent aussi des facteurs défavorables, souvent difficiles à évaluer.

Pour les remblais routiers, les facteurs d'évolution défavorable sont pour l'essentiel les suivants (liste non exhaustive) :

3.3.1 - La géométrie du remblai

- élargissement de remblai ;
- sols mis en œuvre avec un profil en travers mixte (déblai/remblai) ;
- pente de talus inadaptée aux matériaux mis en œuvre.

3.3.2 - Les matériaux constitutifs du remblai

- sols sensibles à l'eau dont les caractéristiques mécaniques ont pu évoluer avec la teneur en eau (le caractère évolutif des matériaux naturels est défini dans le GTR [7]) ;
- remblais présentant des contrastes de perméabilité ou de caractéristiques mécaniques importants (remblais sandwichs, encagements, etc.) ;
- sols sensibles à l'érosion interne en cas de circulation d'eau ou de gradients hydrauliques ;
- conditions de mise en œuvre difficiles (météorologie défavorable, zones restreintes, etc.) ;
- matériaux de remblai difficiles à mettre en œuvre (matériaux secs, matériaux rocheux évolutifs, forte énergie de compactage, chenillage intense, etc.).

3.3.3 - Le sol support

- sol support en pente importante, zone instable (glissements anciens et actuels), sols supports sensibles à la liquéfaction en cas de séismes ;
- remblai construit sur un sol compressible (tassements différentiels, fluage à long terme, etc.), présence de décharges anciennes ;
- site karstique, sol support présentant des risques de dissolution (sel, gypse), présence de cavités anthropiques (sapes de guerre, carrières souterraines, etc.) ;
- ouvrage en terre de faible hauteur construit sur un sol gonflant.



Figure 33 : Effondrement d'un remblai autoroutier sur l'A75 suite à l'érosion des matériaux contigus à un ouvrage hydraulique lors d'un épisode pluvieux particulièrement intense.
(Sources : Figure de gauche - Détachement Aérien de Gendarmerie de Montpellier - Figure de droite, DIR MED)

3.3.4 - L'eau, l'assainissement et le drainage

- présence d'un cours d'eau en pied de remblai, mauvaise conception des rétablissements de circulation des eaux de surface ;
- présence d'une nappe phréatique pouvant alimenter le corps du remblai (zone de transition déblai\remblai, remblai sur pente, etc.) ;
- mauvaise gestion des circulations d'eau dans le sol support ;
- mauvaise maîtrise du drainage et de l'assainissement de la voie ;
- présence de réseaux enterrés entraînant des circulations d'eau parasite ;
- risque de gel ;
- fonte des neiges ;
- ouvrage hydraulique dans le remblai (buse hydraulique, etc.).

3.3.5 - L'atmosphère, le site, l'environnement et les conditions d'exploitation

- végétation inadaptée (absence de végétalisation ou problème consécutif à sa mise en œuvre, aménagement paysager permettant des stockages d'eau, végétation envahissante, végétation arbustive et arborée au voisinage de la chaussée, etc.) ;
- condition météorologique exceptionnelle (sécheresse, orage, cyclone, etc.) ;
- ouvrage en terre en zone inondable et/ou sismique ;
- sollicitation non prévue (charge ponctuelle, circulation sur BAU, etc.) ;
- chargement en tête de remblai et/ou déchargement en pied ;
- présence d'éléments étrangers au massif (canalisations diverses).



4 Diagnostic des remblais

4.1 - La démarche générale

Le diagnostic d'un ouvrage consiste à recenser l'ensemble des désordres visibles ou non, à évaluer leurs causes probables, à apprécier leur vitesse d'évolution et à estimer les risques vis-à-vis du niveau de service et de la stabilité de l'ouvrage.

Dans le cas des remblais routiers, les résultats de la première visite sur site ne suffisent généralement pas pour établir un diagnostic complet. Suite au constat d'un comportement pathologique ou à l'identification d'un risque significatif, l'inspection devra souvent être complétée par des reconnaissances additionnelles et par la mise en place d'une instrumentation. Ultérieurement, du fait de la faible cinétique de la plupart des désordres, un diagnostic pourra ainsi être proposé (puis amendé si nécessaire) sur la base d'une continuité dans le temps du suivi du remblai. La démarche qui permet, à partir des constats de terrain initiaux, d'aboutir à un diagnostic est décrite sur le logigramme Fig. 34. Ce logigramme reprend en grande partie la démarche générale des guides LCPC/Sétra pour le diagnostic des murs de liste II [1].

Une fois le diagnostic établi, des mesures de sauvegarde (mise en sécurité, réparations) pourront être requises et un suivi périodique sera mis en place si nécessaire. Les résultats de la surveillance et des investigations réalisées permettront alors de proposer la nature et la périodicité des prochaines actions de surveillance du remblai.

Organisation préalable au diagnostic

Avant de démarrer les études de prédiagnostic ou de diagnostic, le gestionnaire de l'ouvrage et le bureau d'études doivent effectuer un minimum de tâches préalables. Ces tâches sont les suivantes :

- la visite préalable à la commande : celle-ci sera obligatoire avant l'établissement de la proposition des bureaux d'études. Il revient au gestionnaire d'organiser la visite en toute sécurité. Les outils récents tels que Google Earth®, Street View®, ISIMAGE ou autres, peuvent donner une visualisation rapide du site mais ne sont en aucun cas suffisants pour établir une proposition. De même, le gestionnaire aura tout intérêt à établir rapidement les servitudes qui concernent l'ouvrage (NF 570-003-1). Le bureau d'études peut être amené à réaliser des investigations nécessitant l'établissement d'une Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT). Cette phase peut être anticipée par le gestionnaire qui peut commencer à obtenir les autorisations d'accès ou même établir les Déclarations d'Intention de Travaux (DIT). Dans certains cas, il peut être utile de préparer le site pour faciliter la visite (fauchage, élagage, recherche de regards de visite ou repères de visites existants, dépose et repose des glissières, déclaration ou autorisation loi sur l'eau, etc.) ;
- la mise à disposition de documents d'archives : le bureau d'études retenu aura besoin d'informations pour l'établissement du prédiagnostic. Le gestionnaire et/ou le maître d'ouvrage seront forcément questionnés pour rechercher tous les documents d'archives disponibles (dossier de recollement, plan d'assainissement, etc.). Cette phase peut donc être anticipée par le gestionnaire ;
- la mise à disposition de documents de travail : les études s'appuient sur des données de type plans et profils. Une mission spécifique confiée à un géomètre peut être indispensable en cas d'absence de ces éléments. La mission peut être confiée au bureau d'études ou être prise en charge par le gestionnaire ;
- le gestionnaire pourra également préciser la catégorie géotechnique de l'ouvrage ainsi que de la classe de conséquence au sens de l'eurocode 7.



On peut s'appuyer sur les missions de diagnostic (G5 puis G2) telles que prévues dans la norme NF P94-500 pour cadrer à la fois la commande et la prestation attendue du bureau d'études. Cette norme a l'avantage de préciser le rôle que doit tenir chacun des intervenants, les documents à fournir au préalable par la personne qui passe la commande, et les documents à rendre par le bureau d'étude. La norme ne précise pas les moyens à mettre en œuvre : ils sont à définir au cas par cas. Dans l'idéal, la personne qui passe la commande aura intérêt à avoir une certaine idée de la prestation attendue et de s'entourer d'un conseil géotechnique, pour éventuellement comparer plusieurs offres. Dans le cas contraire, le risque sera assez élevé de devoir comparer des offres de prix et de contenu très disparates.

Dans tous les cas, il est important de souligner que les documents d'aide à la rédaction des prestations géotechniques (NF P94-500 [26, 27]) font toujours référence à une reconnaissance d'un site suivant une démarche progressive et itérative. Il est rare de pouvoir comprendre et proposer des solutions de réparation en une intervention unique. Pour cette raison, on distinguera dans la suite, une étude de prédiagnostic d'une étude de diagnostic. La solution de réparation pourrait, selon la complexité du site, faire à nouveau l'objet d'une commande complémentaire.

Dans le cas d'urgence, le gestionnaire peut aussi être amené à réaliser des solutions de réparations provisoires et de mise en sécurité des usagers et riverains, sans attendre les diagnostics.

4.2 - Le prédiagnostic

Face à un remblai présentant des comportements pathologiques, il peut être tentant d'imaginer très rapidement les mécanismes à l'œuvre et d'élaborer des stratégies de réparation à partir d'un examen sommaire de la situation. De plus, le gestionnaire des voiries est en général pressé d'obtenir une évaluation des désordres et de leurs possibles évolutions, afin de disposer d'éléments de coût et de sécurité.

Cependant, on constate très fréquemment que les éléments disponibles lors de la première visite de terrain sont extrêmement réduits. En dehors de quelques cas évidents, la recherche des causes de la pathologie peut nécessiter un certain temps, au minimum pour rassembler les éléments de contexte caractérisant le remblai (matériau constitutif, évolutions récentes si possible, etc.), voire pour recueillir les informations issues d'un suivi instrumenté. On soulignera de plus que certains désordres sont difficiles à évaluer de prime abord (multiples causes envisageables).

L'établissement du prédiagnostic puis du diagnostic, suivant le diagramme Fig. 34 nécessite donc l'adoption d'une démarche structurée, dans laquelle l'examen détaillé du remblai (ou inspection) joue un rôle central. Les éléments observés sont ensuite reliés aux autres informations disponibles pour établir le prédiagnostic.

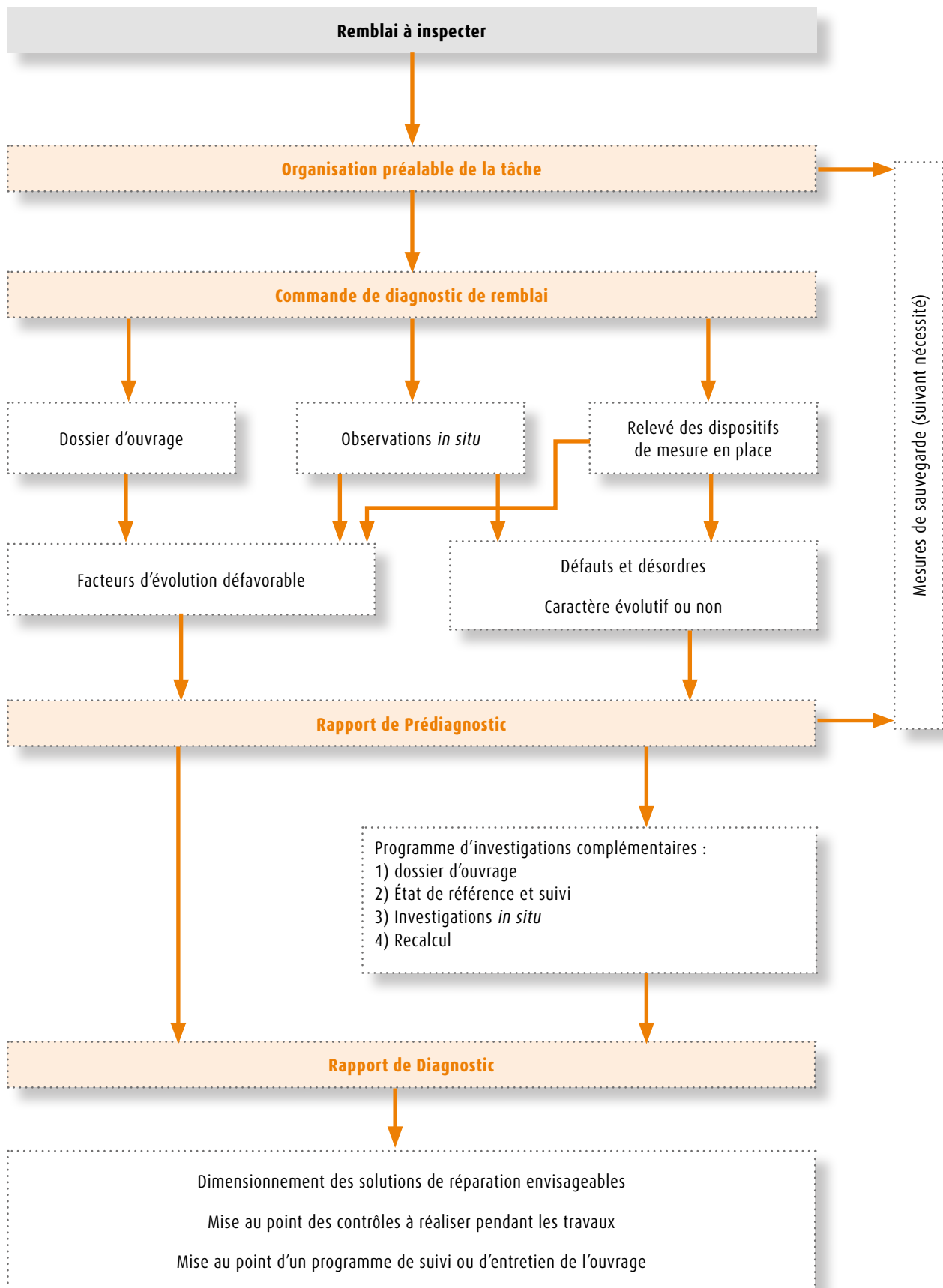


Figure 34 : Logigramme de la démarche de diagnostic d'un remblai



4.2.1 - Les éléments menant au prédiagnostic

4.2.1.1 - Le dossier ouvrage

Il est rare, même pour les remblais de grande hauteur, de disposer d'un dossier d'ouvrage. Toutefois, il arrive que des récolements de travaux soient disponibles ou que des expertises aient déjà été réalisées lors de précédents épisodes pathologiques.

Une étude préalable des antécédents de l'ouvrage, lorsqu'elle est possible, permettra alors d'apporter des renseignements précieux susceptibles en particulier d'éclairer les facteurs d'évolution défavorable du remblai. On citera notamment :

- l'historique de la construction de l'ouvrage (matériau : nature, teneurs en eau ; phasages ; difficultés d'exécution ; etc.) ; à défaut la carte géologique peut fournir des indications sur les matériaux des déblais avoisinants ;
- les procès-verbaux des précédentes inspections, les rapports des désordres constatés, le carnet de suivi du remblai s'il existe ;
- les éléments concernant les principales opérations d'entretien spécialisé et de réparation effectuées (y compris les campagnes d'entretien de chaussée) ;
- les rapports de mesures ou d'investigations spécifiques.

On soulignera également ici que certains remblais ont un historique bien connu mais non écrit. Il est donc utile d'interroger en détail le gestionnaire, en particulier les personnels chargés de l'entretien et de la surveillance du réseau qui ont souvent la mémoire de l'évolution des désordres ou des travaux déjà réalisés. Il arrive également que certaines personnes (intervenant du chantier, riverain, etc.) aient assisté à la construction du remblai ; ils peuvent alors fournir des éléments intéressants sur le déroulement du chantier (provenance des matériaux, phasages éventuels, incidents, etc.).

4.2.1.2 - Le relevé des dispositifs de mesure en place

Certains remblais ont été instrumentés à leur construction ou lors d'épisodes pathologiques précédents. Les renseignements issus de ces instrumentations sont usuellement riches pour la personne chargée du diagnostic. De plus, un remblai instrumenté a souvent déjà fait l'objet d'une synthèse géotechnique pour permettre l'analyse des mesures ; il est donc utile de rechercher le dossier correspondant.

S'il n'y a pas eu de relevé récent, il convient lors de la première visite du remblai de vérifier la présence et le bon état apparent des dispositifs de suivi théoriquement en place. Une campagne de relevés devra être programmée en parallèle de l'inspection. Ce relevé n'est pas obligatoirement réalisé par le géotechnicien et peut faire l'objet d'une intervention séparée.

4.2.1.3 - L'observation *in situ* : l'inspection du remblai

4.2.1.3.1 - La préparation de l'inspection

La phase de préparation de l'inspection doit permettre :

- de disposer des éléments topographiques et fonds de plans pour les relevés des défauts et désordres ; ces éléments sont généralement fournis par le gestionnaire. À défaut, il faudra les faire établir avant l'opération d'inspection ;
- de faire le point sur l'accessibilité des différentes parties du remblai. En particulier, talus et risbermes sont souvent peu entretenus et envahis par la végétation ;
- de faire le point sur tous les réseaux enterrés susceptibles d'être en interaction avec le remblai ; ce point est également un préalable indispensable pour établir les déclarations de travaux avant sondages ;
- de rassembler, si possible, de premiers éléments de contexte en provenance du gestionnaire, ou d'une carte géologique par exemple.

Notons qu'en cas d'intervention d'urgence, cette phase de préparation est parfois tronquée. Les constats de la visite réalisée se basent alors sur des renseignements partiels, qu'il conviendra de compléter dans un second temps.



4.2.1.3.2 - Les principaux éléments relevés

L'inspection du remblai est un constat de l'existant. Sa consistance est fonction de l'importance du remblai, de son rôle et des enjeux. Elle vise à mettre en évidence et en relation un maximum d'indices pertinents pour qualifier l'état du remblai et si nécessaire appréhender ses mécanismes d'évolution. Elle permet de rassembler un certain nombre d'observations de terrain, dont les défauts et désordres apparents et une partie des facteurs d'évolution défavorable.

L'inspection doit être étendue à la zone d'influence du remblai, de part et d'autre de celui-ci (ce qui peut nécessiter des moyens d'accès et d'investigation particuliers).

Au cours de la visite, on s'attachera à rassembler :

- les données de contexte visibles *in situ* suivantes :
 - les données sur l'environnement du remblai (contextes géologique et hydrogéologique locaux : affleurements, formation géologique, sources et écoulements divers, etc.),
 - les données sur la géométrie du remblai et de son environnement (travaux adjacents et/ou récents), les dispositions constructives particulières,
 - les données sur les systèmes de drainage et d'assainissement lorsqu'ils sont visibles ; les autres informations concernant les réseaux enterrés courants : électricité, gaz, téléphonie, etc.
 - les données sur la chaussée et les équipements divers du remblai (dont les instrumentations en place le cas échéant),
 - les données sur la végétation en place (en talus notamment),
 - les données sur la nature de la chaussée, des équipements et des éventuelles instrumentations en place ;
- les divers constats relatifs au comportement du remblai, avec le relevé des défauts et désordres apparents, l'historique des désordres et/ou l'aménagement affectant le remblai et son environnement.

Il est recommandé de procéder à des photographies de tous les éléments notables identifiés sur site.

4.2.1.3.3 - Le relevé des défauts et désordres

Le relevé des défauts et désordres est en grande partie lié à l'inspection de terrain, durant laquelle un maximum d'indices de pathologie est rassemblé. Un catalogue a été proposé au Chapitre 3 pour aider au recensement des défauts et désordres apparents. Il est recommandé d'adopter une approche structurée (1. le remblai, 2. l'environnement naturel et la zone d'influence, 3. les couches de chaussées et les équipements, 4. les systèmes de drainage et d'assainissement, 5. les ouvrages contigus au remblai) afin de limiter les possibilités d'oublis. Si certaines zones n'ont pas pu être examinées, il est nécessaire de le préciser, voire de réclamer des aménagements (débroussaillage par exemple) pour permettre un accès lors d'une visite ultérieure.

Les désordres les plus couramment observés sont les suivants [2, 5] :

- des fissures longitudinales ou circulaires sur la plateforme, sans rejet (P1 et P2) ;
- des fissures ouvertes avec rejet (P3) ;
- des déversements des glissières de sécurité ou des panneaux de signalisation (P6, C4) ;
- des tassements localisés (P4) ;
- des ruptures locales en talus (C2, C3).

Certains défauts ne sont toutefois pas visibles sur site, comme par exemple des insuffisances de compactage ou des circulations d'eau localisées dans le noyau du remblai. Ces éléments pourront être tirés du dossier d'ouvrage ou des instrumentations en place s'il en existe. Ils pourront également apparaître lors de reconnaissances complémentaires ultérieures au premier prédiagnostic.

4.2.1.3.4 - Les facteurs d'évolution défavorable

En fonction des caractéristiques mécaniques des matériaux les constituant, de leur agencement au sein du corps de remblai et des conditions environnementales, les remblais peuvent être soumis à des types de pathologies divers. Les facteurs d'évolution défavorable permettent une analyse des conditions locales pouvant amener une évolution plus sensible des désordres. Ils ont été présentés dans le Chapitre 3 auquel on se référera.



Ils sont, dans la mesure du possible, identifiés dans la phase de préparation de l'inspection. Dans tous les cas, la liste doit avoir été établie au moment de la rédaction du prédiagnostic, puisqu'ils permettent d'apprécier la criticité de certains désordres et qu'ils sont susceptibles d'influencer les suites à donner en termes de gestion de l'ouvrage ou d'instrumentation.

Lorsque des doutes subsistent, il s'agit d'évaluer, en fonction de la sensibilité du remblai, la nécessité de procéder à des investigations complémentaires pour préciser ces facteurs d'évolution défavorable.

4.2.2 - Le prédiagnostic

Le prédiagnostic constitue la conclusion de la première inspection du remblai (voir exemple de cadre détaillé en annexe 1). Il est établi à partir du constat de l'existant et de son historique, conformément aux éléments recensés dans la partie précédente. Il sera d'autant plus difficile à établir que certains désordres auront été masqués (reprises régulières de chaussée par exemple) ou que l'historique de l'ouvrage sera incomplet.

Le rapport fournit une analyse de l'état de l'ouvrage qui s'appuie sur le relevé des défauts et des désordres, l'interprétation des constatations, mesures et relevés lorsqu'ils existent, et l'analyse des facteurs d'évolution défavorable de l'ouvrage (Chapitre 4).

Dans le cas où un diagnostic fiable peut-être directement établi sans investigation complémentaire, le rapport précise, s'il y a lieu, les travaux d'entretien courant et spécialisé à effectuer ainsi que les réparations à prévoir. Prédiagnostic et diagnostic sont alors confondus.

Dans les autres cas, il s'avère nécessaire de compléter l'inspection visuelle par une reconnaissance géotechnique (sondages, essais de laboratoire) et/ou une instrumentation. En particulier, en l'absence de dossier d'ouvrage, l'inspection *in situ* constitue souvent la première intervention sur le remblai. Un prédiagnostic fiable de l'état du remblai et *a fortiori* le diagnostic nécessitent alors en général un délai pour des observations complémentaires.

En fonction de la nature des désordres et des informations disponibles, le prédiagnostic peut en effet se réduire à l'établissement d'hypothèses quant aux causes de pathologie. Ce sont alors les investigations complémentaires et/ou le suivi qui permettront de confirmer ces présomptions et de mettre en évidence le caractère évolutif ou non des défauts et désordres observés.

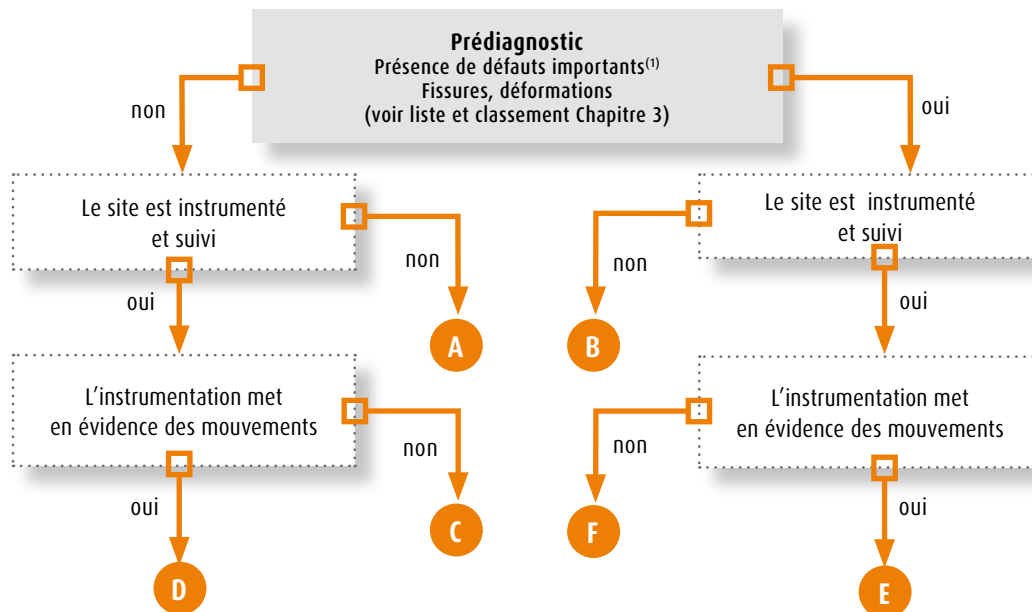
Dans le cas où le prédiagnostic fait craindre un risque imminent pour la sécurité des usagers et des tiers, des mesures de sauvegarde immédiates doivent être prises sans attendre l'aboutissement de la démarche de diagnostic.

Le prédiagnostic précise donc :

- les hypothèses possibles sur l'origine des désordres ;
- les mesures de sauvegarde éventuelles à appliquer, comprenant les restrictions de circulation (neutralisation de voie, limitation de circulation, etc.) et les mesures conservatoires potentiellement nécessaires (épaulement, drainage, etc.) ;
- le programme d'investigations complémentaires (sondages, mesures, essais en laboratoire, etc.) et/ou de re-calculs éventuels, nécessaires à l'établissement d'un diagnostic du remblai et à l'étude des solutions de remise à niveau ;
- s'il y a lieu, la proposition d'un suivi spécifique ou d'une surveillance ;
- quand cela est possible, les solutions de réparation.



Le logigramme de la Figure 35 synthétise les principales décisions à prendre en fonction du prédiagnostic.



(1) Les défauts sont considérés comme importants s'ils remettent en cause la pérennité de l'ouvrage et la sécurité de l'utilisateur. On pourra prendre en compte les enjeux de l'ouvrage définis par le gestionnaire

A	L'inspection du remblai ne révèle pas de pathologie importante. En fonction des enjeux et des facteurs d'évolution défavorable, il pourra être décidé : • de programmer une nouvelle visite de spécialiste à plus ou moins long terme ; • de renforcer la surveillance visuelle ; • d'instrumenter le site pour confirmer l'absence de mouvement. Si une instrumentation minimale ne paraît pas indispensable, cela devra être justifié.
B	Si les observations ne permettent pas l'établissement d'un diagnostic, une instrumentation devra être mise en place. Dans le cas contraire, en fonction des risques il pourra être envisagé : • de renforcer la surveillance visuelle ; • d'instrumenter et surveiller le site ; • d'instrumenter et étudier une solution de réparation. Si les risques s'avèrent importants, des mesures de sauvegarde devront être prises.
C	Pas de modification du suivi existant du remblai. Examiner les facteurs d'évolution défavorable pour identifier si des évolutions défavorables sont susceptibles d'intervenir. La réduction d'un programme de suivi peut éventuellement être envisagée si des travaux de confortement ont été réalisés et/ou si une situation antérieure de type D est passée en type C.
D	Il n'y a pas de désordre apparent, mais l'instrumentation révèle des mouvements. Une étude plus détaillée doit être menée pour analyser le phénomène à l'origine de ces mouvements, et estimer les risques encourus. Il conviendra d'examiner la possibilité de désordres cachés et de vérifier la fiabilité des mesures. Les facteurs d'évolution défavorable peuvent guider les recherches.
E	L'inspection visuelle et l'instrumentation mettent en évidence des mouvements. En fonction du risque, il peut être décidé : • de poursuivre la surveillance ou de la renforcer ; • de renforcer la surveillance et d'étudier une solution de réparation ; • de prendre des mesures de sauvegarde immédiate et d'étudier une solution de réparation.
F	L'inspection visuelle indique un comportement anormal du remblai, mais l'instrumentation ne révèle pas de mouvement. Il convient de vérifier la fiabilité des appareils en place (adaptés au phénomène suspecté, opérationnels). Puis, en fonction du risque, il pourra être décidé : • de compléter l'instrumentation ; • de compléter l'inspection par des investigations complémentaires pour mieux déterminer l'origine des désordres ; • de poursuivre ou d'intensifier la surveillance.

Figure 35 : Recommandations de suivi de l'ouvrage suite au prédiagnostic



4.3 - Du prédiagnostic au diagnostic

Cette partie présente la succession des moyens à mettre en œuvre, partant des hypothèses émises en prédiagnostic, pour aboutir à un diagnostic confirmant ou non ces hypothèses.

Dans le tableau 2, chaque hypothèse émise en prédiagnostic est traitée volontairement de façon isolée et indépendante. Pour chaque hypothèse, sont d'abord rappelés les défauts et désordres apparents qui en sont généralement à l'origine et les principaux facteurs d'évolution défavorable associés, la codification des désordres faisant référence à la numérotation qui figure dans le catalogue du Chapitre 3. Sont ensuite présentés, dans chaque cas, les moyens à privilégier pour aboutir au diagnostic, dans l'ordre a priori graduel d'intervention. Dans la pratique, il faudra parfois envisager plusieurs hypothèses. La mise en œuvre des moyens d'investigations et de surveillance devra alors faire l'objet d'une démarche globale pour examiner au mieux l'ensemble des hypothèses émises.

Comme cela a été souligné antérieurement, certaines hypothèses du prédiagnostic sont susceptibles d'avoir été établies sur la base de facteurs d'évolution défavorable recensés et en l'absence de désordre apparent important ; ils conduisent cependant à la réalisation d'investigations complémentaires pour vérifier le bon état effectif de l'ouvrage.

Prédiagnostic	Défauts et désordres associés	Facteurs d'évolution défavorable associés	Programme d'investigations du diagnostic*
Grand glissement du site Amorce de grand glissement Poinçonnement Effondrement du terrain naturel du remblai	Z1, Z2, Z3, Z4, Z6, Z7, P1, P2, P3, P5, P6, C1, C2, C4, D1 à D6, O1 à O4	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • élargissement de remblai • remblai sur pente ou profil en travers mixte • pente de talus de remblai inadaptée • sol support compressible ou décharges anciennes • site karstique ou sol support présentant des risques de dissolution, présence de cavités anthropiques • remblai en zone inondable ou sismique • sollicitation non prévue • chargement en tête ou déchargement en pied • ouvrage hydraulique ou canalisation dans le corps de remblai	Suivi et investigations <i>in situ</i> : • analyse de photographies aériennes [28] existantes multi-date, programmation d'une campagne spécifique • déplacement de l'ouvrage (suivi inclinométrique et/ou topométrique, alignement de piquets en surface) • mise en œuvre d'instrumentation (tubes inclinométriques pour suivi géométrique, tubes piézométriques pour suivi automatique de la nappe phréatique) • sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> : pénétromètre statique/dynamique, essais pressiométriques/phicométriques • reconnaissance géophysique : électrique, sismique • prélèvement des matériaux (carottage) et essais en laboratoire (cisaillement, triaxiaux, etc.) Calcul de stabilité et validation ou non du prédiagnostic
Glissement du corps de remblai	P1, P2, P3, P5, P6, C1, C2, C4, C5, D1 à D7, O1 à O4	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • pente de talus de remblai inadaptée • corps de remblai « à risque » (matériaux évolutifs et/ou difficiles à mettre en œuvre, hétérogénéité, etc.) • structure ou matériaux inadaptés • présence d'un cours d'eau en pied de remblai ou d'une nappe phréatique susceptible d'alimenter le corps de remblai • mauvaise gestion des circulations d'eau dans le sol support • mauvaise maîtrise du drainage ou de l'assainissement de la voie • remblai en zone inondable ou sismique • chargement en tête ou déchargement en pied • ouvrage hydraulique ou canalisation dans le corps de remblai	Suivi et investigations <i>in situ</i> : • déplacement de l'ouvrage (suivi inclinométrique et/ou topométrique) • mise en œuvre d'instrumentation (nivelles, tubes inclinométriques pour suivi géométrique, sondes de pression interstitielle pour détecter des nappes temporaires dans le remblai) • sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> : pénétromètres, essais pressiométriques, phicométriques, etc. • prélèvement des matériaux (carottage) et essais en laboratoire (identification géotechnique, cisaillement, triaxiaux, etc.) Calcul de stabilité et validation ou non du prédiagnostic



Prédiagnostic	Défauts et désordres associés	Facteurs d'évolution défavorable associés	Programme d'investigations du diagnostic*
Désordres liés aux cycles de retrait-gonflement	P2, P3, P5, P6, C4, D1, D2, D4, D4bis, D5, O1, O2, O4	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • pente de talus de remblai inadaptée • corps de remblai «à risque» (matériaux évolutifs et/ou difficiles à mettre en œuvre, hétérogénéité, etc.) • structure ou matériaux inadaptés • végétation arbustive et arborée à proximité de la chaussée • mauvaise maîtrise du drainage et de l'assainissement de la voie • sécheresse exceptionnelle • surcharge en tête ou déchargement en pied • ouvrage hydraulique ou canalisation dans le corps de remblai	<u>Suivi et investigations <i>in situ</i> :</u> • déplacement de l'ouvrage : topométrique • mise en œuvre d'instrumentation : sonde de succion • sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> : pénétromètre statique ou dynamique • prélèvement des matériaux (carottage ou remaniés) et essais en laboratoire (teneurs en eau, granulométrie, sédimentométrie, argilosité, gonflement à l'oedomètre, essai de retrait) • identification et localisation de la végétation <u>Analyse des données recueillies (identification de cycles de gonflement et retrait en particulier) et validation du prédiagnostic</u>
Coulées superficielles Glissement de peau Erosion, ravinement	P2 à P6, C1 à C5, D1 à D7, O4	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • pente de talus de remblai inadaptée • corps de remblai «à risque» (matériaux évolutifs, érodables, hétérogènes, etc.) • mauvaise maîtrise du drainage et de l'assainissement de la voie • Matériaux gélifs • Problème de végétalisation • Remblai en zone inondable ou sismique • Structure ou nature des matériaux de remblais inadaptée	<u>Suivi et investigations <i>in situ</i> :</u> • sondage en cas de désordre associé sur chaussée • inspection caméra de l'assainissement, drainage • recherche visuelle de venue d'eau • prélèvement de sols pour analyses sur échantillons carottés (GTR, profils hydriques, essais triaxiaux, essais de cisaillement, etc) <u>Validation du prédiagnostic</u>
Tassement du corps de remblai lié à : • effondrement et/ou évolution du matériau de remblai sous imbibition • entraînement des fines • défaut de compactage des matériaux	Z3, P1 à P5, P6, C1 à C5, D1 à D7, O1, O2, O4	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • corps de remblai «à risque» (matériaux évolutifs et/ou difficiles à mettre en œuvre et/ou sensibles à l'érosion interne, hétérogénéité, etc.) • présence d'une nappe phréatique pouvant alimenter le corps de remblai • mauvaise gestion des circulations d'eau dans le sol support • mauvaise maîtrise du drainage et de l'assainissement de la voie • aménagement paysager permettant des stockages d'eau • remblai en zone inondable ou sismique • sollicitation non prévue (charge ponctuelle) • ouvrage hydraulique ou canalisation dans le corps de remblai	<u>Suivi et investigations <i>in situ</i> :</u> • suivi du déplacement de l'ouvrage (suivi topométrique) • mise en œuvre d'instrumentation (tassomètres multipoints pour identifier les couches concernées) • sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> : pénétromètre statique ou dynamique • prélèvement des matériaux (carottage, tarière ou pelle) et essais en laboratoire (identifications, teneurs en eau, Proctor\IPI\CBRimm) • reconnaissance géophysique : électrique, radar, méthode électromagnétique <u>Analyse des données recueillies et validation du prédiagnostic</u>



Prédiagnostic	Défauts et désordres associés	Facteurs d'évolution défavorable associés	Programme d'investigations du diagnostic*
Mouvements du sol support se répercutant sur le remblai : • tassement de consolidation, de fluage, autre • gonflement • effondrement de cavité souterraine	Z3, Z6, Z7, P2, P3, P4, P5, D1, D2, D4, D4Bis, D5, O1, O2	Facteurs d'évolution défavorable éventuels : • élargissement de remblai • remblai sur sol compressible ou décharge ancienne • cavité souterraine, site karstique ou sol support présentant des risques de dissolution • remblai de faible hauteur construit sur un sol gonflant • remblai en zone inondable • sollicitation non prévue • chargement en tête de remblai	Suivi et investigations <i>in situ</i> : • suivi du déplacement de l'ouvrage (suivi topométrique) • en cas de cavité souterraine [27], enquête historique, analyse de photographies aériennes [28], reconnaissance visuelle des cavités • mise en œuvre d'instrumentation : tubes inclinométriques pour suivi géométrique, tassomètres multipoints ou de profondeur, tubes piézométriques ou sondes de pression interstitielle pour suivi de la nappe phréatique, points de nivellement... • sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> (pénétromètre statique ou dynamique, essais pressiométriques) • prélèvement des matériaux (carottage) et essais en laboratoire (identification, œdomètres avec fluage, etc.) • reconnaissance géophysique, etc. Calcul de tassement si nécessaire, validation du prédiagnostic

* Le programme d'investigation liste de manière exhaustive les investigations possibles. Le programme réellement mis en œuvre est à apprécier en fonction des risques et des enjeux du site. Il est nécessaire qu'il soit établi par un géotechnicien.

Tableau 2 : Proposition d'un programme d'investigations du diagnostic



5 Techniques d'investigation et de suivi

5.1 - Les techniques d'investigation

Lors du prédiagnostic, peu d'informations sont généralement disponibles sur la structure réelle du remblai. Au mieux, le gestionnaire dispose de dossiers de récolement indiquant approximativement le type de matériau mis en œuvre. Il est donc souvent intéressant de réaliser des investigations complémentaires, avec ou sans prélèvement de terrain, afin de caractériser les propriétés physiques et mécaniques du corps de remblai ou du sol support.

Il est rappelé que toutes les techniques impliquant des forages ou une excavation du sol support supposent des démarches préalables (déclarations de travaux, etc.) permettant de limiter les risques de ruptures de réseaux (NF P98-331, XP P98-333, NF S70-003-1). En fonction des cas, des dispositions environnementales et/ou sanitaires peuvent également s'avérer nécessaires. Ces démarches demandent souvent un certain délai (souvent une quinzaine de jours).

Quelques techniques d'investigation courantes sont présentées dans les sections suivantes, sans prétention d'exhaustivité.

5.1.1 - La réalisation de prélèvements et d'essais de laboratoire

Les prélèvements de matériau (Fig. 36) sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils permettent un examen direct (visuel et/ou en laboratoire) des sols en place. Le choix judicieux du nombre et de l'emplacement des sondages se fait sur la base de l'expérience du géotechnicien, en fonction des pathologies observées et des mécanismes envisagés lors du prédiagnostic.

En général, les prélèvements sont remaniés, l'obtention d'échantillons intacts d'un sol compacté non saturé restant une opération délicate et onéreuse. Ils permettent de réaliser des classifications GTR et des profils hydriques. En talus et en accotement, des sondages à la pelle mécanique sont envisageables sur de faibles profondeurs, sans négliger de reboucher immédiatement la fouille après prélèvement. Les prélèvements foisonnés à la tarière permettent d'obtenir une coupe approximative du remblai sur toute sa hauteur. Les quantités de matériau obtenues sont toutefois moindres (sauf à utiliser une tarière de gros diamètre > 250 mm).

En cas de carottage (Fig. 37), le plus faible remaniement possible des prélèvements est visé afin de ne pas affecter la représentativité des essais de laboratoire. Le maintien des teneurs en eau peut nécessiter une conservation des carottes en gaines étanches. Si une grande précision est recherchée, on recommande des prélèvements ponctuels, avec un carottier poinçonneur, par passes de 0,3 à 0,5 mètre au plus, sur des niveaux repérés à partir de sondages voisins au pénétromètre ou à la tarière.



Figure 36 : Tranchée en bande d'arrêt d'urgence (Source : Cerema Sud-Ouest). La fissure coïncide avec la transition entre la structure traitée et le matériau érodé



Figure 37 : Carottes mettant en évidence une structure de remblai « sandwich », avec des contrastes de perméabilité importants (Source : Cerema Sud-Ouest)

Divers essais de laboratoire peuvent être réalisés sur les échantillons prélevés, en fonction de l'objectif recherché. Outre l'analyse visuelle des carottes (coupe géotechnique), on peut citer :

- **identification des sols :**
granulométrie / sédimentométrie, teneur en eau en fonction de la profondeur, valeur au bleu, indice de plasticité, limite de retrait, calcimétrie, analyse physique, physico-chimique ou minéralogique, masse volumique en place (sondages carottés uniquement), Proctor, mesure de l'IPI ;
- **propriétés mécaniques :**
essais de cisaillement triaxiaux ou à la boîte, essais œdométriques, essais de fluage, de gonflement, de gel.

Les essais de laboratoire visent à caractériser l'état ou le comportement du sol. Leurs résultats permettent de se prononcer plus précisément sur l'origine d'une pathologie. Il n'est pas exclu de devoir faire appel à d'autres essais moins courants que ceux cités ci-dessus. Les essais mécaniques sont par ailleurs souvent essentiels pour le dimensionnement d'un renforcement.

5.1.2 - La réalisation d'essais *in situ*

Les essais en place sont interprétés comme une « diagraphie mécanique » du corps de remblai. Ils permettent en particulier d'identifier des zones de faibles caractéristiques mécaniques et de se prononcer de manière quantitative sur la structure du remblai. Quatre techniques classiques sont abordées ci-dessous.

5.1.2.1 - L'enregistrement des paramètres de forage

L'enregistrement des paramètres de forage [29] (ou diagraphie instantanée) permet d'obtenir l'évolution des principales sollicitations mécaniques exercées par la foreuse en fonction de la profondeur. Selon le matériel utilisé, divers paramètres peuvent faire l'objet d'un enregistrement automatique (vitesse d'avancement, pression exercée sur l'outil, couple de rotation, percussion réfléchie, pression d'injection du fluide de forage, etc.).

Ces informations viennent généralement compléter les constats effectués sur la nature des sols traversés. Elles permettent par ailleurs de détecter la présence de cavités ou les limites géométriques d'une zone faible.

5.1.2.2 - Les essais pénétrométriques

Il existe deux types de pénétromètres pour réaliser cet essai : le pénétromètre dynamique (NF EN ISO 22476-2) et le pénétromètre statique (NF EN ISO 22476-12).

Certains pénétromètres dynamiques sont classiquement utilisés en terrassements pour le contrôle de la qualité du compactage. Cela nécessite de connaître la classification GTR et l'état hydrique des sols traversés afin de choisir les courbes de référence adaptées (NF P94-063, NF P94-105). Il est nécessaire d'accompagner ces essais par des sondages de reconnaissance permettant le prélèvement d'échantillons.



Les essais au pénétromètre dynamique classique (Fig. 38) permettent également de réaliser une exploitation du même type en comparant avec les sondages réalisées au droit des anomalies avec ceux réalisées dans des zones ne présentant pas de désordre.

Le pénétromètre statique présente l'avantage de distinguer la résistance de pointe et le frottement latéral.



Figure 38 : Reconnaissance au pénétrodensitographe d'un remblai fissuré en crête – le défaut est lié à un sous-compaction de la zone latérale du remblai qui se manifeste par un tassement différentiel (Source : Cerema Normandie-Centre)

Les principaux atouts des essais pénétrométriques sont leur bonne résolution (diagraphie quasiment continue du remblai) et leur faible coût. Lorsqu'un linéaire important de remblai est concerné par une pathologie, ils peuvent être utilisés comme des essais « à grand rendement » et être mis en œuvre en de multiples points. Un forage pressiométrique ou un forage de reconnaissance peuvent alors être réalisés pour « étalonner » la mesure pénétrométrique et affiner l'interprétation.

5.1.2.3 - Les essais pressiométriques

Les essais pressiométriques (ISO 22476-4) fournissent des renseignements quantitatifs précis, qui peuvent ensuite être utilisés dans le dimensionnement d'un renforcement (clouage, pieux, etc.). Comme pour le pénétromètre, de nombreuses corrélations sont disponibles afin d'estimer les caractéristiques du sol en cas d'impossibilité de réalisation d'essais de mécanique des sols sur échantillon intact.

Les essais pressiométriques présentent comme principal inconvénient d'être un essai discontinu ; un essai est généralement réalisé tous les mètres. Ceci peut conduire à ne pas détecter une partie des anomalies. Un usage couplé avec le pénétromètre ou avec l'enregistrement des paramètres de forage est souvent intéressant dans le cadre d'un diagnostic.

5.1.2.4 - Les essais phicométriques

Peu utilisé en France, le phicomètre (XP P94-120) est le seul appareillage qui mesure *in situ* des caractéristiques mécaniques du sol (c_i , φ_i), y compris dans des sols difficilement carottables pour des essais de laboratoire. Cette technique n'est toutefois pas applicable pour les sols très lâches ($Pl < 0,3$ MPa), très raides ($Pl > 4$ MPa) ou trop graveleux.



Les résultats des essais phicométriques sont surtout intéressants pour les argiles saturées et pour les sols pulvérulents.

Dans le cas de sols intermédiaires, la sollicitation est de type partiellement consolidée - partiellement drainée et est donc difficile à corrélérer avec les caractéristiques drainées de laboratoire. En outre, pour les sols non saturés, on ne peut en déduire que des caractéristiques mécaniques apparentes, puisque les effets de la succion ne peuvent pas être pris en compte dans l'interprétation. On en tirera toutefois au minimum des informations qualitatives.

5.1.3 - Les techniques d'investigation non destructives

Parmi les techniques d'investigation non destructives, on peut citer les méthodes géophysiques électriques ou électromagnétiques (Tomographie de résistivité électrique (TRE), méthode électromagnétique à émetteur lointain (RMT), et à émetteur portatif (Slingram type EM3), etc.) qui mesurent la résistivité apparente des terrains, elle-même liée aux caractéristiques de nature, de densité et de teneur en eau du matériau.

L'imagerie radar (Fig. 39) permet quant à elle (en l'absence de matériaux absorbants comme les argiles par exemple) de localiser des anomalies pouvant s'apparenter à des cavités, des canalisations, des blocs ou à la présence de matériaux absorbant le signal (argile) et de déterminer les différentes épaisseurs de chaussées. La profondeur d'investigation est faible à moyenne (de 3 à 5 m en général, en fonction de l'antenne retenue). La réalisation de passages à différentes fréquences est nécessaire.

Ces méthodes nécessitent des hypothèses sur la géométrie ou l'homogénéité du remblai qu'il convient de vérifier par sondages d'étalonnage. La création d'artefacts (effets de bords) liés à la réflexion des ondes sur les bords du talus du remblai et/ou à la présence d'objets métalliques (glissières, lignes électriques, réseaux enterrés, etc.) peut limiter l'emploi de ces techniques suivant les désordres observés.

En revanche, une analyse « en relatif », par comparaison à une mesure de référence, peut fournir des indications intéressantes sur l'évolution de l'ouvrage (monitoring).

Globalement, ces techniques semblent bien adaptées pour mettre en évidence des hétérogénéités de tout type dans les remblais, mais leurs résultats sont à interpréter avec précaution.



Figure 39 : Passage radar (à gauche) et vérification des anomalies au pénétrodensitographe (à droite)
(Source : Cerema Ouest)

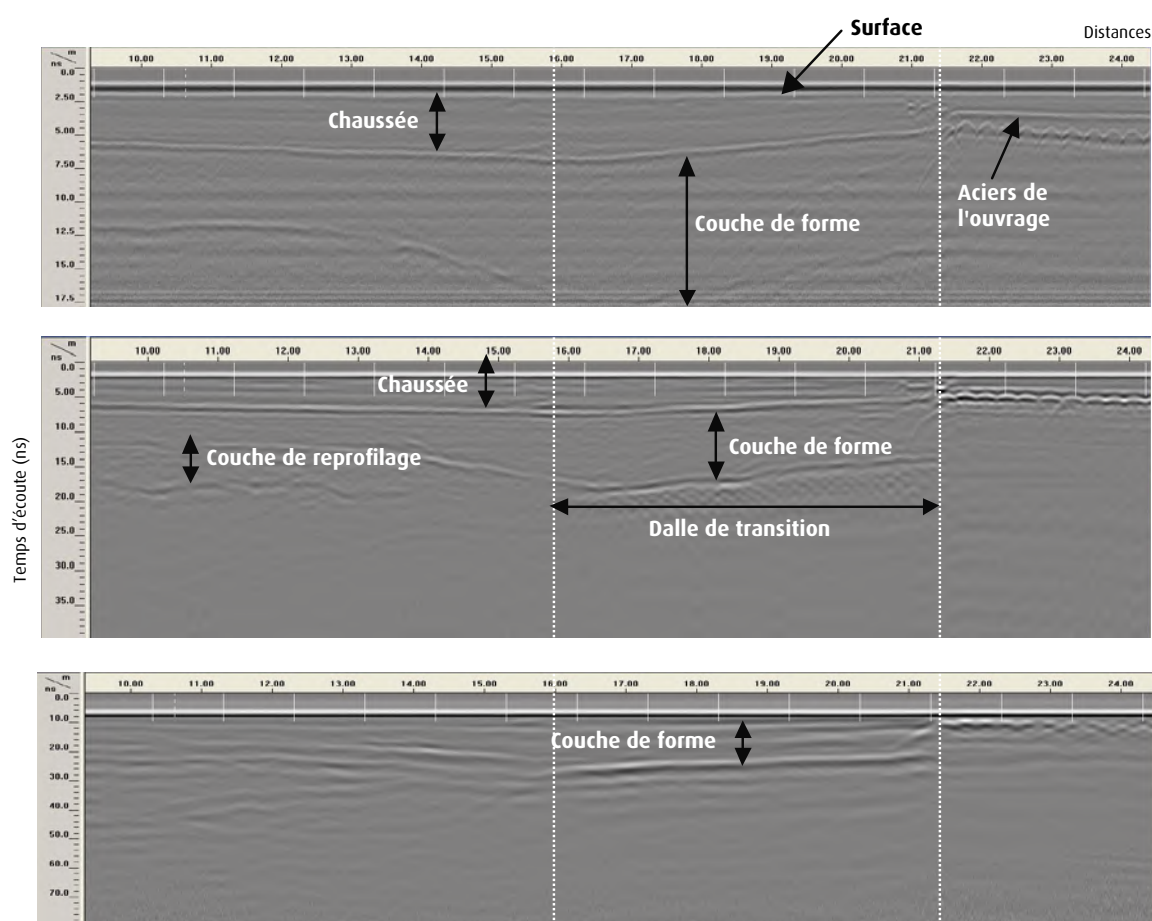


Figure 40 : Extrait d'un profil radar de remblais d'accès à un ouvrage d'art à l'aide d'antennes de différentes fréquences. De haut en bas antennes de 1,5 GHz, 900 MHz et 270 MHz (Source : Cerema Ouest)

Sur les images radar (Fig. 40), on identifie les différents éléments constituant la zone d'auscultation :

- la dalle béton du tablier avec les aciers transversaux (hyperboles) ;
- la dalle de transition de 5 mètres de long ;
- les différentes interfaces dans la chaussée et le remblai.

5.2 - Les techniques de suivi instrumenté

5.2.1 - La mise en œuvre de dispositifs de suivi (ou l'actualisation de mesures)

Dans de nombreux cas, lorsque l'inspection d'un remblai met en évidence des pathologies, il est nécessaire de mettre en œuvre une instrumentation minimale. L'objectif est généralement de localiser des zones en mouvement et d'évaluer les accélérations ou ralentissements pour quantifier les risques d'évolution et disposer de critères de décision (travaux, fermeture de voie, etc.).

Les programmes d'investigation listés dans le tableau 2 du chapitre 4.3 s'appuient alors principalement sur les moyens de mesure décrits ci-après. En fonction des phénomènes suspectés, un temps d'observation minimum (de quelques jours à plusieurs mois) est nécessaire pour éviter les erreurs de jugement. Par exemple, un suivi piézométrique commencé en période estivale peut d'abord ne mettre en évidence aucune anomalie, alors que d'importantes remontées de nappe se manifesteront en période hivernale.



Lorsqu'une instrumentation est déjà présente sur le remblai (suivi topométrique, tubes inclinométriques, tassomètres, etc.), par exemple parce qu'elle a été mise en œuvre au moment de la construction, il est souvent intéressant d'actualiser le suivi par un nouveau relevé. Ces mesures sont en effet susceptibles d'apporter des informations précieuses sur la nature et l'origine d'une pathologie ou sur un changement de comportement de l'ouvrage, en particulier si la comparaison avec les résultats d'un suivi précédent est possible.

Les paragraphes ci-après présentent quelques exemples de techniques d'instrumentation. Sont distingués les systèmes d'instrumentation que l'on ne peut mettre en œuvre que pendant la construction et ceux pouvant être rajoutés durant la vie du remblai, par exemple après la découverte d'un défaut. La liste de matériels présentée ne prétend pas être exhaustive. La prise en compte des effets de la météorologie sur l'évolution des pathologies peut nécessiter la mise en œuvre d'une station météorologique ou de disposer d'information à partir d'un site à proximité.

5.2.2 - Les systèmes de mesure mis en œuvre en cours de construction

La mise en œuvre d'une instrumentation au cours de la construction d'un remblai est une opération délicate qui nécessite une bonne coordination avec l'entreprise exécutant les travaux afin de ne pas endommager les appareillages. Elle reste généralement réservée à des cas particuliers : remblais expérimentaux, remblais de grande hauteur, remblais sur sols compressibles où l'évolution des déformations conditionne la réalisation des travaux, par exemple. Cette instrumentation doit permettre de vérifier, en cours de construction puis à plus longue échéance, les hypothèses de dimensionnement et le comportement de ces remblais particuliers.

5.2.2.1 - Les cellules tassométriques « de surface »

Ces matériels sont en général posés sur un sol support compressible avant d'être recouverts par le remblai. Ils permettent de suivre le tassement de consolidation du sol support au cours du temps. On peut également les positionner à plusieurs niveaux dans un remblai afin de détecter des mouvements verticaux par couche. Il s'agit fréquemment de systèmes hydrauliques, d'une précision de quelques millimètres, nécessitant en général la mise en œuvre de tubulures jusqu'à un point fixe en dehors de la zone d'influence.

En suivi des tassements, il est également possible de mettre en place un profilomètre au sein ou en base du remblai. Ce matériel fournit usuellement des résultats d'une précision comparable à celle des cellules tassométriques, avec en plus une vision quasi-continue de la déformée le long du profil retenu.

5.2.2.2 - Les capteurs de pression totale

Le capteur de pression interstitielle permet de mesurer la pression interstitielle au sein d'un horizon saturé grâce à une sonde ou capteur mis en place en général après réalisation d'un forage. La sonde comporte une chambre remplie de liquide qui sera mis en pression par l'eau interstitielle du milieu où elle sera placée.

Des capteurs de pression interstitielle peuvent être mis en place au sein du sol support au moment de l'édification du remblai, pour quantifier la dissipation des pressions interstitielles et vérifier la non-annulation des contraintes effectives (risque d'instabilité). Ces dispositifs concernent essentiellement les cas de remblais sur sols compressibles.

Ils peuvent être complétés par des capteurs de pression totale, qui sont constitués de deux plaques soudées contenant un fluide sous une pression déterminée agissant sur un détecteur (à contre-pression, à corde vibrante, etc.). Enterré, cet appareillage permet de mesurer les variations de la contrainte normale au plan du capteur. Il peut être utilisé pour déterminer l'état de contrainte au sein du remblai ou au contact du sol support, avec des marges d'erreur assez élevées toutefois.

5.2.2.3 - Les sondes TDR

Encore peu utilisées hors dispositifs expérimentaux, ces sondes sont des guides d'onde permettant de déterminer la constante diélectrique du sol. À partir de cette mesure, il est possible de remonter par une relation empirique à la teneur en eau volumique du sol. L'instrumentation par sondes TDR (Fig. 41) peut donc permettre de suivre l'imbibition au cours du temps d'un corps de remblai.



Figure 41 : Sonde TDR posée au sol, avant recouvrement par la couche de remblai supérieure et vue du boîtier de mesure
(Source : Cerema - Normandie-Centre)

5.2.3 - Les systèmes de mesure mis en œuvre au cours de la vie du remblai

5.2.3.1 - Les mesures inclinométriques

La mesure inclinométrique (ISO 18674-3) consiste à relever les variations d'inclinaison, par rapport à la position initiale, d'un tube guide scellé dans un forage. La résolution de la mesure est de l'ordre de 10^{-4} radian, ce qui permet d'apprécier des mouvements inférieurs au millimètre pour une longueur de tube de 10 mètres.

L'inclinométrie peut être appliquée à des tubes verticaux (Fig. 42) ou à des tubes horizontaux. Elle permet de quantifier les déplacements du remblai et leur évolution, d'identifier les zones les plus affectées par les mouvements, de détecter ou confirmer des amorces de glissement (observation d'un pic de rotation).

Cette instrumentation est fréquemment mise en place après l'observation d'un désordre susceptible d'évoluer vers une situation critique pour l'ouvrage ou pour la sécurité des usagers. L'implantation d'un tube inclinométrique donne lieu à un suivi périodique dont les résultats sont interprétés en fonction des données de terrain (constats visuels, résultats de forages, etc.).



Figure 42 : Grand remblai instrumenté par un inclinomètre
(Source : Cerema Normandie-Centre)

5.2.3.2 - Les mesures topographiques

En fin de chantier, les remblais font usuellement l'objet d'un levé topographique complet qui alimente le dossier de récolement. Cela constitue un point zéro qui peut servir de référence s'il est disponible au moment du diagnostic.

Dans l'ensemble, les mesures topographiques sur remblai sont utilisées à deux fins principales :

- **détermination de la géométrie précise de l'ouvrage :**
il s'agit d'un levé de terrain, qui permet de pallier l'absence de plan détaillé de la zone pathologique ou l'insuffisance des plans existants. Lorsqu'un renforcement est envisagé, le relevé peut se faire suivant des profils en travers, pour un dimensionnement fin de la réparation. Les levés géoréférencés permettent de reporter sur plan les instrumentations ou les points de sondage ;
- **suivi dans le temps des déplacements de l'ouvrage :**
dans ce cas, le remblai est équipé de spits de nivellement, relevés périodiquement. La mesure peut se faire en altitude simple (elle retranscrit alors des tassements) ou en X-Y-Z ce qui permet d'obtenir une vision tridimensionnelle des déplacements du remblai. Les spits sont, en général, implantés en ligne, suivant des profils en long ou en travers du remblai. Avec des mesures différentielles (référence à une borne de polygonale ou un point fixe du site) on peut obtenir des précisions de l'ordre du 1/10^e de millimètre en Z et du millimètre en X-Y.

5.2.3.3 - Les mesures de tassement en forage

- **Les tassomètres multipoints :**
ce matériel correspond à un tube mis en place en forage, équipé de bagues qui suivent le mouvement du terrain. Divers systèmes de bagues existent, notamment les systèmes mécaniques (rétrécissements d'un tube compressible à diverses profondeurs) et magnétiques (bagues aimantées coulissantes). Le principe de la mesure consiste à relever périodiquement, au moyen d'une sonde adaptée, la position des bagues par rapport à la tête de forage. Cela permet d'obtenir l'évolution du tassement, par couches, sur toute la hauteur du tube. La précision obtenue est généralement de l'ordre du centimètre ;



- **les cellules tassométriques « de profondeur » :**

le fonctionnement de ces cellules est analogue à celui des cellules « de surface ». Leur forme cylindrique leur permet d'être placées dans des trous de forage ; elles indiquent le tassement des couches de sol sous-jacentes ;

- **les systèmes par extensométrie :**

Il existe de nombreux systèmes de mesure extensométrique (à pige, à câble, etc.). Ils permettent de déterminer les déplacements entre la surface et un point du forage. On identifie ainsi les mouvements verticaux par couche avec une grande précision (jusqu'au centième de millimètre), ce qui peut par exemple mettre en évidence des cycles de gonflement et retrait des argiles. Un système simple à pige est présenté sur la Figure 43.

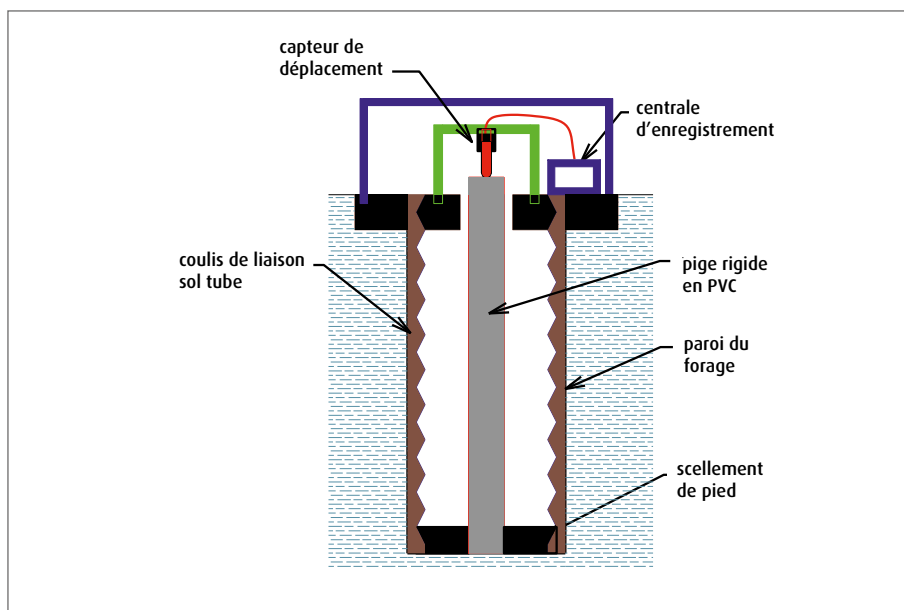


Figure 43 : Exemple de système de suivi par extensométrie : le capteur de déplacement mesure les mouvements des couches comprises entre le fond et la tête de forage

5.2.3.4 - Les mesures piézométriques

Le corps de remblai étant un milieu non saturé, les matériels piézométriques ne sont théoriquement pas utilisables. Néanmoins, leur pose est souvent intéressante (à différentes profondeurs) pour identifier la présence d'eau parasite (circulation, nappes temporaires) au sein du remblai, pour évaluer l'évolution des pressions interstitielles dans des couches parvenues à saturation, pour mesurer le niveau de la nappe dans le sol support ou pour s'assurer de l'efficacité d'un système de drainage. La piézométrie peut être particulièrement importante pour vérifier les hypothèses de stabilité générale.

En termes de matériel, on distingue principalement les tubes piézométriques ouverts, bien adaptés à la mesure des fluctuations de la nappe dans des milieux relativement perméables ($k > 10^{-5}$ m/s) et les sondes de pression interstitielle, plus onéreuses mais recommandées dans toutes les autres situations. Il est dans les deux cas possible d'équiper les forages au moyen de capteurs autonomes, qui permettent des relevés très fréquents, sur une longue période (souvent plus d'un an), sans nécessiter l'intervention d'un opérateur.

5.2.3.5 - Mesure des rotations avec des nivelles micrométriques

Le principe est de mettre en place sur le remblai des platines, reposant par exemple sur un plot en béton, dont on vient relever périodiquement l'inclinaison au moyen de nivelles portatives (Fig. 44). Ces dernières sont constituées d'un niveau à bulle et d'un vernier ce qui permet d'obtenir une résolution de l'ordre de 10^{-4} radian. Cette instrumentation est par exemple utilisée pour mesurer les rotations de l'accotement ou mettre en évidence une flexion de la plateforme, en veillant toutefois à la forte sensibilité de l'appareillage aux variations de température.



Figure 44 : Exemple de nivelle à vis micrométrique pour la mesure des inclinaisons (Matériel MLPC)

5.3 - Cas du recalcul de l'ouvrage en terre

5.3.1 - Généralités

Dans certains cas, l'établissement du diagnostic nécessite un recalcul du remblai, c'est-à-dire une vérification des conditions de stabilité ou de tassement prévues lors des études. Ce type de calcul doit nécessairement être effectué par un spécialiste.

L'objectif des dimensionnements est de limiter les évolutions à des cas non préjudiciables en termes de stabilité ou de niveau de service. Une liste des principaux états limites à prendre en compte est par exemple fournie dans l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1) section 12.

Ce recalcul n'est significatif que si les différents paramètres sont dûment justifiés. Il peut s'appuyer sur les données du dossier d'exécution lorsqu'elles sont disponibles, et sur les résultats des investigations menées (*in situ* et en laboratoire) qui permettent d'établir un modèle géotechnique de terrain le plus représentatif possible. De manière générale, il est important d'adopter un point de vue critique vis-à-vis des paramètres géotechniques et de leur variabilité au sein du remblai et du sol support.

5.3.2 - La modélisation des remblais

La modélisation du comportement interne d'un remblai est complexe de par l'état non saturé du matériau qui le constitue. Les lois de comportement classiques de la mécanique des sols saturés ne s'appliquent pas directement, ou seulement par défaut. Leur application aux remblais fait l'objet de travaux de recherche.

Il est utile, dans le cadre d'un diagnostic, de cerner ces comportements et d'examiner comment le remblai a été (ou a pu être) étudié.

En pratique, pour les études de stabilité, le sol du remblai est généralement considéré comme saturé (ce qui est une hypothèse sécuritaire) et le remblai est recalculé par une méthode à l'équilibre limite (Fellenius, Bishop, perturbations, etc.), à court et/ou long terme.



6 Repères pour l'entretien et la réparation des remblais

Le chapitre suivant a pour but de présenter aux gestionnaires d'ouvrage en terre, les moyens de prévention et de réparation des désordres. Il n'est en rien exhaustif.

Le gestionnaire ne doit pas s'abstenir, en cas de désordre constaté, de consulter un spécialiste en géotechnique afin qu'il propose une méthodologie de réparation ou vérifie celle qui a été retenue.

6.1 - La prévention des désordres

Un défaut d'entretien conduit souvent à l'apparition ou à l'aggravation de désordres. Afin de prévenir ces évolutions, il convient d'entretenir les remblais et les dispositifs qui leur sont associés.

Usuellement, les gestionnaires divisent l'entretien des remblais en deux catégories :

- l'entretien courant : il s'agit d'interventions régulières sur une année d'exploitation. Il est généralement réalisé par les services de l'exploitant ;
- l'entretien spécialisé : il s'agit d'un entretien financièrement conséquent. Il peut soit être programmé, soit faire suite à un constat de désordre sur une partie d'ouvrage. Il est généralement réalisé par des entreprises spécialisées.

6.1.1 - La prévention des désordres : rôle de l'entretien courant

L'entretien courant concerne les travaux relatifs à la végétation, à la gestion des eaux et aux aspects de surface de la chaussée (« nid-de-poule », fissuration, assainissement, drainage, etc.).

Il est vivement conseillé de profiter de l'entretien courant pour mener conjointement une visite de surveillance.

Les zones d'entretien récurrent sont souvent des zones sensibles et révélatrices d'anomalies diverses. Des visites de surveillance de ces zones peuvent être pratiquées de manière régulière (au moins une après l'hiver) et documentées.

6.1.1.1 - L'entretien de la végétation

L'entretien de la végétation consiste à réaliser les opérations de fauchage, de débroussaillage et d'élagage sur le remblai et à ses abords [30].

La présence d'une végétation de taille modérée et bien enracinée est plutôt bénéfique à la bonne tenue des talus (résistance mécanique à l'érosion et aux ravinements).

Par contre, la présence d'arbres conduit à des désordres, parmi lesquels il convient de signaler :

- les déformations en tête de talus par la présence de racines ;
- la déstabilisation d'une partie du talus en cas de renversement de l'arbre (tempête, sols détrempés, etc.) ;
- l'accentuation des phénomènes de retrait sur une partie du talus ou de la plateforme, provoquée par la succion racinaire dans les sols argileux.

Il convient donc de surveiller régulièrement la végétation présente et son état sanitaire, de la conserver et de la maîtriser dans la mesure du possible tout en évitant la venue de végétaux de grande taille (au moins à proximité de la voirie).



6.1.1.2 - L'entretien des dispositifs d'assainissement et de drainage

6.1.1.2.1 - Les eaux de surface issues de la plateforme

Les dispositifs de collecte et d'évacuation de ces eaux doivent faire l'objet d'une surveillance régulière. Leurs défauts dégradent rapidement l'état d'un remblai.

Il convient notamment :

- de surveiller et de maintenir dans leur état normal de fonctionnement les raccords et les joints entre les éléments préfabriqués et la chaussée. Ces espaces peuvent conduire à une infiltration des eaux dans le remblai lui-même ce qui est préjudiciable à long terme (Fig. 45) ;
- d'évacuer tous les matériaux et/ou végétaux qui pourraient obstruer ou empêcher le bon fonctionnement des dispositifs d'assainissement et de rétablir les fils d'eau, de réaliser des saignées ou des dérasements d'accotement jusqu'au fossé ;
- de surveiller et de maintenir dans leur état normal de fonctionnement les descentes d'eau situées dans les talus. Une dégradation (parfois le déchaussement) ou un dysfonctionnement de ces éléments est assez fréquent. Le remplacement (voire le redimensionnement) dans le cadre d'un entretien spécialisé n'est pas à exclure.

Nota : Le rejet des eaux issues de la plateforme routière dans le milieu naturel ne peut se faire théoriquement qu'après un passage à travers un dispositif de traitement adapté (bassin, fossés enherbés « plats », etc.).



Figure 45 : Défaut d'étanchéité entre la bordure béton et la couche de roulement
(Source : Cerema Ouest)



6.1.1.2 - Les eaux de pied de remblai

Les eaux de pied de remblai sont généralement issues du ruissellement sur les talus et/ou en provenance du bassin versant en amont. Ces eaux sont habituellement évacuées par des fossés de forme trapézoïdale. Afin d'éviter leur obstruction, ces fossés doivent être débarrassés régulièrement des divers matériaux, objets et végétaux.

Lors des travaux de curage, il convient de ne pas déstabiliser le talus par réalisation d'un fossé trop profond, aux pentes abruptes ou sapant le pied de talus.

Il convient d'examiner régulièrement les franchissements hydrauliques inférieurs à 2 m (non repris dans le cadre de l'IQOA pour le réseau routier national) et en particulier :

- l'état du radier (s'il en existe un) ;
- l'état et l'étanchéité des têtes (surtout amont) ;
- l'état et le niveau de corrosion des ouvrages métalliques.

6.1.1.3 - L'entretien des couches de roulement

Il convient de surveiller particulièrement l'apparition de fissures dans les couches de roulement, en bordure de chaussée et de décalages entre la chaussée et un équipement rigide (béton). Ces défauts conduisent à l'infiltration d'eau dans la chaussée, et nuisent à la pérennité de l'ouvrage. Il peut être utile également d'identifier les fissures avec rejet (décalage entre les lèvres) car elles témoignent souvent de pathologies plus graves pour le remblai.

Dans le cas d'un entretien courant, il s'agira d'effectuer des réparations légères telles que pontage (Fig. 46), point-à-temps, etc.



Figure 46 : Fissures d'amorce de glissement : le pontage des fissures réduit l'aggravation du phénomène (Source : Cerema Ouest)



6.1.2 - L'entretien spécialisé

Il concerne des travaux qui sont généralement réalisés par des entreprises extérieures au gestionnaire de la voirie. Certaines interventions peuvent être programmées (comme la réfection de chaussée) mais la plupart d'entre elles découle de constats d'anomalies qui ont été réalisés lors des visites de surveillance liées à l'entretien courant.

Parmi ces interventions, il convient de citer celles liées (liste non exhaustive) :

- à l'étanchéité de la plateforme routière et de ses abords ;
- au recalibrage des fossés ou à la réhabilitation des dispositifs d'assainissement ;
- au traitement de glissements localisés de matériaux dans les talus ;
- à l'étanchéité et à la bonne continuité des réseaux de transport des eaux (inspection vidéo, hydrocurage, etc.) ;
- au traitement de points faibles de la structure de chaussée (flache, affaissement localisé, etc.) ;
- à la remise en état des équipements défectueux (glissière béton, glissière métallique ou potence) ;
- à la présence de terriers d'animaux fouisseurs.

6.2 - Quelques principes de réparation des remblais

Les réparations des remblais doivent prendre en compte un certain nombre de contraintes imposées par le gestionnaire et par le site (emprise disponible, sécurité de l'ouvrage en cours d'exploitation, etc.).

Si l'on vise une efficacité maximale, ce sont les causes (éventuellement multiples et interdépendantes) du comportement pathologique qu'il s'agit de traiter et non les conséquences. Cependant, cette approche peut se heurter à des enjeux financiers ou de gestion de l'infrastructure prioritaires : il est alors souvent nécessaire pour le gestionnaire de mettre en balance le coût d'une réparation « de fond », supposée résoudre de façon complète le problème, et celui de réparations plus « superficielles », n'agissant pas ou imparfaitement sur le mécanisme pathologique mais permettant de conserver des conditions d'exploitation et une sécurité admissibles à moyen terme.

Les réparations décrites ci-dessous reprennent des cas rencontrés fréquemment.

6.2.1 - L'étanchéification de la plateforme

Il existe deux possibilités :

1. afin d'éviter l'aggravation des désordres, il convient de pratiquer une étanchéification des différentes fissures et ouvertures permettant l'infiltration des eaux météoriques sans attendre la finalisation du projet de réparation. Il ne s'agit en aucun cas d'une réparation définitive, le but principal est plutôt d'éviter une dégradation rapide et une ruine totale de la structure dans l'attente d'une réfection totale de l'ouvrage ;
2. l'étanchéification peut être une des composantes principales du projet de réparation. Des dispositifs durables (géomembrane, etc.) sont alors mis en place pour éviter l'imbibition du remblai.

Pour les abords de la plateforme et les terre-pleins centraux, il convient d'empêcher l'imbibition du remblai par la maîtrise de l'étanchéité (matériau argileux naturel ou traité, enduit ou géosynthétique adapté) ou par drainage et de surveiller puis de maintenir les dispositifs tels que les glissières dont le fichage peut être une cause d'infiltration.

6.2.2 - Les interventions sur les dispositifs de drainage et d'assainissement

Ces interventions reposent sur :

1. la reprise de l'assainissement de surface qui peut nécessiter des études hydrauliques et environnementales ;
2. la reprise du drainage, en particulier aux jonctions déblai-remblai.

L'intervention de spécialistes est souvent recommandée.



6.2.3 - Les substitutions de talus

Les réparations ci-dessous sont des solutions de type terrassement qui sont souvent les plus simples. En fonction du contexte et notamment de l'emprise disponible, d'autres confortements peuvent être envisagés [19, 31].

6.2.3.1 - Les substitutions superficielles

Ces substitutions concernent le traitement des glissements superficiels du revêtement végétal et éventuellement quelques dizaines de centimètres de matériaux inférieurs.

La réparation consiste à enlever les matériaux glissés d'état hydrique souvent humide à très humide. Ces matériaux sont généralement retirés en une seule fois, si le linéaire est faible et ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage.

Si des résurgences d'eau sont constatées, il est nécessaire de mettre en place un dispositif drainant (matériau drainant, géosynthétique drainant, etc.). La couverture d'un masque drainant par une faible épaisseur de terre végétale est possible, si besoin en intercalant un géotextile.

6.2.3.2 - Les substitutions de grande ampleur

Ces substitutions sont destinées à des glissements de grande ampleur impliquant une partie de la plateforme supérieure.

Il faut, autant que possible, retirer les matériaux glissés. Le terrassement nécessite un phasage bien précis : il est généralement impossible de le réaliser en une seule étape sans déstabiliser l'ensemble du remblai. Le terrassement est alors réalisé par « plots », ce qui consiste à intervenir sur un linéaire limité puis à le remplir immédiatement.

Ces travaux de substitution sont généralement combinés avec une reprise de la gestion des eaux de surface.

Nota : Les glissements de talus doivent être étudiés par un spécialiste. Il peut arriver que les matériaux glissés ne puissent être enlevés sans risque d'une déstabilisation plus globale. Ils doivent alors être eux-mêmes stabilisés par une butée de pied (et un masque) et par la création d'une risberme intermédiaire.

Des techniques de reprises prévoient la réalisation d'une succession de plots de quelques mètres (parfois même inférieurs à la taille du godet de curage d'une pelle à chenille). Les techniques sont difficilement applicables.

Choix des matériaux de substitution

Lorsque la géométrie des travaux ne permet pas d'utiliser les méthodes et les matériels de compactage habituels, il convient de préférer des matériaux de granulométrie discontinue et frottants (exemple : 50/150 mm, 100/300 mm, 100/500 mm) pour lesquels la mise œuvre est généralement suffisante pour assurer la stabilité, sans compactage. Des précisions peuvent être données concernant la dureté (par exemple LA et MDE < 45) et la résistance à la gélifraction.

Reconstitution de la plateforme et de la structure de chaussée

Le raccordement de la structure doit être réalisé avec des redans dont la largeur est au moins égale à 1 m. Le « fond de forme » ainsi obtenu doit être compacté avant remise en œuvre d'une couche de forme qui repose donc en partie sur l'ancien remblai non déstructuré.

6.2.4 - La mise en place d'un épaulement

Le terme « épaulement » couvre également les ouvrages de types chargement de pied ou butée de pied ou banquette latérale (Fig. 47).

Les renforcements par épaulement sont couramment employés pour sécuriser des remblais présentant des problèmes de rupture de talus impliquant ou non le sol support. Ils consistent à venir appuyer contre les bords de remblai un nouveau terrassement qui assurera la tenue d'ensemble.



Les dimensions de l'épaulement doivent être évaluées à partir d'une étude de stabilité (glissement le long de surfaces de rupture potentielles). En pratique, l'épaulement s'oppose aux mouvements du remblai de deux façons principales :

- par sa résistance propre au cisaillement : l'angle de frottement généralement élevé du matériau utilisé permet la mobilisation d'une résistance additionnelle le long des surfaces de rupture interceptant l'épaulement. À ce titre, la mise en place d'une bêche de pied peut être un complément important pour garantir la stabilité vis-à-vis de ruptures incluant le sol support ;
- par son effet poids : celui-ci accroît les moments résistants, au détriment des moments moteurs liés aux terrains en mouvement.

Dans l'ensemble, il s'agit d'une technique efficace – pour peu qu'elle soit bien dimensionnée – peu onéreuse (terrassements uniquement), et relativement aisée à mettre en œuvre si un accès au pied de remblai est possible. Elle peut être utilisée en urgence pour stopper une amorce de rupture mettant en péril la pérennité de l'ouvrage. On soulignera néanmoins que la mobilisation des résistances additionnelles apportées par l'épaulement nécessite une « mise en butée » du remblai contre celui-ci, qui peut prendre un certain temps. De fait, même si la stabilité de l'ouvrage n'est plus critique, il est normal que certains mouvements se poursuivent après confortement, sur une durée pouvant aller de quelques mois à quelques années pour une stabilisation complète. En termes de conception, il est important de veiller aux problématiques de drainage à l'interface remblai/épaulement, en particulier si le matériau d'épaulement est moins perméable que celui déjà en place, et de prévoir un minimum de redans pour garantir la continuité mécanique avec le remblai conforté.

De plus, la partie stabilisatrice étant la partie inférieure de l'épaulement, cela explique sa hauteur limitée et permet de réduire les tassements du corps de remblai ou du sol support, particulièrement longs à stabiliser.



*Figure 47 : Mise en œuvre d'une butée en matériau frottant
(Source : Cerema Ouest)*



6.2.5 - Les renforcements par inclusions

Les renforcements par inclusions consistent à adjoindre au corps de remblai des éléments résistants, généralement par forage ou battage. On y rattachera notamment :

- les techniques de clouage, consistant à mettre en place des barres métalliques peu inclinées par rapport au talus de remblai, associées ou non à un parement ;
- les techniques de renforcement par pieux, consistant à réaliser des pieux subverticaux de dimensions diverses dont la résistance au cisaillement s'oppose aux mouvements ;
- les techniques de renforcement par amélioration du terrain, consistant à mélanger par forage, sur des colonnes régulièrement espacées, le matériau de remblai en place avec un liant améliorant ses propriétés mécaniques.

L'avantage principal de ces techniques est qu'elles génèrent peu d'encombrement (en dehors de la phase de travaux), le remblai conservant approximativement sa géométrie initiale. Elles sont en revanche plus onéreuses que celles limitées à des opérations de terrassements et ne sont pas forcément applicables à tout type de remblai (par exemple le clouage est mal adapté aux matériaux très grossiers ou très argileux).

La mise en œuvre de ces techniques peut nécessiter des opérations préparatoires significatives, par exemple la mise en place d'une rampe d'accès pour permettre aux foreuses d'accéder au talus dans le cas du clouage.

En termes de fonctionnement, la résistance des inclusions est sollicitée progressivement par les mouvements du remblai, jusqu'à stabilisation. Il est donc normal que des mouvements se poursuivent après mise en œuvre. Les systèmes par clouage fonctionnent essentiellement en traction (résistance propre du clou, résistance d'interaction sol/renforcement), ceux par pieux ou amélioration du terrain essentiellement en compression et cisaillement.

Le dimensionnement d'un renforcement par inclusion doit s'appuyer sur une bonne connaissance du mécanisme de déformation ou de rupture à stabiliser, sous peine d'efficacité limitée. Les calculs mécaniques doivent être effectués sur la base de modèles de calcul reconnus, pour certains cadrés par des dispositions normatives, voir NF P94-270 (calculs) et NF EN 14-490 (mise en œuvre) pour le clouage par exemple. À ce titre, une reconnaissance appuyée des terrains par essais *in situ* et en laboratoire s'avérera indispensable.

6.2.6 - Les renforcements par soutènement

Les renforcements par soutènement consistent à adjoindre au remblai des ouvrages afin de soutenir une dénivelée entre les terres situées à l'amont, c'est-à-dire soutenues par celui-ci, et les terres situées à l'aval, en contrebas de l'ouvrage. À ce titre, le soutènement est soumis aux efforts provenant des terres soutenues (poussée des terres) et éventuellement de l'eau. Le mode de fonctionnement de l'ouvrage peut alors être défini en fonction de son comportement vis-à-vis de ces efforts, et plus précisément selon la manière dont il va solliciter la résistance du sol de fondation, ainsi que celle des éléments structurels qui le constituent.

Les ouvrages de soutènement sont principalement :

- les murs-poids en maçonnerie de pierre sèches ;
- les murs-poids en maçonnerie jointoyée ;
- les murs-poids en béton ;
- les murs-poids en gabions ;
- les murs-poids en éléments préfabriqués en béton empilés ;
- les murs en béton armé encastrés sur semelle ;
- les rideaux de palplanches métalliques ;
- les parois moulées ou préfabriquées ;
- les parois composites (ex. : les berlinoises) (Fig. 48) ;
- les murs en remblai renforcé par des éléments métalliques ;
- les murs en remblai renforcé par des éléments géosynthétiques ;
- les parois clouées ;
- les voiles ou poutres ancrés ;
- les enrochements (hors IQOA).



Ces techniques permettent d'obtenir des bords de remblai raidis, voire subverticaux. Elles permettent également de conserver l'emprise initiale du remblai. Toutefois leur réalisation nécessite souvent une emprise plus importante durant la phase de chantier.

Le choix de la technique la mieux adaptée doit être effectué en fonction des spécificités du site (géométrie, conditions d'accès, etc.), du coût envisageable, et éventuellement de contraintes esthétiques et environnementales à préciser par le gestionnaire. Par exemple, le battage des palplanches provoque des vibrations qui peuvent aggraver les désordres initiaux du remblai ou provoquer une gêne, notamment dans des contextes urbains.

Les travaux de réalisation de ces ouvrages sont onéreux. Ils nécessitent un dimensionnement et des contrôles en cours de chantier.



Figure 48 : Chantier de renforcement d'un remblai par paroi berlinoise
(source : Cerema Sud-Ouest)

6.2.7 - Les autres techniques de réparation

D'autres techniques de réparation que celles citées dans les sections précédentes sont susceptibles d'être mises en œuvre sur les remblais. Elles sont adaptées, au cas par cas, aux contraintes rencontrées sur le site (enjeux, possibilité ou non de fermeture de l'infrastructure, problèmes particuliers, etc.).

On peut citer par exemple :

- les substitutions de remblai par des matériaux allégés (polystyrène, pneusol®, etc.) ;
- le traitement des fouisseurs en cas de terriers en grand nombre ;
- l'amélioration du corps de remblai par injection ;
- les opérations d'amélioration du sol support (cas de fluage préjudiciable d'un sol compressible par exemple) ;
- le traitement des cavités souterraines ;
- le traitement des pathologies générées par les ouvrages traversants le remblai ;
- etc.

Il faut également rappeler qu'une structure de chaussée fatiguée induit souvent une multiplication des désordres de surface (fissures, faïençage, orniérage, flaches, nids-de-poule, etc.) qui favorisent les infiltrations d'eau et le vieillissement des couches supérieures du remblai. Dans certains cas de pathologies, le passage d'un défectographe peut donc être utile pour examiner si la réparation du remblai doit être associée à une reprise de la structure de chaussée. L'étude, le redimensionnement et la reprise des chaussées sont cadrés par les normes en vigueur (NF P98-086 par exemple) et par les catalogues de structures. L'intervention d'un spécialiste du domaine sera nécessaire.



Bibliographie

Ouvrages, documents guides

- [1] Ouvrages de soutènement, Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des murs en remblai renforcé par éléments métalliques. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 2003, 107 p.
- [2] Enquête sur la pathologie des remblais construits avec des matériaux sensibles. QUEYROU D. LRPC de Bordeaux, 1992.
- [3] Enquête sur la pathologie des remblais construits en matériaux sensibles, Volume 1 : Synthèse de l'enquête et Volume 2 : Réponses au questionnaire. AURIOL J.-C., MIEUSSENS C. & QUEYROU D., LCPC, 1999.
- [4] Rapport d'enquête sur les pathologies de remblai (Opération de recherche 11B031), Volume 1 : Synthèse de l'enquête et Volume 2 : Fiches de cas. ROJAT F., CAMBEFORT C., MALASSINGNE O., AUGER D., LRPC de Toulouse et de Saint-Brieuc / LCPC, 2005.
- [5] Conception et exécution des grands remblais - Synthèse du séminaire de Nantes. Revue Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 243, 2003.
- [6] Recommandation pour les terrassements routiers. Volumes 1, 2, 3 et 4. *Guides techniques*. Sétra, LCPC, 1976.
- [7] Réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule 1 : principes généraux et Fascicule 2 : annexes technique (GTR). *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1992.
- [8] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS). *Guide technique*. Sétra, LCPC, 2000, 240 p. (référence Sétra : D9924).
- [9] Conception et réalisation des terrassements ; Fascicule 1 : Étude et exécution des travaux - Fascicule 2 : Organisation des contrôles - Fascicule 3 : méthodes d'essais. *Guides techniques*. Sétra, 2007.
- [10] Directive n° 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.
- [11] Drainage routier. *Guide technique*. Sétra, 2006, 92 p. (référence Sétra : 0605).
- [12] Assainissement routier. *Guide technique*. Sétra, 2006, 94 p. (référence Sétra : 0632).
- [13] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) - Fascicule 0 : dispositions générales applicables à tous les ouvrages, Fascicule 2 : généralités sur la surveillance, fascicule 3 : auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. *Guides techniques*. Sétra, 2010.
- [14] Apport du drainage dans la conception des plates-formes support de chaussées - Complément au guide drainage routier et aux guides relatifs aux terrassements. *Note d'information Chaussées Dépendances*, n° 120. Sétra, mai 2009, 10 p.
- [15] Remblayage des tranchées et réfection des chaussées. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 1994, 122 p. (référence Sétra : D9441).
- [16] Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art - murs de soutènement et culées de pont. *Note d'information Ouvrages d'art*, n° 34. Sétra, janvier 2012.
- [17] Utilisation du polystyrène expansé en construction routière. *Guide technique*. CFTR, 2006, 22 p. (référence Sétra : 0622).
- [18] Étude et réalisation des remblais sur sols compressibles. *Guide technique*. Sétra, LCPC, 2000, 85 p. (référence Sétra : D0034).
- [19] Prévention et stabilisation des glissements de terrain - Conception, mise en œuvre et maintenance des dispositifs. *Guide technique*. LCPC, 2010, 161 p.
- [20] Stabilisation des glissements de terrain. *Guide technique*. LCPC, 1998, 98 p.
- [21] PNEUSOL® (Soutènement - répartiteur de contraintes). *Note d'information Chaussées Dépendances*, n° 47, janvier 1989, Sétra, LCPC.
- [22] Commande et contrôle des reconnaissances géotechniques de tracés, *Guide technique*. LCPC/SCETAURROUTE, 2001, 147 p.



- [23] Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Évaluation environnementale. *Guide technique*. Sétra, 2011, 28 p. (référence Sétra : 1101).
- [24] Traitement des sols à la chaux aérienne et aux ciments - Méthodologie des études de laboratoire. D. PUIATTI, J. PUIG et M. SCHAEFFNER (1983) - *Revue Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 124, Mars-Avril 1983.
- [25] Étude du comportement des corps de remblai. *Revue Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 179, de mai-juin 1992.
- [26] Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes. Ministère des transports, Ministère de l'urbanisme et du logement, LCPC. *Note d'information technique*, 1982, 111 p.
- [27] Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. *Guide technique*. LCPC, INERIS, 2002, 130 p.
- [28] L'utilisation de la photo interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. *Guide technique*. LCPC, 1999, 132 p.
- [29] Paramètres de forage en géotechnique. LCPC, 2010, ME79, 54 p.
- [30] Entretien des dépendances - Éléments de réflexion sur les stratégies de choix des outils de fauchage et débroussaillage. *Guide technique*. Sétra, 2013, 35 p. (référence Sétra : 1246).
- [31] Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion. CFG, 2004.
- [32] Caractéristiques de matériaux de remblai supports de fondations - Recommandations, LCPC, 1980.
- [33] IQOA - MURS - Murs de soutènement - *Guide méthodologique*. Sétra, 2005.

Normes

NF P11-300 (1992), Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 21 p.

NF P94-105 (2012) - Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable - Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre - Exploitation des résultats - Interprétation.

NF P94-063 (2011) - Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante - Principe et méthode d'étalonnage des pénétrodensitographes - Exploitation des résultats - Interprétation.

NF EN ISO 22476-4 (2012) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 4 : essai au pressiomètre Ménard.

NF P94-113 (1990) - Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration statique.

NF P94-115 (1990) - Géotechnique - Sols : reconnaissance et essais - Sondage au pénétromètre dynamique type B.

XP P94-120 (1997) - Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement au phicomètre.

NF EN ISO 18674-3 (2017) - Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation *in situ* - Partie 3: Mesurages des déplacements perpendiculairement à une ligne par inclinomètre.

NF P94-270 (2009) - *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massif en sol cloué*.

NF P94-500 (2013) - *Mission d'ingénierie géotechnique : Classification et spécifications*.

NF EN 1997-1 (P94-251-1) (2005), Eurocode 7 - Calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales.

NF EN 14475 (2007) - *Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés*.

NF X50-110 (2003) - *Qualité en expertise - Prescription générales de compétence pour une expertise*.

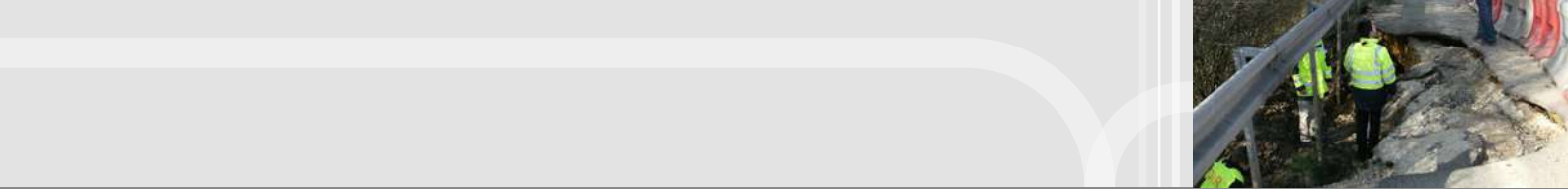
NF S70-003-1 (2012) - *Travaux à proximité de réseaux - Partie 1 : prévention des dommages et de leurs conséquences*.

NF P98-331 (2005) - Chaussées et dépendances - Tranchées : ouverture, remblayage, réfection.

XP P98-333 (2009) - Chaussées et dépendances - Tranchées de faibles dimensions.

NF EN ISO 22-476-12 - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 12 : essai de pénétration statique au cône à pointe mécanique.

NF EN ISO 22476-2 (2005) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 2 : essai de pénétration dynamique.



Glossaire

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières.

PST : Partie Supérieure des Terrassements.

Terrain naturel : Terrain originel avant travaux. Par extension, Il est assimilé au sol support du remblai. Dans ce guide, le terme « sol support » sera employé préférentiellement (un sol support de remblai pouvant être soit naturel soit artificiel).

Zone d'influence géotechnique (NF P94-500) : Volume de terre au sein duquel il y a interaction entre d'une part l'ouvrage ou l'aménagement de terrain et d'autre part l'environnement (sols, ouvrages, aménagements de terrains ou biens environnants).

En pratique, on considérera que cette zone s'étend de part et d'autre du remblai sur une distance égale à trois fois sa hauteur.

Annexes

Annexe 1 - Cadre détaillé pour le prédiagnostic ou le diagnostic d'un remblai

Le cadre fourni dans les pages suivantes peut être utilisé comme modèle de rapport.

Il présente de manière structurée l'ensemble des éléments sur lesquels il est nécessaire de s'interroger lors d'un diagnostic de remblai.

Ce cadre ayant une portée générale il est probable, pour un remblai donné, que certains points ne soient pas pertinents, n'appellent pas de commentaire particulier, ou encore ne puissent pas être renseignés par manque de données.

Le chargé d'études adaptera au cas par cas le document et évaluera s'il est utile ou non de rechercher les données manquantes pour le diagnostic.

1 - Données administratives et de repérage

Nom du remblai

Service gestionnaire

Commune, localisation précise du remblai

Voie de rattachement

- Type de voie
- Numéro de voie
- Pr + Abscisse début et fin du remblai

Autre voie concernée par le remblai

2 - Principaux éléments de contexte concernant le remblai et son environnement

Données sur l'environnement naturel du remblai

- **Données géologiques et hydrogéologiques, aménagements voisins**
Contexte géologique et hydrogéologique local, transition déblai/remblai, présence de banquette ou de dépôts, autres ouvrages liés au remblai.
- **Données géotechniques du sol support**
Présence de sols compressibles, remblai sur pente avec risque d'instabilité, dispositions constructives particulières (bêches, masques drainants, etc.).
- **Données sur la faune et la flore**
Végétalisation des talus (naturelle ou artificielle, présence d'arbre, état de la végétation, proximité du système racinaire de la plateforme et des dispositifs de drainage, etc.), présence d'animaux fouisseurs.

Données sur les couches supérieures et les équipements

- **Données sur les couches supérieures**
Type de chaussée (rigide, souple), structure, couche de forme drainante ou non, avec ou sans exutoire, nature, traitement particulier de la PST, géométrie de la PST et de la chaussée (en toit ou pente unique).
- **Données sur les équipements**

Données sur le remblai

- **Données historiques sur le remblai**

Période et durée de la construction, interruptions de chantier de longue durée, préchargement, données météo pendant le chantier (période de sécheresse ou très pluvieuse ?), modifications de la géométrie du remblai (élargissement par exemple), influence éventuelle d'anciennes pistes de chantier.

- **Données géométriques**

Hauteur du remblai, pente des talus, pente du sol support avant construction, modifications éventuelles de la topographie initiale (ancien ruisseau dévié et remblayé), profil en long avec points bas, anomalies du dévers, etc.

- **Données géotechniques sur le remblai**

Informations sur la provenance des matériaux, nature des sols, importance de l'hétérogénéité et des facteurs de contraste de perméabilité, traitements particuliers (enrochements, traitements locaux à la chaux), etc.

- **Données sur les systèmes de drainage et d'assainissement**

Tapis drainant, système de collecte des eaux (drain central et collecteurs, bourrelet latéral, descentes d'eau, avaloirs, fossés de pied, ouvrages hydrauliques, etc.).

Données sur les ouvrages en interaction avec le remblai ou sa zone d'influence

Données sur les réseaux

Présence de réseaux EDF, GDF, eau, etc.

3 - Facteurs d'évolution défavorable

Liste des principaux facteurs d'évolution défavorable en présence, bilan du niveau de connaissance sur chacun.

4 - Surveillance de l'ouvrage : cas d'un ouvrage suivi

Principaux renseignements historiques concernant la pathologie (chronologie)

Documents de référence

- date (ou année) de la dernière cotation et classement ;
- date (ou année) de la dernière inspection détaillée ;
- dossier d'ouvrage (emplacement).

Principales conclusions des inspections précédentes

Investigations ou suivis spécifiques mis en œuvre

Régime de surveillance (périodicité des actions de surveillance)

Mesures de sécurité particulières

Conditions d'exécution de l'inspection détaillée

- date ;
- ingénieur(s) géotechnicien(s) responsable(s) ;
- équipe d'inspection, moyens mis en œuvre ;
- météo, température ambiante ;
- particularités de l'intervention.

5 - Relevé des défauts et des désordres

Au niveau de l'environnement naturel du remblai et de sa zone d'influence

- **côté amont du remblai**

Stabilité d'ensemble : fissuration du terrain, tassement du terrain, bourrelets de terrain, érosions.

Inclinaisons anormales d'arbres, présence de végétation nuisible ou typique de zones humides, présence de surcharges, désordres de structures voisines du remblai.

- **côté aval du remblai**

Stabilité d'ensemble : fissuration du terrain, tassement du terrain, bourrelets de terrain, érosions.

Inclinaisons anormales d'arbres, présence de végétation nuisible ou typique de zones humides, présence de déblais, désordres de structures voisines du remblai.

Au niveau des couches supérieures et des équipements

- **plateforme et chaussée :**

Typologie des défauts de surface : Fissures parallèles ou perpendiculaires à l'axe, fissures de faïençage, déformations, affaissement local, nids-de-poule, autres défauts de surface tels que orniérage, pelade, flaches, etc.

Examen des fissures : longitudinales, transversales, avec ou sans rejets, allongement dans le temps, systèmes imbriqués avec une migration vers l'axe de la voie, importance des ouvertures et profondeur, forme des fissures.

Analyse du profil en long : affaissement local ou de grande amplitude, concomitance avec les remblais techniques éventuels ou la présence d'ouvrages enterrés.

Analyse du profil en travers : fléchissement marqué de l'accotement, déplacement latéral.

Autres observations : érosions, ravinements, inclinaison anormale d'arbres, de poteaux, etc.

- **trottoirs, bordures et accotements :**

Défauts d'alignement, altérations, descellements d'éléments, déformations de surface, affaissements, etc.

- **dispositif de retenue :**

Déformations, défauts d'alignement ou de profil en long, basculements, implantation suspecte, fissuration suspecte des glissières en béton, etc.

- **défauts divers sur autres équipements :**

Signalisation verticale, écrans anti-bruits, éléments décoratifs, lampadaires, etc.

Au niveau du remblai

Glissements locaux des talus, zones de stagnation des eaux, zones de liquéfaction identifiables en talus, fissures, décollement au contact des pieds de glissières et de diverses structures (avaloirs, descentes d'eau par exemple), inclinaison de la végétation, ravinement, gonflements, bourrelets, présence de végétation nuisible ou typique de zones humides, mouvements visibles des crêtes de talus et accotements, affaissements.

Au niveau des systèmes de drainage et d'assainissement

- **en partie supérieure (plateforme)**

Stagnations d'eau, dégradation des dispositifs de collecte et de descente des eaux, colmatage des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux, suintements, venues d'eau.

- **en partie inférieure (talus et pied de remblai)**

Stagnation d'eau dans les dispositifs de collecte ou en risberme, dégradation des dispositifs de collecte et de descente des eaux, colmatage des dispositifs de drainage ou de collecte et d'évacuation des eaux, écoulements parasites non collectés.

Au niveau des ouvrages en interaction avec le remblai ou son environnement

Déformations, fissuration, déboitements d'éléments préfabriqués, ruptures, suintements, venues d'eau.

6 - Essais, reconnaissances

7 - Mesures effectuées depuis la dernière inspection

8 - Note de synthèse

A - Conclusions de la dernière action de surveillance

B - Interprétation des constatations, mesures, essais et reconnaissances effectués lors de l'inspection

C - Conclusions de l'inspection

C1 - Avis sur l'état de l'ouvrage - (pré) diagnostic

- environnement naturel du remblai
- environnement technique du remblai
- remblai
- assainissement et drainage
- ouvrage en interaction avec le remblai et son environnement

C2 - Propositions d'investigations *in situ* ou de surveillances spécifiques

C3 - Propositions de mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde

C4 - Propositions de modification du régime de surveillance (périodicité)

D - Date et signature de(s) l'Ingénieur(s) responsable(s) technique de l'inspection détaillée

9 - Annexes au rapport

Annexe Plans du remblai

Annexe Plans et schémas des défauts et des désordres

Annexe Planches photographiques

Annexe Fiche de synthèse (cotation éventuelle du remblai, justificatifs)

Annexe 2 - Cadre type de fiche de synthèse

Le cadre fourni dans les pages suivantes peut être utilisé comme modèle de relevé ou de suivi de terrain. Il peut également servir de fiche de synthèse d'ouvrage pour le gestionnaire.

Nom du remblai..... Service gestionnaire

Commune, localisation précise du remblai

Voie de rattachement

Date Rédigé par

ZONE D'INFLUENCE		
Côté amont	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
Côté aval	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾

(1) cf. colonne « N° » du tableau 1 chapitre 3.2 : Le catalogue des désordres

ÉQUIPEMENTS		
Plateforme	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
- Chaussée		
- Trottoirs, bordures		
- Dispositifs de retenue		
- Autres équipements		
Talus et pied de remblai	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
- Équipements divers		

(1) cf. colonne « N° » du tableau 1 chapitre 3.2 : Le catalogue des désordres

STRUCTURE DE REMBLAI		
	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
Plateforme		
Talus et pied de remblai		

DRAINAGE / ASSAINISSEMENT

Plateforme	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
Talus et pied de remblai	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾

(1) cf. colonne « N° » du tableau 1 chapitre 3.2 : Le catalogue des désordres

OUVRAGE EN INTERACTION AVEC LE REMBLAI OU SA ZONE D'INFLUENCE		
	Commentaire	Type de défauts ⁽¹⁾
Type d'ouvrage ⁽²⁾		

(1) cf. colonne « N° » du tableau 1 chapitre 3.2 : Le catalogue des désordres

(2) Lister les ouvrages en interaction : buse, culée, passage à faune...

AUTRES ÉLÉMENTS D'INFORMATION

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › Studio Ogham - 2-4, rue de l'industrie - 31320 Castanet-Tolosan

Illustration couverture › © DIR Centre-Est

Vignettes pages intérieures › © Cerema Normandie-Centre, © DIR NORD

Dépôt légal : Avril 2020

ISBN : 978-2-37180-094-6

ISSN : 2417-9701

Gratuit

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03

ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Recommandations pour le diagnostic et le suivi des remblais routiers

Le terme « remblai » couvre un large panel d'ouvrages en terre destinés à surélever de manière durable le niveau du sol support, par un apport de matériaux. Le remblai étant un ouvrage vivant, cette durabilité doit se confronter aux évolutions naturelles, dans le temps, de l'ouvrage et à ses éventuelles malfaçons initiales. Or, certaines évolutions peuvent nuire à la tenue à long terme du remblai et des pathologies plus ou moins néfastes peuvent apparaître.

Le gestionnaire doit dépister, diagnostiquer, et hiérarchiser les éventuelles pathologies afin de proposer des mesures d'entretien et de réhabilitation efficaces et peu coûteuses.

Afin d'accompagner le gestionnaire dans cette démarche, ce guide propose un ensemble de recommandations pour le diagnostic, l'entretien et la réhabilitation des remblais routiers en section courante et des remblais contigus aux ouvrages d'art. Il est utilisable pour une expertise ponctuelle comme pour le suivi à long terme de pathologies.

Comme il est important d'avoir une idée précise de l'objet que l'on va diagnostiquer, la première partie de ce guide décrit la structure des remblais, leur fonctionnalité et leurs modes de construction. Ensuite, les différents types de désordres, leurs évolutions et leurs origines sont définis. La méthodologie de diagnostic et des exemples de techniques d'entretien et de réhabilitation des remblais terminent ce guide.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-094-6



9 782371 800946

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Direction technique infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30