

# ROUTES/ROADS

PIARC - Association mondiale de la Route  
[www.piarc.org](http://www.piarc.org)

n°403 - 4<sup>e</sup> trimestre 2024



DOSSIERS

**Terrassements**



Version française

# New routes, new horizons Nouvelles routes, nouveaux horizons Nuevas rutas, nuevos horizontes

Let's keep improving together  
Continuons à nous améliorer ensemble  
Sigamos mejorando juntos

# 2025

**Innovation**  
**Innovation**  
**Innovación**



**Leadership**  
**Direction**  
**Liderazgo**



**Resilience**  
**Résilience**  
**Resiliencia**



**Road Safety**  
**Sécurité routière**  
**Seguridad Vial**



**Chambéry 2026**



17th World Winter Service & Road Resilience Congress  
17e Congrès mondial de la Viabilité hivernale et de la Résilience routière  
17.º Congreso Mundial de Vialidad Invernal y Resiliencia de la carretera

**Decarbonisation**  
**Décarbonisation**  
**Descarbonización**



[www.piarc.org](http://www.piarc.org)



Photo de couverture :  
© Jan Vaslestad

**Association mondiale de la Route**  
www.piarc.org . info@piarc.org  
La Grande Arche  
Paroi Sud - Niveau 5  
92055 La Défense Cedex - France  
Téléphone : +33 1 47 96 81 21

**Président**  
Nazir Alli (Afrique du Sud)

**Directeur de la publication**  
Patrick Malléjacq

**Rédacteur en chef**  
Robin Sébille

**Responsable des publications**  
Cécile Jeanne

**Traductions :**  
Id2m (Rennes, France)

**Impression / Distribution :**  
INGENIDOC / Saint-Etienne-  
du-Rouvray



ISSN : 0004-556 X

# SOMMAIRE

## ÉDITORIAL P. 3

Nazir Alli

## ACTUALITÉ P. 4

**Brèves : Nouvelles des actions menées par l'Association mondiale de la Route**...4

### Communication

**Grèce, Royaume-Uni, Autriche : Comportements et vitesse –  
Recommandations d'amélioration de la sécurité routière dans les PRFI**..... 5

**France : Le Manuel Terrassement, un ouvrage de référence durable  
dans le domaine de la conception et la réalisation d'infrastructures routières  
et ferroviaires**..... 10

## DOSSIERS P. 13

**Prise en considération des surcharges dans la conception  
et l'évaluation des ouvrages en terre**..... 13

Paul Nowak

**Déplacer la forêt pour minimiser les effets du terrassement et  
accélérer la restauration de la compensation environnementale**..... 17

Julien-Michel Blondin-Provost

**Matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement –  
Approche européenne**..... 21

František Kresta

**Stratégies de gestion des tronçons de terrassement routier au Japon  
et potentiel de transfert de technologie**..... 25

Hiroaki Miyatake

**Approche expérimentale d'estimation du CBR / module global de sols  
de fondation renforcés par des géocomposites et d'utilisation  
du graphique de conception d'Austroroads**..... 29

Chaminda Gallage, Kasun Wimalasena, Shiran Jayakody, Jothi Raman U Jam,  
Amir Shahkolahi, Jinjiang Zhong et Raymond Chow

**Une plateforme de capteurs en ligne au service de la résilience  
des pentes de terre en Thaïlande**..... 35

Auckpath Sawangsuriya, Harutus Phoban, Attasit Sawatparnich et Apiniti Jotisankasa

**Stabilisation du glissement de terrain de Galandroud en Iran**..... 41

Alireza Chalekaee

## HISTOIRE DE ROUTES P. 45

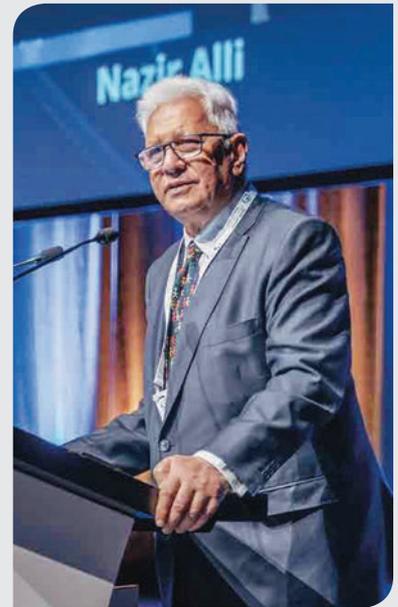
**Amélioration et unification des indications de direction et de distance  
Essai sur l'itinéraire Paris-Trouville (France)**..... 45

Edmond-Théodore Lorieux



**Si j'ai ce bon job aujourd'hui, c'est  
parce que tu m'as laissé jouer dans  
la boue enfant. Merci Maman !**

**Nazir Alli**  
Président de PIARC



## Chères lectrices, chers lecteurs,

**A**u moment de vous faire mes adieux en tant que Président pour le cycle 2022 - 2024 (écourté par un invité indésirable, nommé Covid 19), je me sens envahi par une vague d'émotions. Servir comme que président de PIARC a été l'une des expériences professionnelles les plus épanouissantes de ma vie. Ce fut un périple rempli de découvertes, de croissance et de souvenirs inoubliables.

Au Secrétaire général et à ses collaborateurs : vous avez été la cheville ouvrière de mon rôle ici. Ensemble, nous avons relevé des défis inattendus, célébré des succès tels que le Congrès mondial de la Route 2023, accueilli de nouveaux membres dans la famille de PIARC et consolidé des partenariats avec des personnes partageant les mêmes valeurs.

A mes collègues du Comité exécutif, y compris les anciens présidents, vos conseils ont été d'une valeur inestimable. Vous m'avez non seulement aidé à façonner la trajectoire de notre Association, mais vous avez également laissé une marque indélébile sur ma vision du monde. Je vous en remercie ! Je suis rempli de gratitude pour la confiance que vous m'avez accordée et pour

la sagesse que vous avez partagée. La camaraderie et le travail d'équipe dont j'ai fait l'expérience sont exceptionnels et ce fut un plaisir absolu de travailler avec vous tous.

Il ne s'agit pas d'un adieu, car je ferai toujours partie du nouveau comité exécutif. J'espère maintenir ces liens et je me réjouis d'être le témoin de la poursuite de votre succès. Sachez que vous aurez toujours en moi un ami et un soutien, quel que soit l'endroit où nous nous trouvons dans le monde.

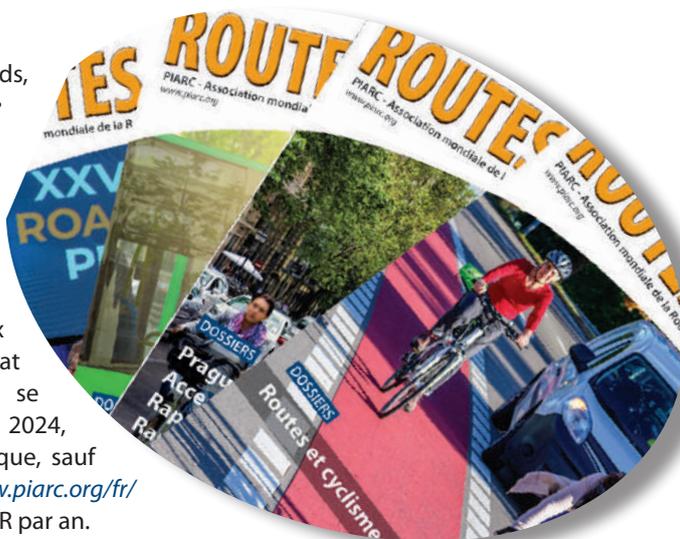
“ ... Vous m'avez non seulement aidé à façonner la trajectoire de notre Association, mais vous avez également laissé une marque indélébile sur ma vision du monde. Je vous en remercie ! Je suis rempli de gratitude pour la confiance que vous m'avez accordée et pour la sagesse que vous avez partagée. La camaraderie et le travail d'équipe dont j'ai fait l'expérience sont exceptionnels et ce fut un plaisir absolu de travailler avec vous tous... ”

Pour conclure, j'aimerais citer le Dr Seuss : « Ne pleurez pas parce que c'est fini, souriez parce que c'est arrivé ». À l'heure où vous lirez ces lignes, les fêtes de fin d'année seront peut-être terminées. Mais je ne manquerai pas l'occasion de vous présenter mes meilleurs vœux pour les fêtes de fin d'année.

Je vous souhaite, ainsi qu'à vos proches, de joyeuses fêtes de fin d'année, la paix, la santé et le bonheur pour la nouvelle année. Ne considérons pas la joie de la paix comme acquise.#

## Une page de Routes/Roads se tourne

Voici un an, nous fêtons le 400<sup>e</sup> numéro de la revue Routes/Roads, née en 1911 sous le nom de « Bulletin de l'Association internationale permanente des Congrès routiers ». Depuis cette date, en dehors des périodes de guerre, la revue a été diffusée par voie postale aux membres de l'Association aux quatre coins du monde. Depuis de nombreuses années, elle est également devenue accessible aux visiteurs du site Internet de l'Association en format PDF (<https://www.piarc.org/fr/activites/Revue-Routes-Roads>) et en format HTML (<https://routesroadsmag.piarc.org/fr/>). De nombreux membres de PIARC avaient déjà choisi de lire la revue en format électronique uniquement. Technologie et souci d'économies se conjuguant, le Conseil annuel de PIARC a décidé, en novembre 2024, de diffuser dorénavant la revue dans son seul format électronique, sauf abonnement payant disponible sur cette page : [https://www.piarc.org/fr/activites/Revue-Routes-Roads#section\\_sb4a7Fghf4](https://www.piarc.org/fr/activites/Revue-Routes-Roads#section_sb4a7Fghf4), au prix de 60 EUR par an.



À compter du numéro 404 (mars 2025), seuls les abonnés à la version papier recevront donc par la Poste un exemplaire imprimé. Il est temps de le faire dès maintenant pour ne pas interrompre votre collection. Toutefois, en fin d'année, un numéro imprimé continuera d'être envoyé à l'ensemble des membres de l'Association à jour de leur cotisation.#

\*\*\*\*\*

### RÉUNION DU CONSEIL DE PIARC À ANDORRE : NOUVEAU LEADERSHIP ET DÉBATS CLÉS POUR 2025

La réunion du Conseil de PIARC à Andorre a marqué un tournant majeur avec l'élection de nouveaux leaders qui prendront leurs fonctions le 1er janvier 2025. Jusqu'à cette date, l'actuel leadership continue de guider l'association.

Du 4 au 6 novembre, Andorre a accueilli la réunion du Conseil de PIARC, réunissant des représentants mondiaux pour aborder les défis et opportunités du secteur routier et des transports. Parmi les faits marquants, l'élection d'Emanuela Stocchi (Italie) en tant que nouvelle Présidente de l'Association. À compter de janvier 2025, elle dirigera l'association pour un mandat de quatre ans, soutenue par les Vice-Présidents Alexander Walcher (Autriche), Dharmananda Sarangi (Inde) et Mamoudou Alassane Camara (Sénégal), et par les 22 autres membres élus du Comité exécutif 2025-2028.

Cependant, jusqu'à la fin de l'année, l'équipe dirigeante actuelle reste en place, avec Nazir Alli en tant que Président, les Vice-Présidents étant Emma Lía Albrieu Cipollina (Argentine), Geoff Allan (Australie) et Mark Henry Rubarenzya (Ouganda).

Une nouvelle représentante des Comités nationaux de PIARC, Aleksandra Skorupska (Pologne), a été élue par Comités nationaux, et assumera également ses fonctions en janvier 2025 pour le cycle 2025-2028.

Le Conseil a également décerné des titres honorifiques pour reconnaître des contributions exceptionnelles à l'Association. Henri Chua (Royaume-Uni), Stephen Fidler (Royaume-Uni), Lise Fournier (Canada Québec) et Daniel Russomanno (Argentine) ont été nommés Membres d'honneur, tandis que Claude Van Rooten (Belgique) a été désigné Président d'honneur.



Plus largement, les débats au Conseil ont porté sur des sujets essentiels sur les objectifs et sur les financements de l'Association. Un atelier technique a permis d'évoquer l'Évaluation Rapide des Impacts, axée sur le partage efficace des données et la prise de décision rapide après des catastrophes naturelles ou humaines. Des experts du Chili, du Japon et du Royaume-Uni ont présenté des exemples de bonnes pratiques pour gérer des urgences telles que des inondations, des tremblements de terre et des glissements de terrain. Des études de cas des États-Unis et de la Nouvelle-Zélande ont montré que des évaluations critiques peuvent être réalisées en moins de huit heures pour accélérer les réponses. Les échanges ont également porté sur les multiples usages de l'Intelligence Artificielle dans les routes et les transports.

La communauté de PIARC adresse ses remerciements les plus sincères au Gouvernement d'Andorre et à tous les participants pour une réunion du Conseil réussie et tournée vers l'avenir.

# Comportements et vitesse – Recommandations d'amélioration de la sécurité routière dans les PRFI

George Yannis, Professeur à l'Université polytechnique nationale d'Athènes, Grèce

John Barrell, Expert international en sécurité routière indépendant, membre du CT 3.1 Sécurité routière, Royaume-Uni

Julia Roussou, Chercheuse à l'Université polytechnique nationale d'Athènes, Grèce

Isabela Erdelean, Ingénieur de recherche et cheffe de projet à l'Institut autrichien de technologie (AIT), Autriche

Andrea Schaub, Ingénieur de recherche à l'Institut autrichien de technologie (AIT), Autriche

Illustrations © Auteurs

Le comité technique Sécurité routière de PIARC constate que 90 % des décès sur les routes surviennent dans les pays à revenu faible ou intermédiaire (PRFI) et exploite cette donnée pour évaluer, identifier et partager les meilleures pratiques de sécurité routière pour les PRFI, en élaborant des documents et des études de cas qui soulignent les approches internationales et les leçons tirées. Par ailleurs, il s'attache à communiquer aux PRFI des contre-mesures éprouvées qui réduisent efficacement la probabilité et la gravité des accidents, afin que ces pays en tiennent compte dans leurs initiatives de sécurité. Ainsi, le projet d'Échange de connaissances sur la sécurité routière mondiale de PIARC visait à promouvoir le partage des connaissances en mettant en œuvre des aides qui s'appuyaient sur les travaux antérieurs de son comité technique Sécurité routière, notamment s'agissant des PRFI, où les taux de tués dans des accidents de la route sont sensiblement plus élevés que dans les pays à revenu élevé. Dans le cadre de ce projet, mené en collaboration avec l'Université polytechnique nationale d'Athènes (NTUA) et l'Institut autrichien de technologie (AIT), il a été réalisé une étude bibliographique englobant plus de 50 rapports techniques, comptes rendus de séminaires et études de cas de PIARC, et couvrant huit thèmes majeurs de la sécurité routière – stratégies / politiques de gestion, infrastructures, tunnels routiers, usagers vulnérables, facteurs / comportements humains, véhicules, vitesse et données –, une attention particulière ayant été portée au Manuel de Sécurité routière et au Manuel des Tunnels routiers. Cet article présente la synthèse des travaux publiés par PIARC dans les domaines des facteurs / comportements humains et de la vitesse, tels qu'ils ont été élaborés et diffusés dans le cadre du projet d'Échange de connaissances sur la sécurité routière mondiale de PIARC.

## DÉFIS DES FACTEURS / COMPORTEMENTS HUMAINS

Les facteurs de risque comportementaux, notamment les excès de vitesse, l'alcool au volant, le non-port du casque, le non-port de la ceinture de sécurité et l'absence de siège enfant, impactent significativement la sécurité routière. La conduite en état d'ivresse, par exemple, est à l'origine de 5 à 35 % des accidents mortels sur la route, alors que le port correct de la ceinture de sécurité peut réduire le risque de décès et de blessures graves de 45 à 50 % pour les conducteurs et passagers avant et de 25 % pour les passagers arrière [1]. Le port du casque est crucial car les lésions de la tête constituent la principale cause de décès et de traumatismes graves chez les usagers de deux ou trois roues. Par ailleurs, l'utilisation appropriée

des sièges auto peut abaisser de 60 % le nombre de tués. Parmi les risques majeurs figurent également la fatigue du conducteur et la distraction au volant. Malgré des avancées dans la législation ciblant ces facteurs de risque, l'application effective de la loi demeure un véritable défi dans les PRFI.

En sécurité routière, les facteurs humains englobent différents aspects influant sur la capacité d'un usager de la route à se déplacer en toute sécurité, tels que son temps de réaction, son orientation directionnelle dans les virages peu lisibles et le temps qu'il lui est nécessaire pour lire et comprendre les symboles ou textes. En outre, il existe une limite cognitive au nombre d'objets qu'un individu est capable de percevoir à un moment donné, et les illusions d'optique peuvent entraîner des erreurs de perception susceptibles de provoquer des accidents. Certains principes permettent de

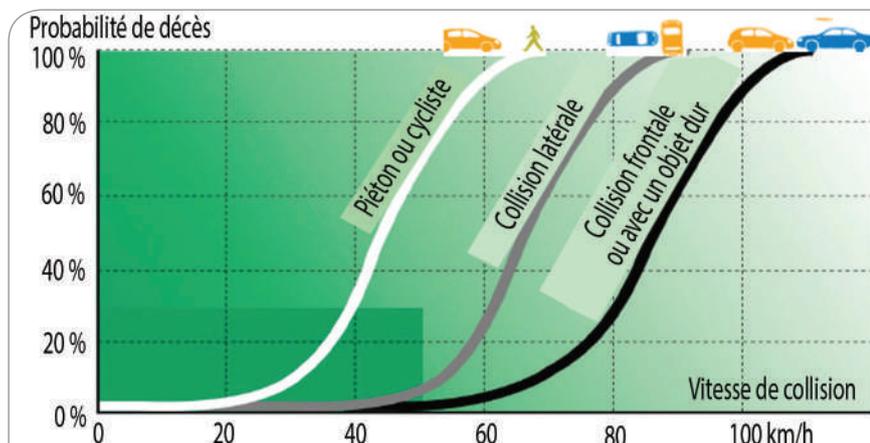


Illustration 1 - Corrélation entre la vitesse de collision et la probabilité de décès

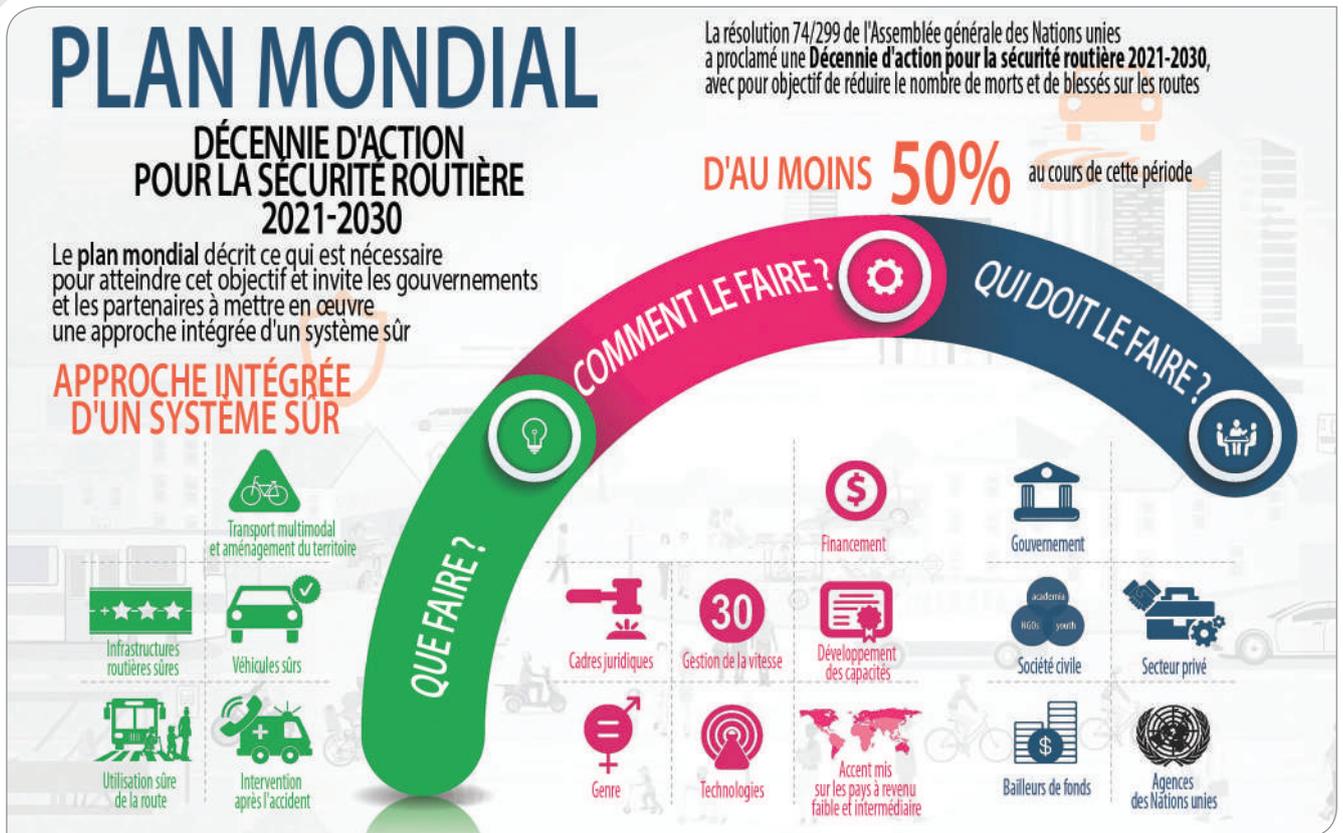


Illustration 2 - L'approche du système sûr

comprendre la plupart des accidents dus à des facteurs humains. Trois catégories de facteurs humains déclencheurs d'accidents ont été identifiées dans l'interface homme-route. La « règle des 6 secondes » renvoie aux 4 à 6 secondes dont le conducteur moyen a besoin pour s'adapter à une nouvelle condition de conduite. La « règle du champ de vision », elle, indique que les routes doivent offrir aux usagers un champ de vision clair et sûr, qui les guide dans le choix d'une vitesse adaptée. Quant à la « règle de la logique », elle suggère que la conception de la route doit suivre la logique de perception du conducteur, façonnée par son expérience et ses données visuelles récentes [2].

En sécurité routière, les problèmes comportementaux sont multiples et posent des défis colossaux liés à l'application des règlements, à l'éducation, à la délivrance du permis de conduire et au non-respect intentionnel des règles de la circulation et des limitations de vitesse. Des facteurs comme l'anxiété, la conduite sous

l'emprise de stupéfiants ou d'alcool, la perte de contrôle due à une maladie, la diminution du temps de réaction ou de l'attention résultant de la prise de médicaments et l'adoption d'un comportement à risque exacerbent ces problèmes de sécurité. Certaines actions délibérées, comme le dépassement conscient des limitations de vitesse et la recherche de sensations fortes, nuisent encore davantage à la sécurité routière [5].

### RÉFÉRENCES

- [1] WHO Global Status Report on Road Safety 2018
- [2] PIARC: Human Factors Guidelines for a Safer Man-Road Interface, 2016R20EN, 2016
- [3] PIARC: Road Safety Evaluations Based on Human Factors Method, 2019R27EN, 2019
- [4] PIARC: Road Safety Manual chapter 8 «Design for road users, characteristics and compliance». <https://roadsafety.piarc.org/en/planning-design-operation/designing-road-users> 2019
- [5] PIARC: The Role of Road Engineering in Combatting Driver Distraction and Fatigue Road Safety Risks, 2016R24EN, 2016.
- [6] PIARC: Road Safety Manual chapter 10 «Assessing potential risks and identifying issues». <https://roadsafety.piarc.org/en/planning-design-operation/risks-issue-identification> 2019
- [7] PIARC: Setting Credible Speed Limits - Case Studies Report 2019R26EN, 2019
- [8] PIARC Road Safety Manual chapter 11 «Intervention Selection and Prioritisation» <https://roadsafety.piarc.org/en/planning-design-operation/intervention-selection>

Par ailleurs, les difficultés à comprendre les infrastructures et les situations de circulation complexes, associées à des temps de réaction lents, au stress et à la fatigue, accentuent le risque. Le phénomène de « *comportement de foule* », où les individus imitent les actions des autres au lieu de prendre leurs propres décisions, contribue également à des pratiques de conduite dangereuses. Tous ces facteurs comportementaux réunis compliquent l'établissement d'un environnement de sécurité routière, d'où la nécessité de stratégies exhaustives de gestion et d'atténuation de leur impact.

### DÉFIS DE GESTION DE LA VITESSE

Les aspects clés de la sécurité illustrent l'impact profond de la vitesse sur les accidents de la route mortels. Ainsi, une hausse de 15 % de la vitesse moyenne entraîne une augmentation de 88 % du nombre de tués, alors qu'une réduction de 15 % de la vitesse moyenne le fait baisser de 52 %. La gravité des accidents

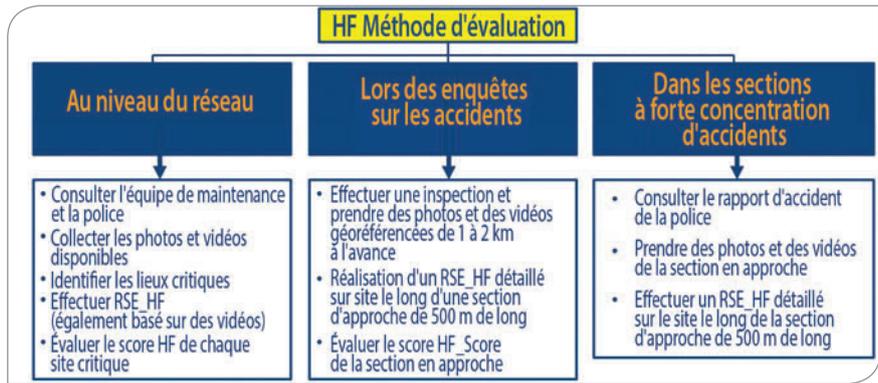


Illustration 3 - La méthode d'évaluation HF

est étroitement liée à la vitesse, les vitesses maximales offrant des chances de survie étant de 80 km/h pour les collisions frontales, de 60 km/h pour les collisions latérales et de 30 km/h en l'absence d'équipement de sécurité [7].

La relation entre la vitesse et le taux d'accidents est également étroitement liée à la complexité des routes, qui définit la vitesse de sécurité, les routes moins complexes étant généralement conçues pour des vitesses plus élevées. Le risque d'accident augmente lorsqu'il existe un écart important entre la vitesse considérée comme « *sûre* » sur la route concernée et la vitesse réelle à laquelle le conducteur roule. Les facteurs influant sur les limitations de vitesse varient en fonction du lieu [6]. Dans les zones rurales, il s'agit de la présence ou non de séparations médianes physiques, telles que des barrières de sécurité, du dégagement latéral comme les accotements, de la formation d'intersections et de la coexistence d'utilisateurs vulnérables. Dans les centres urbains, les principaux facteurs englobent la séparation des bandes cyclables et voies réservées aux piétons des voies automobiles, l'espacement entre



Illustration 4 - Une zone à 30 km/h

les intersections et la disponibilité d'espaces au-delà de la largeur de la route principale, comme des accotements. Ces facteurs conjugués soulignent l'importance de fixer des limitations de vitesse appropriées, reflétant la complexité et les conditions propres à la route, afin d'améliorer la sécurité et de réduire le nombre de tués.

### DEUXIÈME DÉCENNIE D'ACTION POUR LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE DE L'ONU

La deuxième Décennie d'action pour la sécurité routière des Nations unies vise à réduire d'au moins 50 % le nombre de morts et de blessés sur les routes entre 2021 et 2030. Atteindre cet objectif ambitieux réclame l'adoption de l'approche pour un système sûr, qui consiste à prévenir les accidents mortels et graves. Pour que cette approche soit efficace, il est essentiel de concevoir et gérer les routes en tenant compte des facteurs humains, gage de l'anticipation et de la prise en compte par le système de transport routier des erreurs humaines pour prévenir les décès ou les blessures graves qui en découlent. La mise en œuvre de cette approche implique également la gestion de la vitesse, en particulier dans les zones urbaines, qui comptent une pluralité d'usagers de la route. Dans ce type d'environnement, il est recommandé de limiter la vitesse à 30 km/h afin de renforcer la sécurité et de protéger les usagers vulnérables.

### MESURES EN FAVEUR D'UN COMPORTEMENT PLUS SÛR AU VOLANT

Pour être efficaces, les mesures de sécurité routière exigent la promulgation et l'application d'une législation complète en la matière, qui adapte les limitations de vitesse au type et à la fonction de chaque route. Il est également essentiel de fixer des taux limites d'alcoolémie pour prévenir la conduite en état d'ébriété et de prendre des dispositions plus strictes pour les jeunes conducteurs et les professionnels. En outre, le port obligatoire d'équipements de protection, tels que les ceintures de sécurité, les sièges enfants et les casques, est primordial, tout comme la restriction de l'usage d'appareils mobiles au volant. Pour que la stratégie d'usage sûr de la route soit payante, il convient également de mettre en place un organisme d'application de ces mesures, de dispenser des formations appropriées et de s'assurer que les actions coercitives s'accompagnent des équipements nécessaires [2]. De plus, la conception de l'infrastructure routière doit veiller à la sécurité de tous les usagers, intégrant une signalisation routière claire et un marquage routier intuitif et prévoyant la construction de carrefours giratoires, de ralentisseurs et de séparations physiques (bandes cyclables protégées et zones réservées aux piétons) entre les différents types d'usagers de la route [4].

Diverses mesures permettent d'améliorer le respect des limitations de vitesse par les conducteurs [7]. Pour les limitations de vitesse qui ne sont pas intrinsèquement crédibles, les principales stratégies consistent à améliorer la lisibilité et la compréhension des panneaux, à éduquer

les conducteurs afin d'encourager le respect du Code de la route, à modifier l'environnement routier et à sanctionner les excès de vitesse. Pour que les limitations de vitesse soient crédibles, il est essentiel que les caractéristiques de la route correspondent aux attentes des conducteurs, que l'environnement routier local soit plus explicite et que les raisons de l'abaissement des limitations de vitesse soient parfaitement comprises par les conducteurs.

### MÉTHODE D'ÉVALUATION DES FACTEURS HUMAINS

Au niveau du réseau, la méthode d'évaluation des facteurs humains implique l'adoption d'une approche globale commençant par la consultation de l'équipe d'entretien et de la police, la collecte des photos et vidéos disponibles et l'identification des endroits critiques [3]. Ensuite, on procède à des évaluations de la sécurité routière avec facteurs humains (RSE\_HF) à partir des vidéos et du score des facteurs humains (HF\_Score) pour chaque endroit critique. Dans les enquêtes sur les accidents, le processus comprend une inspection, la prise de photos et de vidéos géoréférencées à 1 ou 2 km en amont du site, une analyse RSE\_HF détaillée sur place le long d'un tronçon d'approche de 500 m et l'évaluation du HF\_Score de ce tronçon. Pour les zones à forte concentration d'accidents, la méthode consiste à examiner les rapports de police, à documenter l'approche à l'aide de photos et de vidéos et à effectuer une analyse RSE\_HF détaillée sur place le long du même tronçon de 500 m. Cette méthode d'évaluation de la sécurité prévoit également des inspections spéciales sur site par une équipe interdisciplinaire constituée de concepteurs, d'ingénieurs en sécurité et d'experts en facteurs humains, qui suivent un protocole d'inspection spécifique. Ces inspections sont destinées à vérifier la conformité aux normes routières et induisent un déplacement sur les lieux dans des conditions météorologiques et d'éclairage variables ou après des accidents. Par ailleurs, des inspections sont menées au niveau du réseau afin d'identifier les manquements en matière de sécurité et de prioriser les tronçons marqués par une forte concentration d'accidents.

L'outil d'évaluation des facteurs humains fournit un score d'évaluation de ces facteurs (HF\_Score) pour un site donné, représentant le pourcentage de respect des exigences en la matière à cet endroit. Ce score peut être déterminé à l'aide de l'outil d'évaluation des facteurs humains pour l'interface homme-route 2017 développé par PIARC. Cet outil intègre des caractéristiques routières validées et fiables, connues pour être à l'origine d'erreurs de perception, d'erreurs de conduite voire d'accidents.

### GESTION EFFICACE DE LA VITESSE AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE

Pour une conduite sûre, il est crucial de distinguer vitesse de sécurité et vitesse réelle. Lorsque la seconde est égale ou inférieure à la première pour la route concernée, la

conduite est considérée comme sûre. Cependant, si la vitesse réelle dépasse sensiblement la vitesse de sécurité, le risque d'accident augmente. Une route « lisible » contribue à s'assurer que les conducteurs perçoivent et adoptent le comportement approprié, réduisant ainsi l'écart entre la vitesse réelle et la vitesse de sécurité. À l'inverse, une route non lisible peut aboutir à une vitesse réelle supérieure à la vitesse de sécurité. Pour être efficaces et respectées, les limitations de vitesse doivent être crédibles et en phase avec les attentes des conducteurs.

La crédibilité des limitations de vitesse repose sur plusieurs facteurs clés [7]. Les panneaux de limitation de vitesse doivent être positionnés à des endroits appropriés, refléter fidèlement les caractéristiques routières et l'environnement et ne pas être utilisés de manière exagérée. Ils doivent être homogènes sur l'ensemble du réseau routier afin de maintenir la prise de conscience et la cohérence des conducteurs. En outre, ils doivent être visibles de jour comme de nuit, entretenus au fil du temps et en accord avec les marquages horizontaux et la délimitation des routes.

La réduction de la vitesse réelle réclame un bon équilibre entre conception des routes, limitations de vitesse et perception par le public de la vitesse appropriée. Parmi les stratégies efficaces figurent l'ajout de ralentisseurs vibreurs sur les routes en courbe pour alerter les conducteurs, l'utilisation de tronçons de chaussée en pierre à l'entrée des villages pour signaler un changement de vitesse et le rétrécissement des voies par le remplacement de la ligne centrale par une large ligne continue afin de réduire visuellement la vitesse de conduite [8]. De plus, la mise en place de radars automatiques peut contribuer à faire appliquer les limitations de vitesse et à encourager le respect des règles.

Les interventions de gestion de la vitesse englobent différentes stratégies de conception des routes, de modification des véhicules et de changement de comportement. En conception et ingénierie des routes,



Illustration 5 - Sensibilisation des conducteurs

des techniques, comme l'installation de ralentisseurs ou coussins berlinois, de passages piétons surélevés et de carrefours giratoires, permettent de gérer efficacement la vitesse. Il est également crucial de fixer des limites de vitesse sûres. S'agissant des véhicules, les interventions consistent à brider leur vitesse et à mettre en place des systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse.

## RECOMMANDATIONS CLÉS

Face aux excès de vitesse, les recommandations de sécurité soulignent qu'une gestion efficace de la vitesse implique non seulement de la réglementer, mais également de planifier et de concevoir soigneusement les tracés et réseaux des routes afin de garantir des vitesses de parcours sûres. Il est essentiel de limiter la vitesse à 30 km/h en zone urbaine afin de renforcer la sécurité et de protéger les usagers vulnérables. Les principales contre-mesures visant à réduire les vitesses réelles et à s'assurer que les conducteurs respectent les limitations de vitesse imposées consistent à améliorer la lisibilité et la compréhension des panneaux, à apporter les modifications nécessaires à la route et à son environnement et à élaborer des stratégies de mise en application rigoureuses. Et pour accroître la sécurité routière à des vitesses plus élevées, il est primordial de prendre des mesures de type amélioration des caractéristiques physiques des routes, modifications majeures de l'environnement routier et gestion de la vitesse par des changements de comportement ou des réglementations de mise en conformité. Ces stratégies peuvent être étayées par l'application forcée, l'éducation, le retrait de points sur le permis et les amendes. Les solutions d'ingénierie, telles que les ralentisseurs, aux endroits à haut risque jouent un rôle essentiel, tout comme les dernières technologies, comme les systèmes d'adaptation intelligente et de limitation de la vitesse, qui utilisent des limiteurs de vitesse et des enregistreurs de données pour accentuer l'efficacité de la gestion de la vitesse.

Pour ce qui est des facteurs humains, les recommandations de sécurité insistent sur l'importance de les intégrer au processus de conception des routes pour que ces dernières soient lisibles. Cette approche doit être guidée par les trois principaux déclencheurs associés : la règle des 6 secondes, la règle du champ de vision et la règle de la logique. Pour améliorer l'approche d'inspection de la sécurité routière, il convient de réaliser des évaluations basées sur les facteurs humains (RSE\_HF), en intégrant notamment des experts en la matière à l'équipe d'inspection. Cette approche convient tout particulièrement aux PRFI aux premiers stades de la gestion de la sécurité routière.#

# Le Manuel Terrassement, un ouvrage de référence durable dans le domaine de la conception et la réalisation d'infrastructures routières et ferroviaires

Guy Raoul, Ingénieur Conseil GR.INFRA représentant le Syndicat professionnel des Terrassiers de France (SPTF) Président du Comité miroir PIARC France « Terrassements » 2012-2023, Coordonnateur et rédacteur du Manuel Terrassement  
Illustrations © Auteur sauf mention contraire

## MISE EN LIGNE COMPLÈTE DE LA PARTIE 2 DU MANUEL DE TERRASSEMENT

Le Manuel Terrassement de PIARC, dont la rédaction a été engagée en 2021, s'achève en 2024 avec la mise en ligne des Livret 2C (Le projet terrassement) et 2D (la réalisation des terrassements) consultable sur le site « *Manuels en ligne* » comporte à présent l'ensemble des parties en version française.

Les évolutions ultérieures concernent essentiellement des méthodes et techniques innovantes, des retours d'expérience, des recherches ; elles feront l'objet de compléments au Manuel, prévus dans la cycle de travail 2024 – 2027 de PIARC.

Le Manuel constitue un ouvrage de référence pour PIARC dans le domaine de la conception et de la réalisation de grands projets d'infrastructures routières et ferroviaires. C'est un ensemble cohérent et durable, comme nous l'explicitons dans la suite de l'article. Nous avons mis en place une gestion adaptée à un ouvrage de référence, en termes d'ergonomie et d'accessibilité.

Cet ouvrage regroupe :

- Un Corpus de référentiels techniques : guides, systèmes normatifs et normes, spécifications techniques ;
- Un Corpus de connaissances, de retours d'expérience et de recherches ;
- Un ensemble de méthodologies et méthodes, de technologies et techniques spécifiques ;
- Un ensemble de compétences et savoir-faire du métier.

### Considérations générales

Le Manuel Terrassement constitue un recueil de règles de l'art, de bonnes pratiques, pour éclairer et sensibiliser les lecteurs sur la gestion du Terrassement, au stade de la conception des ouvrages en terre, du projet et de la réalisation des terrassements.

La qualité requise des ouvrages en terre nécessite des recommandations : guides techniques systèmes normatifs et normes, spécifications techniques, retours d'expériences de chantier, chantiers d'essais, ...

Le Manuel comporte des comparaisons entre les différentes approches pratiquées dans divers pays du monde, en se référant particulièrement à l'ensemble des normes européennes récentes dédiées au terrassement. Il convient de souligner que la norme européenne « Terrassements » couvre l'ensemble projet et réalisation d'infrastructures de toutes natures, ce qui constitue le domaine d'activité du Terrassement.

### État des règles de l'art

En l'état actuel, nous pouvons considérer que les références du Manuel sont pérennes et que les règles de l'art sont durables. Elles ont été validées au cours des réalisations d'infrastructures de transports de toutes natures, qui ont été



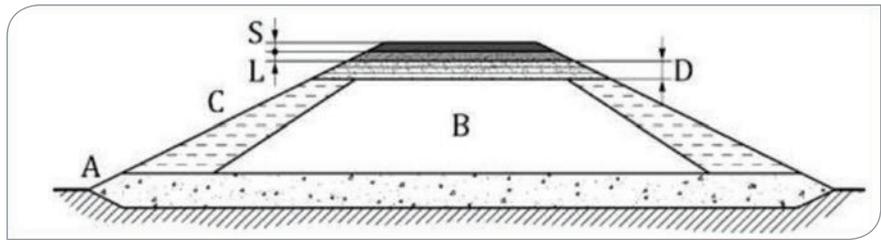
particulièrement importantes dans la période de développement du siècle dernier (1950 – 2000) jusqu'à récemment suivant les pays. Ce sont des situations variables suivant les pays, mais le constat est général.

C'est dans une conjoncture porteuse de développement et de grande activité, que les référentiels techniques se consolident et performant et que les compétences et savoir-faire de toutes les parties prenantes progressent.

Pour autant, un état de veille technique est absolument nécessaire dans des périodes de conjonctures qui s'annoncent moins favorables dans le domaine routier dans certains pays.

### Prise en considération des effets du changement climatique

Les effets du changement climatique sont à considérer particulièrement dans l'activité du Terrassement. La fréquence et l'intensité des phénomènes



- |   |                                |   |   |
|---|--------------------------------|---|---|
| A | base                           | D | zone supérieure                                 |
| B | noyau                          | L | couche de forme (intégrée à la zone supérieure) |
| C | encadrements (zones latérales) | S | superstructure (chaussée/voie ferrée)           |

Illustration 1 — Zones des remblais d'infrastructure : cas général

climatiques augmentent. Il s'agit généralement de modifier les hypothèses et les seuils pris en compte dans les référentiels et recommandations techniques de construction d'ouvrages en terre, notamment le niveau des plus hautes eaux des rivières et des fleuves et l'accroissement des niveaux marins.

Cela concerne les constructions nouvelles, mais également la maintenance des ouvrages et les réparations des désordres engendrés par les événements climatiques. La prise en compte des conditions et phénomènes climatiques extrêmes relève certainement de dispositions spécifiques plus importantes.

## ÉLÉMENTS PRINCIPAUX DES PARTIES 2C ET 2D DU MANUEL

L'interaction particulièrement importante entre projet et réalisation d'une infrastructure est mise en exergue.

Les Parties 2C et 2D constituent dans la continuité l'ensemble du déroulement

- des phases d'études de conception et de projet,
- de la phase appel d'offres et passation du marché de travaux,
- des phases de préparation et réalisation des travaux.

Le fil rouge est l'optimisation économique et environnementale du projet réalisé qui nécessite la connaissance du métier spécifique du Terrassement par l'ensemble des parties prenantes.

La connaissance des méthodes et techniques spécifiques du terrassement, la connaissance des matériaux, l'expérience acquise sur les chantiers sont nécessaires dès la phase conception.

### Partie 2C – Le projet de terrassement

La Partie 2C développe les différentes phases d'études qui permettent de finaliser le projet Terrassement qui constitue le projet de l'infrastructure sur l'ensemble du linéaire, hors le cas échéant des grands ouvrages et des tunnels.

Le projet géométrique intègre le dimensionnement géotechnique des ouvrages en terre et des couches structurantes. Le mouvement des terres et le planning associé sont élaborés dans la phase appel d'offres. La conception des déblais et des remblais est définie en se référant à la norme européenne « Terrassements ».

La conception est développée pour les remblais particuliers nécessitant des études spécifiques comme les remblais de grande hauteur et les remblais dans les sites particuliers, notamment les zones compressibles et les zones inondables.



Illustration 2 - Interfaces tunnels, grands ouvrages, ouvrages hydrauliques © Vinci Construction Terrassement



Illustration 3 - Murs de soutènement en sols renforcés

© Vinci Construction Terrassement et © GTM Terrassement

## Partie 2D – La réalisation des terrassements

Nous nous référons à un type de marché des travaux de l'infrastructure qui dévolue le pilotage et la coordination du planning à l'Entreprise de Terrassement. Les travaux comprennent les terrassements, les interfaces avec les autres natures d'ouvrages, des ouvrages particuliers, notamment les ouvrages de soutènement.

- Configuration interfaces tunnels, grands ouvrages, ouvrages hydrauliques (illustration 2)
- Différents types de murs en sols et remblais renforcés (illustration 3)

La Partie 2D comporte un chapitre sur l'ensemble des recommandations techniques qui concernent le déroulement des opérations de

terrassement suivant le mouvement des terres d'exécution et le planning correspondant et un chapitre sur les méthodes et techniques spécifiques du terrassement. Le dernier chapitre est dédié au suivi et contrôles de la réalisation.

### • L'emploi optimal des engins de terrassement

Le matériel représente 40 à 50% du coût global des terrassements de l'infrastructure. Les critères de choix, les gammes de matériels, l'adéquation et la constitution des échelons sont développés de façon approfondie, ainsi que l'emploi optimal des engins de terrassement.

### • Méthodes et techniques spécifiques

Sont présentées notamment les techniques qui concernent les traitements mécaniques et les traitements hydrauliques des matériaux, les terrassements rocheux et les techniques spécifiques de réalisation des talus (protection, raidissement).#

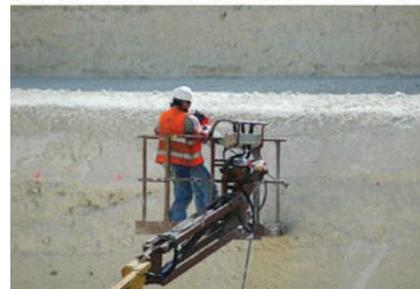


Illustration 4 - Techniques de raidissement de talus © Razel

# Prise en considération des surcharges dans la conception et l'évaluation des ouvrages en terre

Paul Nowak, Directeur technique, Atkins Ltd, Royaume-Uni

Illustrations © Auteur

La conception de terrassements et d'ouvrages en terre implique de déterminer les forces dues aux charges permanentes, principalement le sol, mais aussi de prendre en compte les surcharges transitoires, notamment celles de la circulation. L'évaluation des surcharges de circulation des terrassements s'appuie sur celle utilisée par les ingénieurs en ouvrages d'art pour la conception de tabliers de ponts et de murs de soutènement.

Les charges de circulation de référence ont été définies au niveau national et, pour les routes, sont de 10-52 kN/m<sup>2</sup> en Europe, de 12 kN/m<sup>2</sup> aux États-Unis et de 10 kN/m<sup>2</sup> au Maroc. Bien qu'elles reflètent celles utilisées par les ingénieurs en ouvrages d'art, leur application est sensiblement différente selon qu'il s'agit de tabliers de pont ou de terrassements.

Le présent article s'attache à la rationalisation et l'optimisation de ces charges de référence aux fins de leur utilisation dans la réalisation de nouveaux terrassements ou de travaux curatifs et dans l'évaluation d'ouvrages existants.

## MODÉLISATION DES CHARGES APPLIQUÉES

### Calcul structurel des charges

Au Royaume-Uni, dans le cadre du processus conceptuel du projet d'amélioration de l'A14 entre Cambridge et Huntingdon, qui vient de s'achever, le calcul des surcharges à utiliser dans la conception d'ouvrages routiers a été étudié. Des surcharges sont, en effet, appliquées à la conception structurelle pour éviter la « défaillance limite ultime » de l'ouvrage, c'est-à-dire celle entraînant une perte de service. Par nature, cette approche tient compte d'effets « factorisés » des surcharges, même si la probabilité d'occurrence est extrêmement faible.

Historiquement, pour les ouvrages routiers conçus au Royaume-Uni, ces actions variables étaient calculées et présentées à l'ingénieur géotechnique comme une combinaison de charges permanentes et de surcharges ou divisées en deux composantes généralement « non factorisées ».

Les Eurocodes en Europe, en particulier l'EN 1991, exigent de déterminer la surcharge de chaque composante de la charge variable, permettant ainsi de considérer les différents éléments de la surcharge et d'appliquer un facteur de sécurité partiel approprié. Ce dernier est normalement supérieur à 1, ce qui augmente encore la surcharge de référence.



Paul Nowak

Au Royaume-Uni, pour la combinaison de charges 2 de l'approche conceptuelle au regard de l'EN 1997-1, qui est la combinaison critique pour l'analyse de la stabilité de talus, un facteur partiel de 1,35 serait ajouté à une surcharge de 20 kN/m<sup>2</sup>, soit une valeur de conception de 26 kN/m<sup>2</sup>. Par analogie directe d'application de la surcharge à la conception d'un pont, une charge de 37,5 kN/m<sup>2</sup> serait appliquée pour un véhicule spécial et portée à 48,75 kN/m<sup>2</sup> après prise en compte d'un facteur de sécurité partiel.

### Proposition d'approche de la conception des fondations et terrassements

Pour le projet de l'A14, l'approche de la surcharge de circulation a considéré qu'il s'agissait d'un événement unique, comme le montre l'illustration 1, et n'a pas admis l'application d'autres facteurs de sécurité à la conception

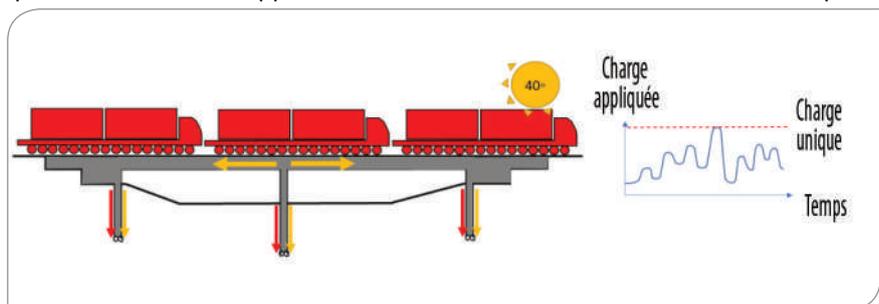


Illustration 1 - Combinaison de charges prise en compte par le concepteur de l'ouvrage

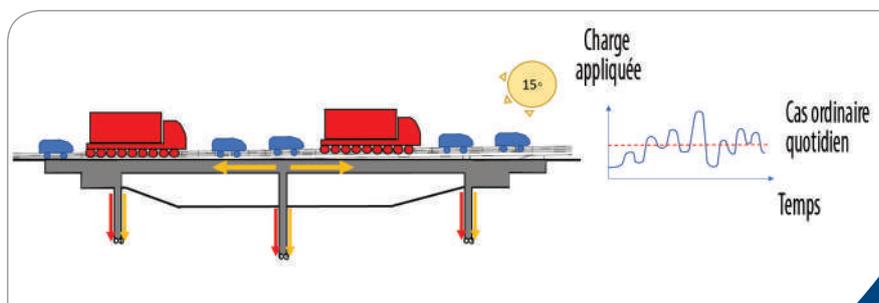


Illustration 2 - Charge optimisée grâce à la combinaison de charges fréquentes 2.3. Application de la charge dans l'analyse géotechnique

des fondations et terrassements, de sorte que les charges de référence considérées étaient supérieures à celles réellement subies par les fondations.

La charge de référence de l'illustration 1 est considérée comme le pire des cas sur toute la durée de vie de calcul de l'ouvrage et peut donc être décrite comme prudente.

Pour réduire la composante de surcharge et qu'elle soit ainsi plus proche de celle réellement subie par un ouvrage ou un terrassement pendant sa durée de vie de calcul, les états limites de service de l'EN 1990 ont été pris en compte, et le « cas fréquent » a été considéré comme le plus approprié. L'adoption de ce cas de charge a permis d'ignorer la charge des véhicules spéciaux et d'appliquer un facteur partiel de 0,75 à la charge de circulation normale de 20 kN/m<sup>2</sup>, soit une surcharge de référence de 15 kN/m<sup>2</sup>.

Cette approche a été acceptée par le client, Highways England, pour la conception des fondations de ponts, de murs de soutènement et de terrassements. Le client a également intégré l'approche à sa base de connaissances en ligne pour que cette dernière puisse être exploitée par d'autres.

Le cas de charge fréquente selon EN 1990 est présenté dans l'illustration 2.

Lorsque les ingénieurs des ponts considèrent une surcharge, qu'il s'agisse de la circulation, du vent ou de la température, ils la voient comme une charge appliquée directement à l'ouvrage qu'ils conçoivent. Les charges appliquées dites « quasi statiques » permettent de transformer une charge cyclique sur la durée de vie de calcul de l'ouvrage en une charge unique utilisable dans la conception d'un ouvrage.

Le terme « quasi statique » a été adopté pour ces charges dans la conception de terrassements et de murs de soutènement, mais il n'a pas la même signification dans l'ingénierie géotechnique, renvoyant plutôt à l'application à la surface du terrassement ou du mur de soutènement à concevoir.



Illustration 3 - Transport d'un module type de râtelier à tuyaux



Illustration 4 - Remorque utilisée pour l'essai dynamique des remblais

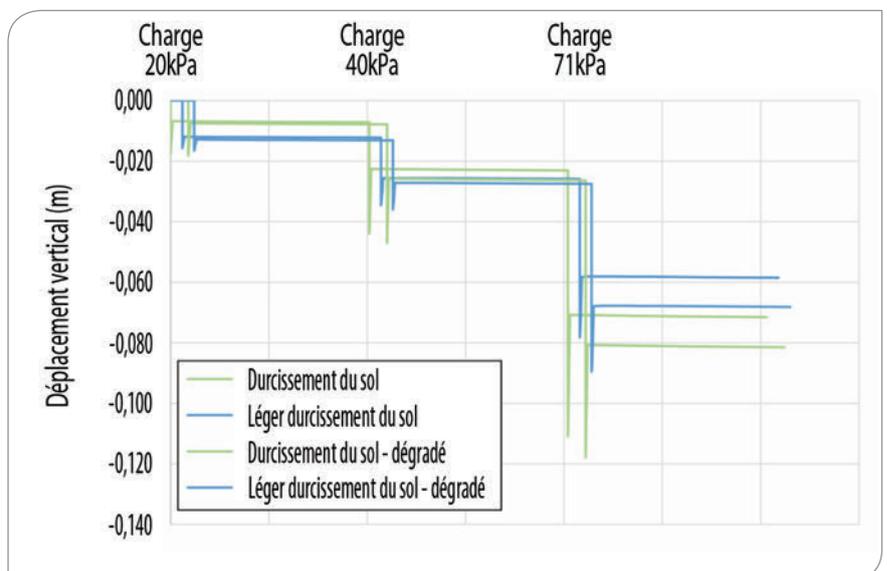


Illustration 5 - Prévisions de déformation verticale, ligne axiale de la route de transport

Le cas échéant, l'analyse du tassement d'un ouvrage de terrassement s'appuiera sur l'équation de Boussinesq de la pression appliquée en fonction de la profondeur. Ainsi, le sol situé sous la hauteur de la charge appliquée est soumis à une charge supplémentaire jusqu'à une profondeur d'environ 3 fois la largeur de la charge appliquée, soit, dans le cas d'une route à deux fois deux voies d'une largeur de près de 7 mètres, une profondeur avoisinant les 21 mètres.

Lorsque la surcharge intervient derrière un mur de soutènement, l'analyse l'appliquera sur toute la hauteur/profondeur de l'ouvrage de soutènement, multipliée par le coefficient de pression des terres  $k_a$ .

Lorsque la surcharge est prise en compte dans l'analyse de la stabilité d'un talus, elle agit sur toute la profondeur des tranches qui la coupent. Ainsi, chaque tranche étant d'une profondeur différente, la charge ne sera pas appliquée à la même hauteur de sol que la tranche d'analyse adjacente, ce qui exclut la prise en compte d'une pression appliquée constante en profondeur.

On peut également se demander si une surcharge de circulation doit être appliquée à un terrassement lorsque le tassement du sol sous-jacent est considéré. Pour BS 603], la surcharge étant transitoire et non maintenue « *quasi statique* », elle doit être ignorée. Un projet d'ampleur en cours de conception et de construction au Royaume-Uni applique la surcharge de circulation lorsque le tassement global du remblai est pris en compte.

## RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE SUR LE TERRAIN DE LA CHARGE DE CIRCULATION

La route de 36 kilomètres du projet d'expansion (FGP) de Tengizchevroil a été conçue pour faciliter le transport de 252 éléments partiellement construits entre un terminal dédié de la mer Caspienne et le chantier du champ pétrolifère.

Un module type est présenté dans l'illustration 3. Le poids des modules et de certaines de leurs remorques dépassait de 60 kN/m<sup>2</sup> la charge uniformément répartie (CUR), et 45 % des modules, de 40 kN/m<sup>2</sup>. Cette situation de charge était unique, car le poids des modules transportés était presque toujours supérieur à la charge permanente imposée au sol sous-jacent par la construction du remblai de 1,5 mètre de haut maximum.

Le sol sous-jacent à la route de transport comprenait, sur les 5 mètres les plus hauts, des dépôts récents de la mer Caspienne composés de sols granulaires meubles fins, entrelacés de canaux remplis de sols cohésifs normalement consolidés.

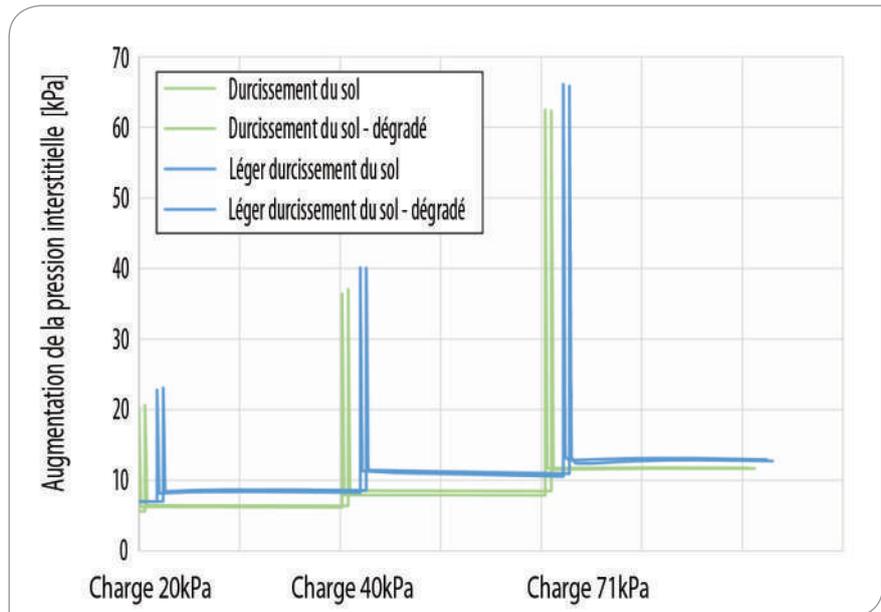


Illustration 6 - Prévisions de la pression interstitielle à 2,50 mètres sous le niveau du sol

## Conception de la route de transport

La conception de la route de transport a privilégié les zones recouvertes de sols cohésifs d'une épaisseur pouvant atteindre 4 mètres s'agissant de la stabilité globale de l'état limite ultime sous la charge de circulation transitoire, et s'est intéressée au tassement, le tassement différentiel de la route pouvant entraîner le basculement du module transporté.

Les calculs de stabilité du talus et de portance ont initialement considéré un facteur de sécurité minimum cible contre l'effondrement de 1,5. Ensuite, une analyse PLAXIS 2D a été réalisée pour tenter d'établir le degré de tassement cumulé sous la charge cyclique des modules.

Dans toutes les analyses, la charge de transport des modules a été appliquée directement à la surface de roulement de la route de transport en tant que CUR.

## Surveillance sur le terrain

L'analyse PLAXIS 2D du tassement et de l'augmentation de la pression interstitielle dans les sols cohésifs normalement consolidés n'a pas été totalement concluante, et le projet a nécessité un régime de surveillance permettant d'être averti précocement de toute défaillance potentielle imminente de la route de transport avant que la défaillance réelle n'entraîne le basculement d'un module en déplacement. Cette surveillance a été assurée en temps réel grâce à des piézomètres à fil vibrant installés dans les sols cohésifs et à des points de sondage situés dans la surface de roulement de la route de transport tous les 50 mètres.

Pour approfondir le régime de surveillance, un essai dynamique des remblais a été mené, comprenant le déplacement d'une remorque à roues multiples de 25 x 8 m sur un tronçon de 2 kilomètres de la route

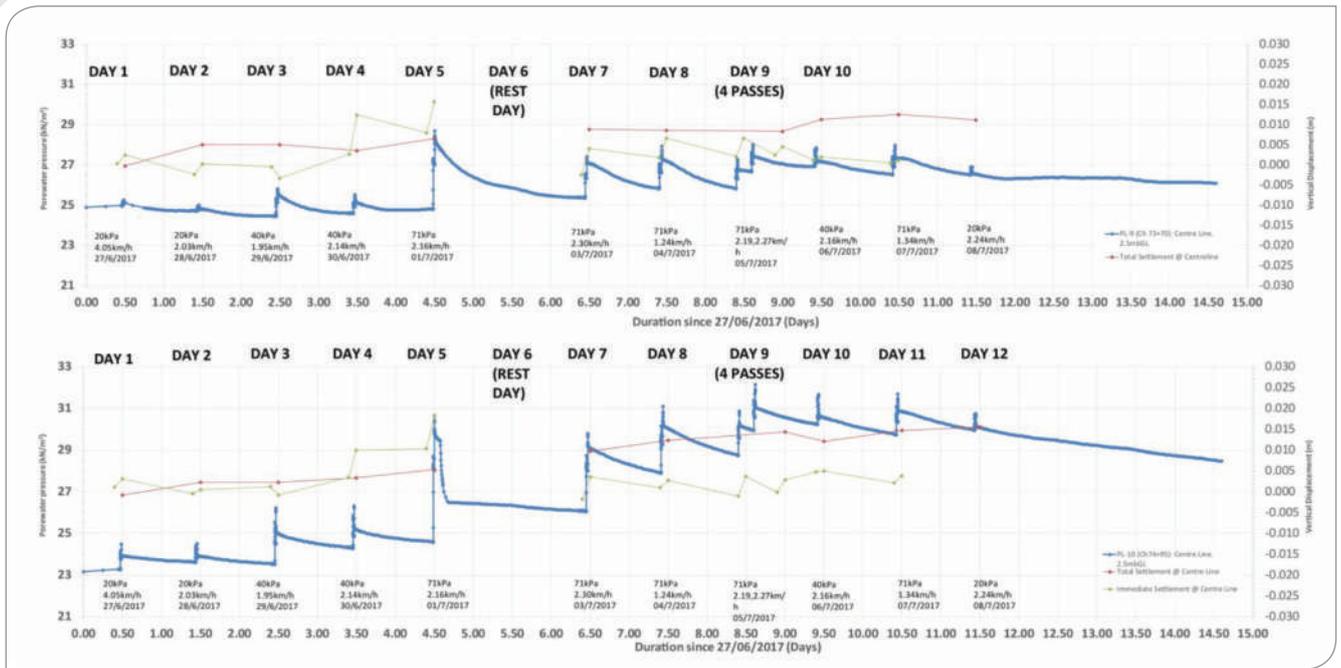


Illustration 7 - Graphiques du tassement dynamique et de l'augmentation de la pression interstitielle obtenus lors de l'essai

de transport achevée. Une charge a été appliquée à la remorque à l'aide de contrepoids de grue, et des passages de modules de  $3 \times 20 \text{ kN/m}^2$ ,  $3 \times 40 \text{ kN/m}^2$ ,  $7 \times 70 \text{ kN/m}^2$ ,  $3 \times 40 \text{ kN/m}^2$  et  $3 \times 20 \text{ kN/m}^2$  ont été effectués sur une période de 12 jours.

La remorque d'essai est présentée dans l'illustration 4.

Avant l'essai dynamique des remblais, la performance probable a été modélisée dans PLAXIS 2D. Les résultats sont présentés dans les illustrations 5 et 6.

Les résultats ont été comparés à ceux modélisés précédemment dans le programme d'analyse, ainsi qu'aux résultats d'un essai statique des remblais réalisé pour simuler la charge et déterminer les propriétés de consolidation du matériau cohésif mou.

Les résultats de l'essai dynamique des remblais sont présentés dans l'illustration 7. Ils montrent, sur l'ensemble de l'essai, une augmentation maximale de la pression interstitielle comprise entre 6 et  $8 \text{ kN/m}^2$ , une augmentation minimale de la pression interstitielle pour les passages de  $20 \text{ kN/m}^2$  et un tassement de 1 mm pour les passages de  $40 \text{ kN/m}^2$ . Le tassement maximal enregistré sur les remblais reposant sur un matériau cohésif mou était de 26 mm.

Le tassement et la pression interstitielle ont été surveillés pendant les quatre années d'exploitation de la route de transport. À l'exception de deux courts tronçons de 200 mètres sur lesquels des tassements atteignant parfois 100 mm ont été observés, la majeure partie de la route a affiché des tassements inférieurs à 50 mm, qui ont été corrigés pendant l'hiver, en l'absence de transport de modules. L'augmentation de la pression interstitielle n'a pas dépassé  $3 \text{ kN/m}^2$  par passage de module au cours de l'exploitation de la route.

## DISCUSSION

Les résultats de la surveillance dynamique du FGP de Tengiz indiquent que la modélisation géotechnique actuelle de la surcharge quasi statique de la circulation est particulièrement prudente, et ce, pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- La nature transitoire de la surcharge de circulation ne permet pas la pleine répartition des contraintes en fonction de la profondeur avant le point d'application.
- L'approche de Boussinesq de la répartition de la pression en fonction de la profondeur n'est pas applicable à la charge transitoire, et une répartition latérale supérieure de la pression est observée.
- La prise en compte des charges par essieu et sur le pneu comme CUR n'est pas totalement applicable, et les charges plus concentrées sous l'empreinte du pneu sont supportées par la construction plus rigide de la chaussée au lieu d'être propagées à une plus grande profondeur dans le sol sous-jacent.

L'adoption de l'approche développée dans le cadre du projet d'amélioration de l'A14 entre Cambridge et Huntingdon ouvre la voie à la réduction de la surcharge de circulation dans la modélisation géotechnique, mais ne résout pas complètement le problème de prudence actuel.

À l'avenir, il conviendrait d'envisager une modélisation plus précise de la surcharge de circulation sur les ouvrages en terre, car une conception optimisée réduira l'empreinte carbone de ces derniers, qu'il s'agisse de nouvelles constructions ou de travaux curatifs.#

# Déplacer la forêt pour minimiser les effets du terrassement et accélérer la restauration de la compensation environnementale

Julien-Michel Blondin-Provost, Ministère des Transports et de la Mobilité durable, Sous-ministériat aux grands projets routiers et à la région métropolitaine de Montréal, Direction du soutien technique, Canada-Québec

Illustrations © Auteur

La construction de nouvelles routes ou leur élargissement ont des impacts environnementaux souvent majeurs. Afin de réduire ceux-ci, l'approche utilisée dans les évaluations environnementales est d'abord d'éviter les impacts, ensuite de les minimiser par des mesures d'atténuation puis, finalement, de compenser les pertes résiduelles. Dans un contexte de crise climatique et de perte de biodiversité, la composante de milieu naturel boisé prend de plus en plus d'importance dans les évaluations environnementales.



Julien-Michel  
Blondin-Provost

Dans le cadre du projet de prolongement de l'autoroute 35 situé à 30 minutes au sud-est de Montréal, Québec, Canada, le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) a testé une approche novatrice afin d'éviter la coupe d'arbres et d'accélérer le processus de restauration forestière de son projet de compensation. Une approche écosystémique a été élaborée afin d'accélérer le processus de transformation de terres agricoles à forêt. L'un de ses volets consiste à transplanter dans un site de compensation la végétation ainsi que des legs biologiques affectés par les travaux.

Le suivi de l'année suivante indique un taux de survie de 91 % pour les arbres de gros calibre. De plus, une colonisation par les oiseaux et une augmentation de la diversité végétale ont été constatées, ce qui démontre le succès de l'accélération du processus de restauration écosystémique.

Les principes de legs biologiques provenant de la foresterie écosystémique sont applicables au contexte routier. Les composantes de l'écosystème initial à détruire sont déplacées afin d'accélérer la régénération de l'écosystème compensatoire. Ce projet est innovant, car par la seule action de déplacement de composantes naturelles, le promoteur minimise ses effets sur la biodiversité locale et accélère du même coup la restauration d'un autre milieu.

## CHEMINEMENT DU PROJET : COMMENT MINIMISER DAVANTAGE LES EFFETS

En raison de son envergure, le projet de prolongement de l'autoroute 35 a été subdivisé en quatre phases afin de séquencer les travaux, de faciliter la conception et la planification ainsi que de répartir les coûts (illustration 1). Dans les conditions autorisant le projet, le MTMD et les autorités environnementales ont envisagé un secteur de compensation à proximité de la phase III, site le plus sensible sur le plan des effets environnementaux, mais également celui qui présente le plus haut potentiel de restauration écologique.

Un projet de compensation des effets résiduels de toutes les phases a été proposé aux autorités environnementales afin de recréer plus de 24,5 hectares de forêt et plus de 5 hectares de milieux humides et hydriques en plus d'assurer



Illustration 1 - Prolongement de l'autoroute 35 - Phases I à IV et localisation du projet de compensation



Illustration 2 - Transformation du milieu par l'ajout d'étapes non traditionnelles avant le déboisement et le décapage - Site du chantier routier © Université du Québec à Montréal (équipe de recherche travaillant sur le projet de reboisement de l'autoroute 35) et ministère des Transports et de la Mobilité durable

la protection à perpétuité de 75 hectares supplémentaires de milieux naturels, le tout adjacent à l'emprise de la phase III. La planification en parallèle de deux projets, dont l'un ayant des pertes de milieux naturels et l'autre nécessitant la restauration de terres agricoles à l'abandon en forêt, a permis d'envisager certaines innovations.

Si la séquence éviter-minimiser-compenser doit déjà être utilisée à l'étape de détermination du tracé, elle demeure toujours pertinente à l'étape de conception et de planification de chacune des phases de projet. Pour bien appliquer cette séquence, les étapes de réalisation doivent être décortiquées et analysées. La destruction des milieux naturels liée à une nouvelle route a lieu lors de la réalisation des étapes de déboisement et de terrassement. Les étapes habituelles précédant la finalisation du terrassement sont le déboisement, l'essouchement, l'enlèvement de la terre végétale puis le déblayage des sols inertes ou le remblayage si requis.

Dans la réalisation du projet, des dates de restriction pour la protection de la nidification des oiseaux sont appliquées. Ainsi, le déboisement a lieu durant la période hivernale et les

travaux de terrassement ont lieu plutôt de juin à août, selon les délais d'octroi de contrat, puisque ces deux activités ont été séparées dans deux contrats distincts. Grâce à ce délai entre le déboisement et le début du terrassement, il est possible d'ajouter d'autres étapes qui visent à minimiser les effets environnementaux du projet.

Le MTMD a fait appel à une équipe de chercheurs afin de trouver des solutions innovantes pour réduire les impacts des activités de terrassement de son projet sur les composantes naturelles. Cette équipe a proposé au MTMD plusieurs activités supplémentaires précédant le décapage de la terre végétale, qui sont décrites dans les sections suivantes. Ainsi, des arbres, arbustes et végétaux herbacés ont été déplacés avant l'étape du déboisement, suivis de legs biologiques avant l'étape d'essouchement et d'enlèvement de la terre végétale (illustration 2). Cette approche permet également de remplir et de bonifier l'obligation d'obtenir l'autorisation de déplacer les espèces floristiques à statut précaire.

Le MTMD a choisi de conclure un partenariat de recherche avec un groupe de chercheurs universitaires intéressés

TABLEAU 1 - RÉSUMÉ DES RÔLES DES LEGS BIOLOGIQUES

<b>Refuge et foyer de colonisation</b>	Permettent à certaines espèces fauniques et floristiques de demeurer dans l'écosystème ainsi que dans le lit de germination (débris ligneux) pour les espèces floristiques.
<b>Complexité structurale</b>	Ajoutent une complexité dans la structure horizontale et verticale permettant d'accélérer le développement de peuplements complexes. Permettent le maintien du bois mort dans le temps.
<b>Connectivité</b>	Maintiennent la connectivité écologique entre les habitats adjacents, c'est-à-dire qu'à l'instar de pierres utilisées pour traverser un cours d'eau, ils permettent aux espèces floristiques de se disperser.



Illustration 3 - Transplanteuse

par la restauration et l'aménagement écosystémique afin de concevoir l'approche de reboisement, de réaliser les aménagements et d'en effectuer le suivi. Une approche écosystémique a ainsi été élaborée par l'équipe de recherche pour la restauration d'anciennes terres agricoles en un écosystème forestier résilient et diversifié. Cette approche considère l'écosystème comme unité de base, plutôt que la forêt uniquement. Un écosystème est un milieu défini dans lequel les organismes vivants interagissent entre eux ainsi qu'avec la matière inerte (minéraux, composantes chimiques, etc.), dans une relation d'interdépendance. L'approche adoptée considère donc les dynamiques, les interactions et la connectivité entre tous les organismes vivants et non vivants d'un écosystème. Cela permet une restauration non seulement des composantes, mais également des habitats et des fonctions de l'écosystème.

## PRINCIPES DE FORESTERIE ÉCOSYSTÉMIQUE APPLIQUÉS À LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

Une approche utilisée dans l'aménagement durable des forêts du Québec est le maintien de legs biologiques. Les legs biologiques sont des éléments structurels ou vivants issus d'un écosystème précédant une perturbation. Il peut s'agir d'arbres vivants ou morts, de débris ligneux, de litière intacte, de feuilles ou d'une couche de sols non affectée par la perturbation. Ces legs biologiques permettent aux composantes de l'écosystème de résister à une perturbation ou de s'en rétablir plus rapidement justement parce qu'elle donne une structure au milieu. Par exemple, la présence de matière ligneuse en forêt est un gage de biodiversité, La présence de legs biologiques à différents stades de décomposition favorise la création d'une hétérogénéité d'habitats de qualité pour tout un cortège d'espèces, en plus de pouvoir servir de lit de germination pour de jeunes semis. Cela favorise la production de l'humus ainsi que des

microorganismes du sol comme les bactéries, les mycorhizes et les champignons. Les rôles des legs biologiques se classent en trois grandes catégories, soit site refuge et foyer de colonisation, de complexité structurale et de connectivité (*tableau 1*).

## MINIMISER LES EFFETS PAR LE DÉPLACEMENT

La transplantation des arbres de gros calibre a été effectuée par une entreprise spécialisée à l'aide d'une transplanteuse (*illustration 3*). Les petits arbres, les arbustes et les végétaux herbacés ont été transplantés à la main à l'aide de pelles et d'une brouette.

Dès la première année, l'équipe de recherche a transplanté des arbres matures de hauteur variant de 1 à 23 m. Parmi les espèces transplantées, le caryer ovale et le chêne bicoloré) figurent parmi les espèces à statut précaire. D'autres espèces



Illustration 4 - Déplacement des legs biologiques (billots de bois)

comme le chêne à gros fruits et l'orme rouge sont considérées comme rares localement. Leur transplantation préserve donc la biodiversité locale.

Ainsi, en l'espace de quelques jours, le champ agricole est devenu un petit boisé en régénération par la transplantation de plusieurs individus d'arbres matures (10 m et plus). Au total, 48 individus de 14 espèces différentes ont été déplacés.

Le suivi de l'année suivante indique un taux de survie de 91 % pour les arbres de gros calibre. Nous n'avons pas encore reçu les résultats détaillés du suivi faunique, mais le premier constat est un retour des oiseaux très rapide dans la canopée créée (structure verticale).

De plus, 511 individus de végétaux herbacés de 8 espèces à statut précaire ont été déplacés afin de minimiser les effets du projet. Afin de favoriser leur survie, ils ont été transplantés dans un site naturel déjà à maturité qui jouxte le projet de compensation.

Une partie de la terre végétale a été déplacée à l'aide de pelle mécanique et de camions- bennes vers le site de compensation afin d'accélérer la restauration des conditions de sol. De plus, des branches et des billots de bois ont été transportés vers le site à restaurer au moyen d'un camion et d'une remorque. Certaines branches ont été déchiquetées afin d'obtenir des dimensions plus fines de matière lignee (*illustrations 4 et 5*).

Afin de dégager des tendances, le site de reboisement a été divisé en parcelles expérimentales témoins, qui ont été replantées sans legs biologique, et en parcelles avec legs biologique. Ces dernières ont soit des billots et copeaux de bois, soit des feuilles, soit de la terre ou soit un mélange de ceux-ci.

Le nombre d'espèces végétales (richesse spécifique) sera dénombré chaque année de suivi, dont la première en 2021, à titre d'indicateur de biodiversité, mais aussi de régénération de la forêt. Les richesses spécifiques observées en 2022 permettent déjà de tirer des constats entre la parcelle



Illustration 5 – Déplacement des legs biologiques (feuilles, terre végétale et copeaux de bois)

témoin (sans legs biologiques) et les autres. La principale différence entre elles est une augmentation de 56 % à 97 % dans le nombre d'espèces végétales.

## CONCLUSION

Dans le projet de prolongement de l'autoroute 35, le MTMD a profité de projets adjacents afin de bonifier les mesures d'atténuation avant la destruction des milieux naturels et d'accélérer la restauration de son projet de compensation. Des legs biologiques, des arbres, des arbustes et des végétaux herbacés ont été déplacés avant le terrassement final dans l'emprise routière. L'ajout de ces étapes non traditionnelles rappelle l'importance de la planification et de l'optimisation des projets afin de minimiser leurs effets. Le projet exposé est innovant, car par la seule action de déplacement d'éléments structuraux, le promoteur minimise ses effets sur la biodiversité locale et accélère du même coup la restauration d'un autre milieu.

Les résultats après la première année de suivi sont éloquentes sur la survie de la végétation transplantée, la colonisation par l'avifaune et l'augmentation de la diversité végétale. Ces résultats sont préliminaires et les suivis subséquents permettront de valider les hypothèses des chercheurs. D'ailleurs, étant donné le suivi sur 10 ans imposé par les autorités environnementales, de nombreuses données seront compilées et permettront d'une part d'approfondir les conclusions et les recommandations associées à ce projet et d'autre part d'acquérir de nouvelles connaissances.#

# Matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement – Approche européenne

František Kresta, SG Geotechnika a.s., République tchèque

Illustrations © Auteur

L'utilisation de matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement remonte au moins au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Elle constitue un élément clé dans l'adoption d'une approche active de la protection de l'environnement et de la réduction des émissions et de l'empreinte carbone. Dans les pays développés, il existe de nombreuses organisations et initiatives qui encouragent le recours aux matières secondaires.

Fondée au Royaume-Uni en 2001, l'association à but non lucratif WRAP (Waste and Resources Action Programme) propose à tous les investisseurs, constructeurs, autorités locales et autres organismes, des services en lien avec l'exploitation optimale des matières secondaires et recyclées. Elle effectue des analyses détaillées d'applications propres aux matières secondaires et publie les coûts de construction globaux et les économies réalisées grâce à l'utilisation de ces matières.



František Kresta

De même, aux États-Unis, une initiative des secteurs privé et public appelée Green Highways promeut le développement durable dans la construction des routes et autoroutes.

Ainsi, les plans audacieux des pays développés (Pacte vert) ont un rôle à jouer dans le volume de matériaux alternatifs susceptibles d'être employés dans les travaux de terrassement. Par exemple, la production moindre d'électricité par les centrales au charbon entraînera une réduction de la quantité de PCC (produits de combustion du charbon). La différence a été compensée par des importations, principalement d'Inde.

Certaines régions seront contraintes d'exploiter les matériaux des anciens terrils, dépôts ou bassins de décantation pour

les besoins de l'industrie de la construction, même au prix de l'amélioration de certaines de leurs propriétés, comme c'est le cas des cendres volantes du ciment qui, après stockage dans le bassin de décantation, s'agglomèrent et doivent être re-broyées pour pouvoir être réutilisées. Malgré son coût d'intrant supérieur, un matériau alternatif offrira plus d'avantages que les matériaux naturels pauvres employés seuls en construction.

## NORMES ET SPÉCIFICATIONS – INTRODUCTION DE NOUVEAUX MATÉRIAUX SUR LE MARCHÉ

Chaque pays a défini ses propres spécifications d'utilisation de matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement. Bien après le ciment, le béton ou les granulats, la normalisation européenne de l'utilisation des matières secondaires et recyclées dans les travaux de terrassement n'a débuté qu'en 2017, dans le cadre des normes de terrassement (EN 16907).

Dans les travaux de terrassement, seuls les matériaux dont l'aptitude a été vérifiée par les essais initiaux peuvent être utilisés. Dans le cas de matériaux non homogènes, cette aptitude au regard de la conception doit être confirmée par des essais en laboratoire et sur le terrain. La satisfaction des critères de conception doit être étayée par des tests de laboratoire par rapport aux conditions réelles de la construction en terre et dûment avérée.

TABLEAU 1 - PRODUCTION ET UTILISATION DE PCC DANS LE MONDE EN 2019 (ADAPTÉ DE HEIDRICH ET FEUERBORN 2021, [3])

Pays / Région	Production de PCC (Mt)	Utilisation de PCC (Mt)	Taux d'utilisation (%)
Australie	12,6	5,9	46,8
Asie			
Chine	585,0	404,0	69,1
Corée	7,5	6,2	82,7
Inde	226,0	191,0	84,5
Japon	12,3	12,1	98,4
Asie (autre)	22,4	13,2	58,9
Europe	103,0		
EU 15	19,4	21,5	110,8
Moyen-Orient et Afrique	33,9	3,9	11,5
Israël	0,6	0,5	83,3
États-Unis	45,8	27,3	59,6
Brésil	4,1	1,2	29,3
Canada	3,2	3,0	93,8
Fédération de Russie	30,2	3,1	10,3
<b>Total</b>	<b>1 106,0</b>	<b>692,9</b>	<b>62,6</b>

## GROUPES DE MATÉRIAUX ALTERNATIFS

Tous les matériaux anthropogéniques au sens de la norme EN 16907-2, tableau 5, ont été définis comme des matériaux alternatifs pour les travaux de terrassement aux fins de la préparation du rapport technique. Ce groupe comprend toutes les matières recyclées, les sous-produits des processus de production, ainsi que les matériaux naturels incorporés à des ouvrages par le passé ou qui ont subi un traitement mécanique (par exemple, les déchets de carrière). La classification CEN/TS 17438 relative aux granulats a inspiré la subdivision des matériaux alternatifs.

Les classes de matériaux alternatifs sont constituées conformément au tableau 5 de la norme EN 16907-2 (tableau 2 ci-dessous).

## ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

La plupart des matériaux alternatifs subissent un processus de transformation industrielle (tels que les déchets de carrière ou les stériles non brûlés) ou forment directement des sous-produits de la production (PCC, laitiers). Il est donc logique de s'attendre à une augmentation des niveaux de contaminants à l'intérieur. C'est pourquoi chaque pays définit des teneurs limites en métaux lourds ou autres composés, généralement identiques aux exigences applicables aux matériaux naturels. Cependant, les propriétés des matériaux d'origine naturelle ne sont généralement pas analysées. De nombreuses roches ignées ne sont pas conformes à la réglementation en termes de teneur en arsenic, bien qu'elles existent depuis plusieurs millions d'années.

Pour éviter que les matériaux alternatifs ne soient évalués au regard de la législation sur les déchets, très stricte, il faut veiller à ce qu'ils ne soient pas classés comme tels, mais comme des sous-produits, des matières premières secondaires, des produits chimiques (par exemple, des PCC) ou des produits.



Illustration 1 - Dépôt de cendres volantes récupérées de Panský les (près de la centrale électrique de Mělník), sur lequel les propriétés des cendres utilisées en construction ont été analysées



Illustration 2 - Construction d'une nouvelle plateforme à Nya Arendal, en Suède (22 000 m<sup>2</sup>)

Les aspects environnementaux de l'évaluation de l'utilisation potentielle de matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement varient d'un pays à l'autre et ne peuvent donc pas être généralisés à toute l'Europe.

Les seuils de contaminants sont la plupart du temps définis dans un règlement ou un décret. S'ils sont dépassés, le matériau ne peut pas être utilisé. L'approche des projets adoptée au Royaume-Uni fait une exception. En effet, pour chaque projet de terrassement d'ampleur, une analyse distincte est réalisée, et des paramètres spécifiques de la teneur en contaminants sont fixés en fonction des conditions sur le lieu de mise en œuvre (relation avec les eaux souterraines, les eaux de surface, les zones résidentielles, etc.).

TABLEAU 2 - CLASSES DE MATÉRIAUX ALTERNATIFS PAR GROUPES SELON LA NORME EN 16907-2

Classe	Source	EN 16907-2
A	Industries du recyclage de la construction et de la démolition	AR
B	Industrie de l'incinération des déchets solides municipaux	AM
C	Industrie de la production d'électricité à partir du charbon	AM
D	Industrie sidérurgique	AM
E	Industrie des métaux non ferreux	AM
F	Industrie de la fonderie	AM
G	Industrie des mines et carrières	AN (AM)
H	Matériaux naturels excavés	AN
1	Autres résidus de combustion	AM
J	Divers	AM (AR)

Légende : AM - matériaux manufacturés, AN - matériaux naturels, AR - matières recyclées

À titre d'exemple, prenons la construction d'une nouvelle plateforme dans le port de Nya Arendal, dans le sud de la Suède, où deux mélanges ont été utilisés pour traiter les sédiments marins contaminés : un mélange de ciment (54 %), de laitier granulé de haut-fourneau (24 %) et de cendres volantes issues de la combustion de schistes bitumineux (22 %) (provenant d'Estonie) à raison de  $150 \text{ kg/m}^3$ , et un mélange de ciment et de laitier granulé de haut-fourneau (50:50) dans une proportion de  $120 \text{ kg/m}^3$ .

### Menaces techniques et solutions

La teneur en matière organique, surveillée, par exemple, lors de l'utilisation de cendres volantes dans le béton, dont les niveaux élevés pourraient affecter la vitesse de rigidification et de durcissement de ce dernier, n'est pas pertinente dans le cas de matériaux alternatifs pour les travaux de terrassement. Lors de l'emploi de ces matériaux dans des travaux de terrassement prévoyant la construction de remblais et garantissant un compactage de haute qualité et une réduction de la teneur en pores d'air à moins de 12 %, il n'est pas nécessaire de contrôler la teneur en matière organique. La méthodologie appliquée pour déterminer la teneur en matière organique pose également problème. Si la méthode de la perte au feu est retenue, alors la température de combustion va sensiblement impacter le résultat.

Dans les travaux de terrassement, la teneur en produits de combustion du charbon ou d'autres matériaux (cendres de biomasse, cendres volantes d'incinérateurs municipaux, cendres volantes d'incinération de boues papetières ou de boues d'égouts ou cendres volantes de combustion de schistes bitumineux), stériles non brûlés ou autres matériaux susceptibles de contenir une quantité accrue de matières organiques (matériaux de dragage), n'est pas restreinte.

Certains pays limitent les teneurs en sulfates issus de produits de la combustion du charbon (principalement les cendres résiduelles



Illustration 3 - Décharge de stériles thermiquement active d'Heřmanice (Ostrava, République tchèque), janvier 2022



Illustration 4 - Échantillons de laboratoire de cendres volantes à l'issue d'essais de gonflement linéaire dans un moule CBR : cendres volantes de combustion en lit fluidisé (ETI), cendres résiduelles (ETI) et cendres volantes siliceuses (EME) après 28 jours de mûrissement sans liant

et volantes de combustion en lit fluidisé), de la fabrication de fer et d'acier (scories d'aciérie et de hauts fourneaux), de la fabrication des métaux non ferreux et, le cas échéant, de la combustion d'autres matériaux (cendres de la biomasse), de stériles non brûlés (pouvant contenir des sulfures comme la pyrite et la marcassite) ou de briques pilées susceptibles de renfermer des résidus de plâtre, afin que leurs lixiviats ne puissent pas avoir d'effet corrosif sur l'armature des éléments en béton armé à leur contact (culées de pont, ponceaux). Si le matériau alternatif présente une teneur en sulfate supérieure, une attention particulière doit également être portée à la conception du traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques, car des minéraux (ettringite, thaumasite) peuvent se former et augmenter son volume.

Récemment, des discussions se sont tenues sur l'influence possible sur la stabilité du volume des produits issus de la combustion du charbon après dénitrification par la méthode de réduction catalytique sélective (SCR) ou de réduction non catalytique sélective (SNCR). Des technologies réduisent les émissions d'oxyde d'azote, mais les composés azotés se lient aux cendres volantes et à d'autres sous-produits de la combustion. Les risques d'exposition accrue à l'ammoniac ont été traités principalement dans les centrales à béton lors de l'utilisation de cendres volantes après dénitrification dans le béton. L'emploi de cendres volantes après dénitrification dans les travaux de terrassement élimine ce risque. L'ammoniac rejeté ne dépasse pas les limites hygiéniques en dehors des zones résidentielles. Par ailleurs, l'effet de la dénitrification sur les propriétés mécaniques des cendres volantes obtenues est minime. Les discussions sur le rejet possible d'ammoniac et l'augmentation de la porosité et du volume de certains mélanges de cendres volantes sont toujours en cours (illustration 5).

Le principal risque réside peut-être dans les changements de volume provoqués par l'hydratation de la chaux libre ou de la périclase libre (MgO), susceptibles de se produire en présence de laitiers (scories de hauts fourneaux, d'aciérie et de métaux non ferreux). Les changements de volume dus à la présence de CaO libre se produisent souvent dans les produits de combustion du charbon (principalement les cendres volantes et les cendres résiduelles de la combustion en lit fluidisé), mais aussi d'autres matériaux (notamment les déchets municipaux et la biomasse), comme indiqué ci-avant.

Pour l'utilisation de matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement ou dans les couches de construction non liées, il est généralement recommandé de procéder à un gonflement linéaire dans des moules CBR conformément à la norme EN 13286-47 relatives aux matériaux dangereux. Pour les produits de combustion du charbon ou d'autres résidus de combustion, il est conseillé de commencer l'essai après 3 jours de mûrissement.

Certaines scories d'aciérie ou d'autres sous-produits métallurgiques peuvent poser problème, car les changements de volume à température et pression normales durent de plusieurs mois à plusieurs années, et aucune corrélation entre ces essais et ceux effectués à des pressions et températures plus élevées (par exemple, les essais en autoclave) n'a été présentée jusqu'à présent.

## CONCLUSIONS

Les matériaux alternatifs sont utilisés depuis longtemps dans les travaux de terrassement. D'un côté, nous disposons de matériaux historiquement éprouvés avec d'importantes réserves (PCC, laitiers, stériles) et de l'autre, des matériaux d'apparence exotique qu'on ne trouve que dans certaines régions d'Europe (schistes bitumineux usés en Écosse et Estonie, cendres de schistes bitumineux en Estonie) et des matériaux dont les volumes ne seront jamais conséquents dans les travaux de terrassement (verre recyclé, poussière de four à chaux, sables de fonderie, balles de pneus ou pneus concassés).

Parmi ces groupes de matériaux alternatifs, certains verront leur importance augmenter de manière significative à l'avenir, en particulier si le déclin de la combustion du charbon se poursuit et que nous épuisons progressivement les ressources des anciens bassins de décantation, et si l'Inde et la Chine font également le choix de l'atténuation, ce qui suffirait à inonder le marché européen de ces matériaux. Ces matériaux sont essentiellement des cendres volantes et résiduelles issues de l'incinération de déchets municipaux. Leur utilisation dans les travaux de terrassement reste limitée en raison de leur teneur élevée en métaux lourds et autres contaminants, en particulier les chlorures. Ils doivent donc d'abord être nettoyés. Les technologies susceptibles de réduire les coûts économiques de ce processus seront analysées.

Les matières recyclées seront employées dans des applications à plus forte valeur ajoutée, notamment pour la production de granulats. Leur utilisation dans les travaux de terrassement sera toujours la bienvenue, mais elles constitueront moins de la moitié du volume total de matériaux alternatifs intégrés. Elles serviront principalement à la régénération des friches industrielles et la reconstruction des routes.

Si nous respectons ces procédures, les problèmes de dommages de construction ne se répéteront pas avec les matériaux volumétriques instables. Malheureusement, par le passé, certains matériaux n'ont pas été utilisés de manière prudente. En République tchèque, cette situation est principalement due à l'acceptation non critique de certificats portant sur des matériaux très hétérogènes (par exemple, des déchets d'acier) en lieu et place des essais requis.



*Illustration 5 - Cendres volantes après dénitrification via la méthode SNCR à la centrale électrique d'Opatovice (République tchèque), utilisées comme remblai de la D11 Hradec Králové-Jaroměř en 2020 © Klara Malotova*



*Illustration 6 - Déchets d'acier provenant du remblai de la D47, à Ostrava (République tchèque), après essai de gonflement linéaire dans un moule CBR à une température de 75 °C*



*Illustration 7 - Déformation de la chaussée à une station d'essence en raison du gonflement des déchets d'acier dans le sol de fondation (avant la réparation de 2016)*

Malgré les problèmes décrits ci-avant, l'utilisation de matériaux alternatifs dans les travaux de terrassement est déjà bien établie. Nous ne pouvons cependant pas nous reposer sur nos lauriers. Il nous faut être constamment attentifs à leurs propriétés, susceptibles de refléter certains changements technologiques dans leur production (tels que la dénitrification et la démercuration de la combustion du charbon), et échanger nos expériences sur leurs applications dans différents domaines des travaux de terrassement.

Ne craignons pas d'utiliser des matériaux alternatifs et ayons confiance en eux !#

# Stratégies de gestion des tronçons de terrassement routier au Japon et potentiel de transfert de technologie

Hiroaki Miyatake, Directeur, Groupe de recherche en géologie et ingénierie géotechnique, Institut de recherche en travaux publics, Japon

Illustrations © Auteur

Ces dernières années, les réseaux routiers japonais ont été fréquemment perturbés par des dégradations de tronçons de terrassement routier en remblais, déblais d'ouvrages routiers en terre et versants naturels résultant de pluies intenses et de tremblements de terre. Sur les 1,2 million de km de routes que compte le Japon, seuls 16 000 km sont constitués de ponts et de tunnels, et plus de 90 % des routes japonaises sont considérées comme des tronçons de construction routière. Pour le bon fonctionnement du réseau routier, la gestion des tronçons de terrassement routier est primordiale au regard de leur ampleur et du nombre de catastrophes qui surviennent. Le présent article offre une vue d'ensemble des méthodes de gestion adoptées dans la phase de service des tronçons de terrassement routier au Japon et en explique le contexte. Par ailleurs, il aborde les points à garder à l'esprit et les possibilités de transfert de la technologie japonaise de prévention des catastrophes à d'autres pays.



Hiroaki Miyatake

Il existe différents types d'ouvrages routiers en terre, et la combinaison complexe de ces ouvrages forme l'espace routier. Les ouvrages artificiels, tels que les remblais, les déblais et les ponceaux, et les versants naturels face à la route sont appelés tronçons de terrassement routier.

Un tronçon de terrassement routier présente les caractéristiques suivantes au regard de sa gestion :

- Il est particulièrement long.
- Il est composé de plusieurs ouvrages et, dans certains cas, de versants naturels sans ouvrages, ce qui complique la description de sa tenue.



Illustration 1 - Dégradation de la RN 121 en août 2022

## SYSTÈME DE GESTION DES TRONÇONS DE TERRASSEMENT ROUTIER AU JAPON

Au Japon, la chute de panneaux du plafond du tunnel de Sasago en 2013 a entraîné une refonte de l'entretien des ouvrages routiers vieillissants, avec l'inspection et le diagnostic, tous les cinq ans, des ponts, tunnels, grands ponceaux et galeries en terre. La politique de base consiste ensuite à réaliser un entretien préventif fondé sur les résultats du diagnostic afin de prédire la dégradation de la tenue de l'ouvrage dans le temps. Cependant, dans la mesure où les ouvrages routiers en terre présentent des caractéristiques différentes de celles des ouvrages principalement constitués d'acier ou de béton, la gestion s'appuie sur des mécanismes spécifiques.

La gestion des tronçons de terrassement routier vise à assurer la fonction de circulation de l'espace routier qui les traverse plutôt que la tenue de chacun des ouvrages. On considère tout espace routier compromis ou toute atteinte de l'extérieur à l'espace routier comme des conditions limitatives.



Illustration 2 - Rupture du talus de la route express Jōban en février 2021

L'espace routier peut être compromis, par exemple, lorsque la fonction de soutien d'un ouvrage de

terrassement routier, tel qu'un remblai, est perdue ou que l'espace routier est barré par l'effondrement de déblais. Les conditions peuvent aller de la perte de la route elle-même, en raison d'un effondrement, à l'apparition de « marches d'escalier » ou de dolines qui rendent la circulation difficile. Cette situation critique doit être confirmée par des inspections des fonctions des ouvrages de construction routière sur place.

### Visite périodique des galeries et ponceaux de grande taille

Les grands ponceaux et galeries sont des ouvrages de construction routière moins sujets aux incertitudes que d'autres, car leurs principaux composants sont en acier ou en béton et leur action principale n'est pas la pression des terres. Les visites périodiques associées sont les mêmes que pour les ponts : une fois tous les cinq ans, un contrôle visuel rapproché du vieillissement des composants est effectué, et leur tenue est diagnostiquée. Le diagnostic suit quatre étapes : solidité, entretien préventif, action précoce et mesure d'urgence, cette dernière correspondant à la phase d'altération de la fonction de l'ouvrage qui exige d'intervenir sans tarder. Au cours de la phase d'action précoce, les fonctions de l'ouvrage ne sont pas altérées, mais il existe un risque qu'elles le soient, ce qui implique d'anticiper. L'entretien préventif est une phase au cours de laquelle l'ouvrage n'a pas encore été dégradé, mais sa fonction peut être efficacement préservée grâce à la mise en œuvre de mesures de prévention. Ce concept a été introduit dans le but d'améliorer le développement de l'infrastructure du pays dans son ensemble.

### Inspection des ouvrages routiers en terre

Les inspections des ouvrages routiers en terre comprennent les remblais, les déblais, les petits ponceaux et les installations de stabilisation des talus, à l'exclusion des grands ponceaux et galeries. Ces ouvrages

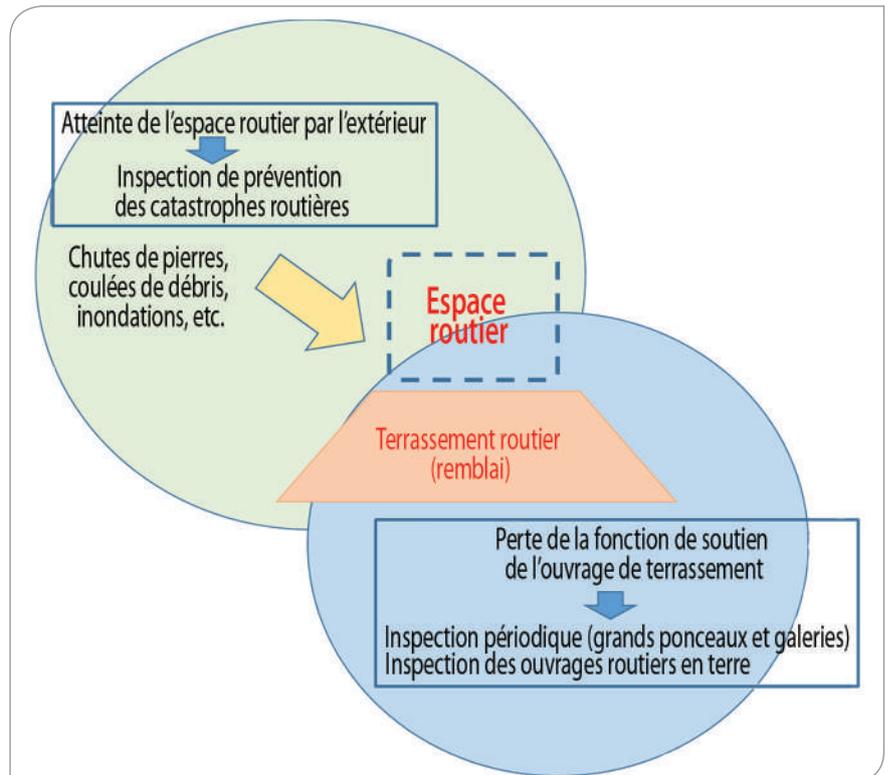


Illustration 3 - Représentation schématisée de la politique d'inspection entrant dans le cadre de la gestion de l'espace routier

sont principalement conçus pour la pression des terres et le glissement des talus, qui sont très incertains. Pour les ouvrages en acier et en béton, la courbe de performance peut être estimée avec une grande précision en raison de la faible incertitude des matériaux et de leur mécanisme de réponse, et l'entretien préventif permet de prendre des contre-mesures avant la survenue de défaillances fonctionnelles, celles-ci étant impossibles à anticiper avec précision avec les ouvrages routiers en terre. Comme dans le cas des ponts, les résultats de l'inspection en quatre étapes des ouvrages routiers en terre ont été déterminés, mais la deuxième étape, qui est celle de l'entretien préventif pour les ponts, a été définie comme étant une observation de l'évolution de la situation. Cette étape consiste à définir une période permettant de déterminer, à partir de la vitesse de déformation, de la forme, etc., si la déformation externe est telle qu'elle interfère avec la fonctionnalité. Par ailleurs, la déformation de grands ouvrages suite à des catastrophes passées a été observée.

### Patrouilles

Des inspections générales des ouvrages de terrassement routier sont menées lorsque des anomalies sont constatées par des patrouilles, etc. La méthode d'inspection de base consiste à contrôler visuellement l'ouvrage depuis un véhicule se déplaçant sur la route. Ces inspections sont réalisées par des patrouilles de routine, périodiques et d'urgence en cas de phénomènes anormaux, comme des tremblements de terre ou des pluies intenses. Sur les routes nationales gérées par le gouvernement japonais, les patrouilles de routine passent au moins une fois tous les deux jours. Sur celles gérées par le gouvernement préfectoral et les routes forestières à faible trafic, les patrouilles sont moins fréquentes. Des inspections de routine sont effectuées au moins une fois par an, et des inspections d'urgence, après un tremblement de terre d'une certaine magnitude ou un typhon.

Une fiche de prévention des catastrophes est créée pour chaque cause découverte lors de l'inspection et susceptible d'affecter l'espace routier, et les informations

qui y sont consignées sont exploitées pour mener des inspections continues. Ces dernières sont des inspections d'état de santé qui ont lieu une fois par an environ. Les fiches d'inspection sont conçues pour prendre en compte les caractéristiques des ouvrages de terrassement routier, qui présentent un degré élevé d'incertitude, compliquant la détermination de leur intégrité après une seule inspection. Ce système constitue la base de la phase d'observation de l'évolution des ouvrages de terrassement routier des inspections, cette observation étant préparée à partir de la fiche d'inspection.

### Examen institutionnel du système de gestion

L'inspection porte sur des cibles divisées en sections de 10-15 mètres et s'effectue sous deux angles : l'intrusion dans l'espace routier par l'extérieur et la perte de fonction des ouvrages de soutien de l'espace routier (en noir les noms des inspections, et en rouge, leur objet). Les inspections sont exhaustives et complémentaires.

### ÉLÉMENTS À PRENDRE EN COMPTE DANS LE TRANSFERT INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE DES STRATÉGIES DE GESTION DES ROUTES

Les tronçons de terrassement routier se caractérisent par leur grand nombre et la difficulté de leur évaluation quantitative. En outre, en raison de leur faible coût par rapport à d'autres ouvrages comme les ponts, ils représentent une part plus élevée dans la construction routière des pays développés, en particulier ceux pour lesquels on escompte une croissance économique. Leur gestion est donc primordiale.

### Système intégrant les caractéristiques des terrassements

Sujette à une importante incertitude, la tenue des tronçons de terrassement est difficile à évaluer avec précision

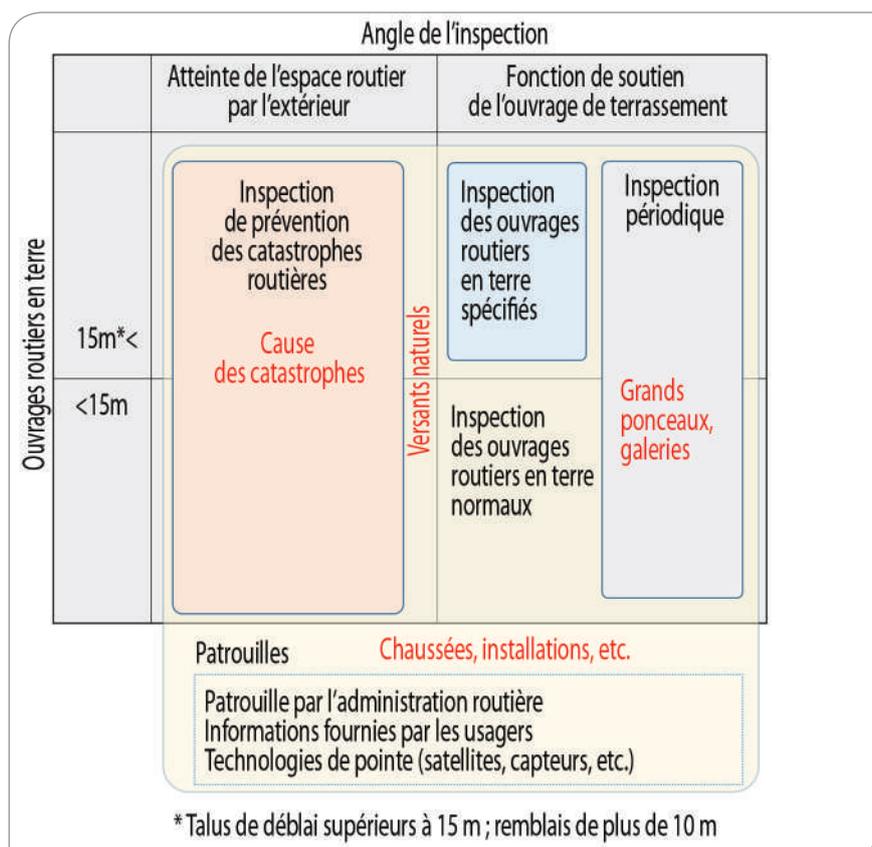


Illustration 4 - Schéma de responsabilité des inspections

au cours d'une seule inspection. Il est, par conséquent, plus efficace de procéder à des inspections peu précises mais fréquentes que d'appliquer ponctuellement des méthodes de haute précision exploitant une technologie de pointe. Ainsi, les patrouilles jouent un rôle clé en formant la première étape de détection de déformations.

Au Japon, des efforts sont déployés pour développer une technologie permettant d'inspecter de vastes zones à l'aide de drones et de satellites. Cependant, l'adoption et le fonctionnement de ces technologies de pointe devraient réclamer un niveau élevé d'expertise technique et un budget colossal, freinant leur introduction. Dans certaines zones rurales du pays, où les ressources financières sont limitées, les administrations routières ont conclu des accords avec des bureaux de poste, des sociétés de livraison, des exploitants de bus et de taxis et d'autres entreprises de transport afin de sous-traiter les patrouilles.

### Priorité au maintien de la circulation routière

Du fait de sa faible superficie et de son paysage majoritairement montagneux, le Japon porte une attention particulière à la limitation des dégradations dans les tronçons de terrassement afin de préserver le peu de surface de circulation routière. Dans les pays où l'occupation des sols est relativement peu contraignante, les mesures visant à limiter l'impact des catastrophes sur la circulation routière sont considérées comme plus efficaces que celles destinées à prévenir les catastrophes.

Pour éviter les décès directement imputables aux catastrophes, il serait judicieux de mettre en place un système de contrôle anticipé du trafic reposant sur les précipitations et d'autres données sur les tronçons pour lesquels des statistiques antérieures prédisent une forte probabilité de catastrophe. Les catastrophes dans les tronçons de terrassement sont rarement dues à la tenue des ouvrages eux-mêmes, mais résultent plutôt de la survenue

des dégradations dans l'espace routier traversé par les tronçons. La topographie et la géologie à l'origine de ces catastrophes sont souvent très étendues, parfois sur plusieurs kilomètres. Face à ces catastrophes, les contre-mesures matérielles ne sont pas toujours rentables, parce qu'elles sont coûteuses et que les dégradations subies par un seul site d'une vaste zone peuvent paralyser tout le réseau. En termes d'efficacité, la méthode optimale consiste à éviter les pertes directes de vies humaines et de biens par l'application anticipée de restrictions de circulation en fonction des chutes de pluie et d'autres facteurs, tout en gérant la catastrophe dès qu'elle se produit.

### Examen continu du système

Il est raisonnable d'instaurer une phase d'observation de l'évolution des caractéristiques des ouvrages de terrassement. Cependant, la période d'observation est susceptible d'être longue, et la surveillance continue, fastidieuse pour l'administration routière. Par conséquent, lors de l'introduction du concept de phase de surveillance transitoire, il est important de prendre en compte les critères d'entrée ET de sortie de la phase. Au Japon, l'inspection des zones sous observation suite à des inspections de prévention des catastrophes routières est devenue un véritable problème, car ces dernières ont été examinées après des accidents et des catastrophes majeurs alors que le système a été conçu pour privilégier l'identification des zones dangereuses. Ainsi, le système ne peut pas sortir de la phase d'observation sans que des mesures matérielles d'ampleur ne soient prises pour les zones dangereuses identifiées.

## CONCLUSION

Cet article présente les stratégies de gestion des tronçons de terrassement au Japon et aborde les éléments à prendre en compte lors du transfert de la technologie japonaise à l'international. Les tronçons de terrassement se caractérisent par une incertitude nettement supérieure à celle des ponts et autres ouvrages, compliquant l'établissement de normes de gestion numériques quantitatives. C'est pourquoi les responsables routiers doivent envisager l'allocation optimale de ressources humaines et financières limitées et tenir compte de la survenue de diverses catastrophes et de l'environnement du trafic routier de chaque pays. L'allocation des ressources est fortement influencée par les avis techniques, ainsi que par des facteurs socio-économiques. Par exemple, dans les pays développés où les coûts de main-d'œuvre sont relativement élevés, il est important de limiter ces derniers tout en maintenant la précision des inspections. Par contre, dans les PRFI où les coûts de main-d'œuvre sont assez faibles, si les projets de travaux publics jouent un rôle majeur dans la répartition des richesses nationales, il est possible d'envisager d'affecter davantage d'effectifs aux inspections.

Nous espérons que ce document aidera les responsables routiers de différents pays à prendre des décisions stratégiques face aux catastrophes naturelles.#

# Approche expérimentale d'estimation du CBR / module global de sols de fondation renforcés par des géocomposites et d'utilisation du graphique de conception d'Austroroads

Chaminda Gallage, Kasun Wimalasena et Shiran Jayakody,

École de génie civil et environnemental, Faculté d'ingénierie, Université de technologie du Queensland (QUT),

Jothi Raman U Jam, Département des Transports et des routes principales, Queensland,

Amir Shahkolahi, Global Synthetics Pty Ltd, Brisbane, Queensland,

Jinjiang Zhong, Conseil municipal de Logan (LCC), Raymond Chow, Polyfabrics Pty Ltd, Brisbane

Tous du Queensland, Australie

Illustrations © Auteurs

Lors de la conception de chaussées et plateformes de construction, le sol de fondation meuble complique le travail des ingénieurs en géotechnique / chaussées car son module et sa portance ne répondent pas aux exigences requises pour supporter la charge de référence. Ce phénomène est accentué lorsque ce sol est constitué d'argile gonflante, très répandue dans le Queensland, en Australie. Pour y remédier, on recourt fréquemment au remplacement du sol de fondation, à un traitement à la chaux et à l'épaississement de la couche granulaire recouvrant le sol de fondation. Cependant, ces méthodes de traitement du sol de fondation posent de nombreux problèmes environnementaux et financiers, car elles exploitent des ressources naturelles épuisables et produisent des poussières et des gaz à effet de serre. Les études sur les déchets de construction et de démolition suggèrent alors d'employer des granulats de béton concassé (GBC) et des revêtements d'asphalte récupérés (RAR) à la place du gravier naturel, tandis que des recherches sont en cours sur l'utilisation de déchets, tels que les cendres volantes, les cendres d'incinération et les boues.

Les géosynthétiques apparaissent comme une solution réalisable et durable pour un certain nombre d'applications de génie civil en raison de leurs avantages en termes de coûts, de réduction du temps de construction et de durabilité globale. Les géogrilles servant à améliorer le sol de fondation meuble permettent notamment d'augmenter la portance, de réduire l'épaisseur de la couche de base requise et d'allonger la durée de vie d'une chaussée. Les géotextiles et les géogrilles sont les géosynthétiques privilégiés pour les chaussées.

La présente étude examine la performance des sols de fondation à enchâssement de géocomposites sous charge monotone grâce à une série d'essais de charge à la plaque

statique de sols de fondation réalisés dans un caisson modèle instrumenté de 1 m x 1 m x 1,20 m à l'aide de matériaux disponibles localement (sol de fondation en terre noire et gravier de type 2.1). Deux produits géocomposites disponibles sur le marché australien de la construction routière, deux états de sol de fondation in situ (CBR de 2,5 et 1,0) et quatre épaisseurs de couche de forme (100, 200, 300 et 400 mm) ont été utilisés dans le cadre de cette étude expérimentale. Les résultats de charge-déformation de ces essais ont servi au calcul du module de déformation vertical global (Ev) de chaque structure de sol de fondation. Puis, les effets de l'épaisseur de la couche granulaire, de la rigidité initiale du sol de fondation (CBR) et du type de géocomposite sur le module global de sol de fondation stabilisé ont été

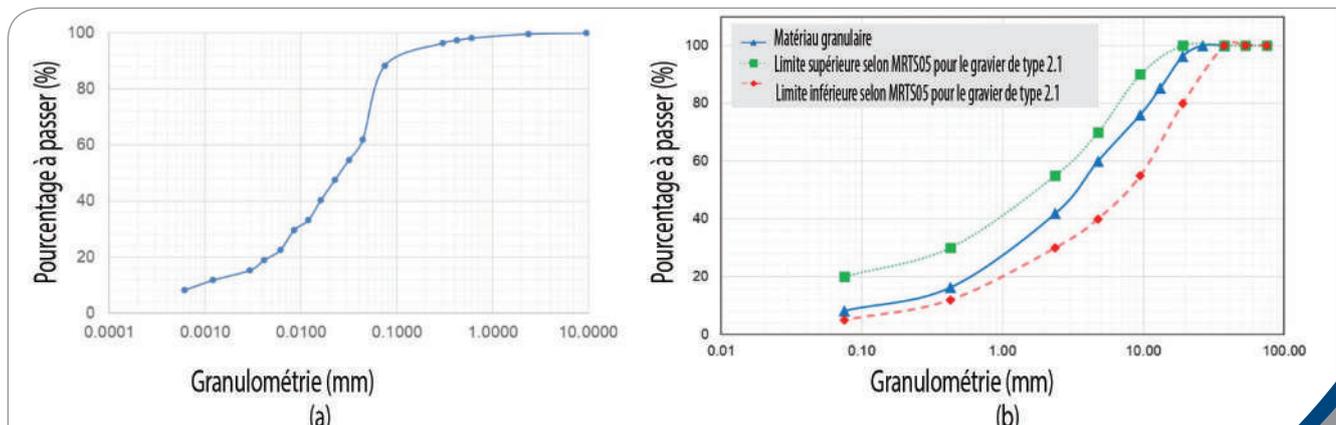


Illustration 1 - (a) Granulométrie du sol de fondation, (b) Granulométrie du matériau granulaire

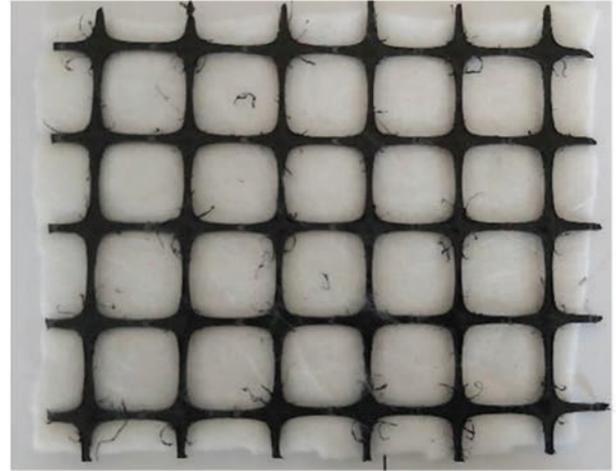
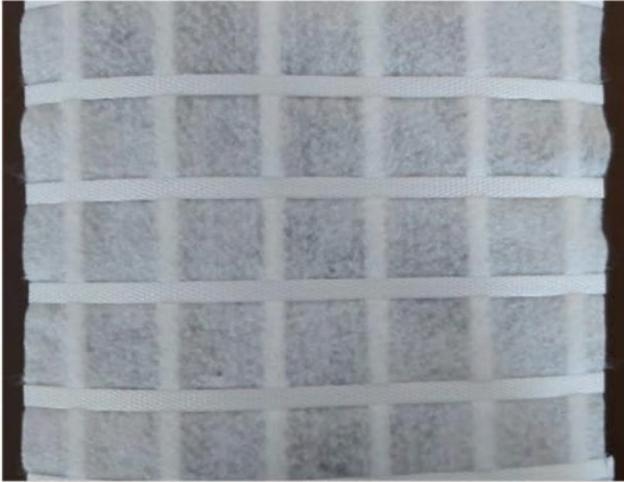


Illustration 2 - Produits géocomposites utilisés dans l'étude

quantifiés et discutés. Un graphique a ensuite été élaboré à des fins d'obtention de l'épaisseur de la couche de forme à enchâssement de géocomposites lorsque le module / CBR in situ et le module / CBR de conception sont connus. Enfin, un exemple de conception a été proposé, montrant comment utiliser le graphique de conception de chaussée existant d'Austroroads pour concevoir une structure de chaussée sur le sol de fondation à enchâssement de géocomposites et quantifier les avantages (économie de gravier) offerts par le recours à des géosynthétiques pour améliorer le sol de fondation meuble.

## MATÉRIAUX DES ESSAIS

### Sol de fondation

Un sol naturel expansif (terre noire) prélevé sur un site de construction routière du Queensland, en Australie, a été utilisé pour créer des sols de fondation meubles dans le caisson modèle. La granulométrie, les propriétés de compactage, la masse volumique des grains et les limites d'Atterberg du sol ont été testées conformément aux méthodes d'essai standards australiennes. *L'illustration 1(a)* montre la granulométrie du sol, et le *tableau 1* synthétise les résultats d'autres essais de base du sol.

### Matériau granulaire

Un type de roche concassée, classée comme gravier de type 2.1 selon MRTS05 (spécifications de graves non traitées du Département des transports et des routes principales (DTMR) du Queensland), provenant d'une carrière du Queensland, en Australie, a été utilisé comme couche de forme dans les essais du modèle de chaussée de l'étude. La granulométrie, les propriétés de compactage et le poids spécifique du gravier ont été testés conformément aux méthodes d'essai standards australiennes. *L'illustration 1(b)* montre la granulométrie du matériau testé, avec les limites supérieure et inférieure spécifiées par le DTMR pour les matériaux routiers granulaires de type 2.1.

## Géocomposites

Dans l'étude, deux produits géocomposites (composites 1 et 2) disponibles dans le commerce, en Australie, ont été employés. Les deux composites associent une géogrille biaxiale à un géotextile non tissé, le composite 1 contenant un géotextile encapsulé dans des nervures soudées, et le composite 2, un géotextile collé d'un côté de la géogrille. *L'illustration 2* présente les produits géocomposites.

## MÉTHODOLOGIE

### Caisson modèle de chaussée et préparation des échantillons

Un caisson en acier, aux dimensions internes de 1 m (longueur) x 1 m (largeur) x 1,20 m (hauteur), a été utilisé pour préparer des structures modèles de sol de fondation pour les essais de charge à la plaque réalisés en laboratoire. *L'illustration 3* présente une photo et un schéma du caisson modèle. Pour chaque essai, une couche de sol fondation de 500 mm d'épaisseur a été préparée par compactage en 10 sous-couches de même épaisseur. Pour qu'il atteigne un CBR de 2,5, le sol de fondation a été mélangé à de l'eau jusqu'à obtention d'une teneur en eau de 46,5 % et laissé dans des conteneurs fermés hermétiquement pendant 7 jours pour l'équivalisation de l'humidité. Ensuite, la masse de terre nécessaire pour que chaque sous-couche (1 m x 1 m x 0,05 m) présente une masse volumique sèche de 1,12 g/cm<sup>3</sup> a été versée dans le caisson et tassée manuellement à l'aide d'une dame de 20 kg (20 cm x 20 cm) jusqu'à obtention de l'épaisseur requise. La surface de chaque sous-couche compactée a été grattée avant ajout de la terre destinée à la couche suivante afin de préserver l'intégrité de la couche. Une procédure similaire a été appliquée pour la réalisation d'une couche de sol de fondation d'un CBR de 1,0, avec un sol d'une teneur en eau de 50 % permettant d'atteindre une masse volumique sèche de 1,04 g/cm<sup>3</sup>. Comme le montrent les *illustrations 3(a) et 4(a)*, trois cellules manométriques (de 100 mm de diamètre chacune) ont été

enfouies à 50 mm sous la surface du sol de fondation.

Un géocomposite (composite 1 ou 2) a été placé sur le sol de fondation lorsqu'une configuration d'essai renforcée était nécessaire. Une couche de gravier de 100, 200, 300 ou 400 mm a ensuite été compactée sur le sol de fondation (renforcé ou non). Le gravier a été compacté en sous-couches de 50 mm d'épaisseur jusqu'à obtention d'une masse volumique sèche de 2,3g/cm<sup>3</sup> pour une teneur en eau de 5,5 %. La masse de gravier nécessaire à chaque sous-couche a été versée et répartie uniformément avant utilisation du vibrocompacteur pour l'obtention de l'épaisseur requise. Comme pour la préparation du sol de fondation, la surface de la sous-couche de gravier compactée a été grattée avant ajout du gravier destiné à la sous-couche suivante afin d'éviter le décollement entre les couches. Comme le montre l'illustration 4(b), quatre transducteurs différentiels variables linéaires (LVDT) ont été installés pour mesurer la déformation de la surface pendant la charge.

### Charge et interprétation des données

Pour atteindre les objectifs de l'étude, 23 modèles de sol de fondation réalisés dans le caisson modèle de chaussée ont été testés. Chacun de ces modèles a été soumis à un essai de charge monotone à la plaque, à raison de 1 mm/min via une plaque d'acier de 200 mm de diamètre et 25 mm d'épaisseur (illustration 4(b)), à l'aide d'un actionneur hydraulique d'une capacité de charge de 250 kN. Deux cycles de charge ont été effectués. Au cours du premier cycle, la charge a été augmentée pour atteindre une contrainte verticale de 550 kPa (charge/surface de la plaque de charge) ou une déformation verticale de 5 mm, puis réduite jusqu'à ce que la contrainte soit nulle. La charge a été réappliquée jusqu'à atteindre la portance ultime du sol de fondation. L'illustration 5 présente une courbe de contrainte-déformation type des essais de charge à la plaque menés sur les modèles de sol de fondation de l'étude.

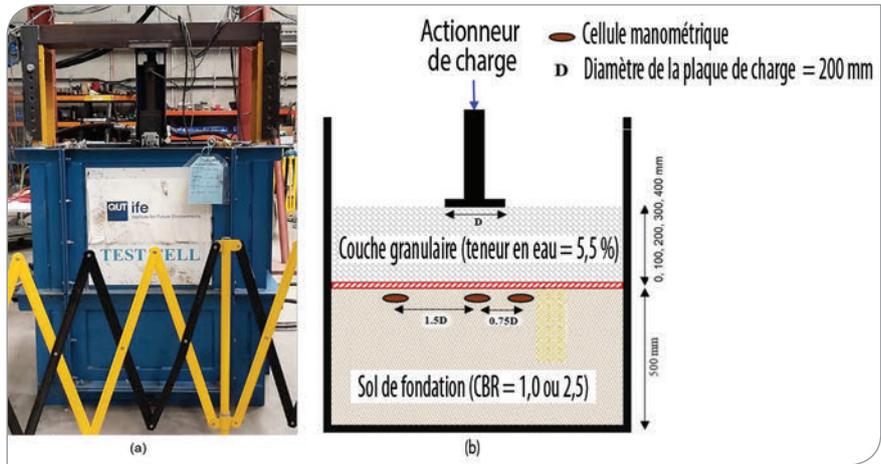


Illustration 3 - (a) Photo du caisson modèle, (b) schéma du modèle en coupe

Comme le montre l'illustration 5, la courbe contrainte-déformation du second cycle de charge jusqu'à la valeur de contrainte maximale du premier cycle de charge a été utilisée pour le calcul du module de déformation ( $E_{V2}$ ) à l'aide de l'équation 1. Dans l'étude,  $E_{V2}$ , qui présente une forte corrélation linéaire avec les valeurs CBR des conditions initiales du sol de fondation, est employé pour quantifier l'effet de différents paramètres sur la stabilisation (amélioration) du sol de fondation, puis pour développer des graphiques de conception pour les sols de fondation à enchâssement de géocomposites et concevoir une structure de chaussée sur les sols de fondation stabilisés. Les analyses des valeurs de portance ultime, des contraintes mesurées sous la surface et des déformations à la traction dans les géocomposites ne s'inscrivent pas dans le cadre de l'étude et seront abordées dans des publications ultérieures.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

La courbe de contrainte-déformation de l'essai de charge à la plaque réalisé sur chaque modèle de sol de fondation a été utilisée pour le calcul du module de

$$EV_2 = 1.5 \times r \times \frac{0.7\sigma_{max} - 0.3\sigma_{max}}{s_2 - s_1}$$

où :  
 $E_{V2}$  = module de déformation  
 $r$  = rayon de la plaque de charge  
 $\sigma_{max}$  = contrainte maximale du premier cycle de charge  
 $s_1$  = déformation correspondant à 0,3 $\sigma_{max}$  de contrainte dans le second cycle de charge  
 $s_2$  = déformation correspondant à 0,7 $\sigma_{max}$  de contrainte dans le second cycle de charge

Équation 1 -



Illustration 4 - (a) Cellules manométriques dans le sol de fondation, (b) LVDT et charge à la surface

déformation  $E_{v2}$ . Ensuite, les valeurs des modules de déformation  $E_{v2}$  ont servi à la quantification et à la discussion des effets des géocomposites, des types de géocomposites et de l'épaisseur de la couche granulaire sur la rigidité globale (module de déformation  $E_{v2}$ ) du sol de fondation stabilisé. Le ratio d'amélioration du sol de fondation a ensuite été défini comme le rapport entre la valeur  $E_{v2}$  du sol de fondation stabilisé et celle du sol de fondation initial (in situ). Les ratios obtenus pour les sols de fondation stabilisés avec des géocomposites ont été relevés en fonction de l'épaisseur de la couche de gravier (pour les CBR de 1,0 et 2,5 du sol de fondation initial (in situ)) aux fins du développement de graphiques de conception pour ces types de sols. Enfin, l'application des graphiques de conception développés a été démontrée pour souligner les avantages durables, économiques et environnementaux de l'utilisation des géocomposites dans l'amélioration de la rigidité des sols de fondation meubles.

Les géocomposites contribuent à améliorer le module global du sol de fondation stabilisé en imposant des contraintes latérales aux particules granulaires en contact avec eux et en accentuant les effets de la membrane de tension. Ils doivent être soumis à une déformation à la traction suffisante pour activer ces mécanismes. À mesure que l'épaisseur de la couche granulaire augmente sur le géocomposite, la contrainte imposée à la géogrille diminue, ce qui limite le développement de la déformation à la traction du géocomposite nécessaire à l'activation de ses mécanismes de stabilisation. La théorie élastique permet de partir du principe que la contrainte verticale dans le sol, sous une zone de charge circulaire de diamètre  $D$ , correspond à environ 30 % de la contrainte de surface à une profondeur égale à  $D$ . Ainsi, lorsque la couche granulaire au-dessus du géocomposite mesure 400 mm (deux fois le diamètre de la plaque de charge), on peut supposer que la contrainte imposée est nulle à la profondeur du géocomposite, d'où l'absence de développement d'une déformation à la traction dans le géocomposite requise

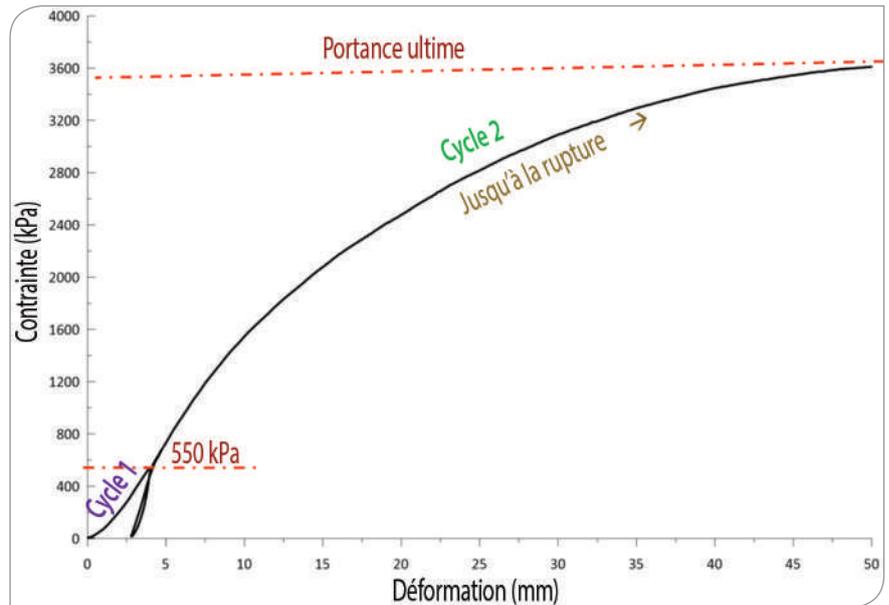


Illustration 5 - Courbe de contrainte-déformation d'un essai de charge à la plaque type mené sur un modèle de sol de fondation

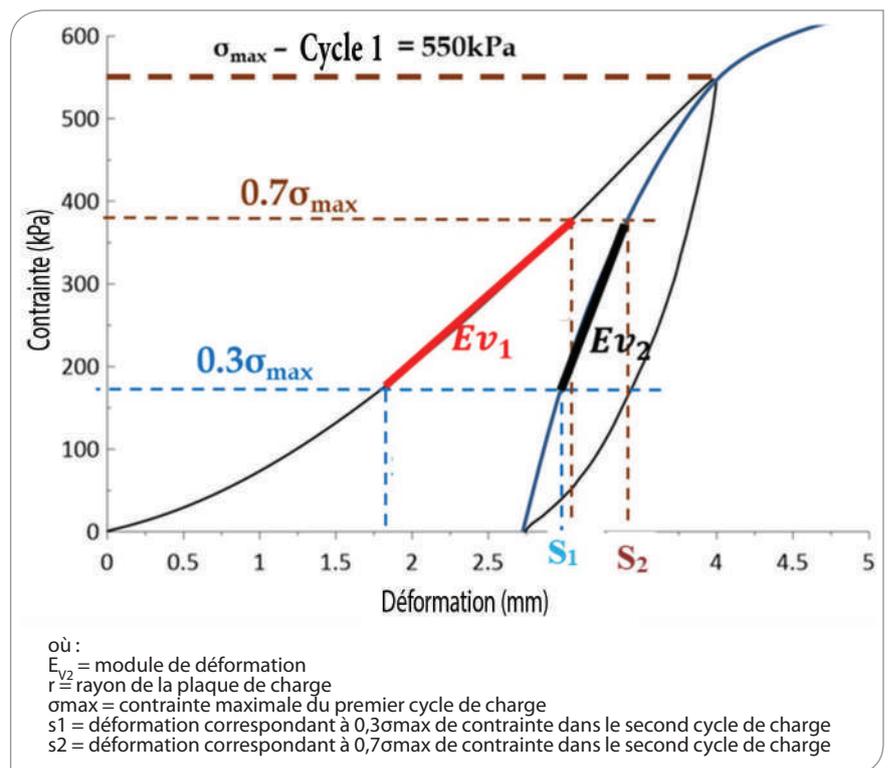


Illustration 6 - Paramètres de calcul d' $E_{v2}$

pour activer ses mécanismes de stabilisation. Par conséquent, lorsque l'épaisseur de la couche granulaire est d'au moins 400 mm, le géocomposite ne peut pas contribuer à améliorer le module global du sol de fondation stabilisé.

## CONCLUSION

Dans le cadre de la présente étude, il a été réalisé, en laboratoire, une série d'essais de charge monotone à la plaque sur des modèles de sol de fondation créés sous la forme de systèmes de sol à deux couches, l'une d'argile et l'autre granulaire (avec et sans enchâssement de géocomposites). Les résultats de ce travail expérimental



ont été exploités aux fins du calcul du module de déformation  $E_{v2}$ , puis ce module a été utilisé pour quantifier les effets du type de géocomposite, de l'épaisseur du gravier et de l'enchâssement de géocomposites sur la stabilisation du sol de fondation meuble, ce qui a permis d'élaborer un graphique de conception applicable à la stabilisation d'un sol de fondation meuble ( $1,0 < \text{CBR} < 2,5$ ) par ajout, au-dessus, d'une couche de gravier à enchâssement de géocomposites. L'application du graphique de conception a été démontrée à l'aide d'un exemple. La réalisation, à partir du graphique de conception de chaussées granulaires d'Austroroads, d'une structure de chaussée sur le sol de fondation stabilisé par des géocomposites a été présentée afin d'illustrer l'avantage (économie de gravier) offert par l'enchâssement de géocomposites en termes de stabilisation du sol de fondation. Les résultats de l'étude ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'augmenter de 2 à 8 fois le module d'un sol de fondation meuble en disposant une couche de gravier (roche concassée de type 2.1) de 100 à 400 mm d'épaisseur, compactée à sa masse volumique maximale.
- Le module peut encore être accru par enchâssement d'une couche de géocomposites à l'interface. Plus l'épaisseur de la couche granulaire est importante, plus la contribution des géocomposites au module diminue. Ainsi, une couche de gravier de 200 mm d'épaisseur maximum peut être considérée comme la plus efficace pour améliorer le module.
- Le graphique de conception développé peut être exploité pour la stabilisation d'un sol de fondation meuble ( $1,0 < \text{CBR} < 2,5$ ) afin d'obtenir un CBR / module de conception.
- Le graphique de conception proposé permet de réduire de plus de 20 % l'épaisseur de la couche granulaire non traitée requise lorsqu'un sol de fondation meuble est stabilisé à l'aide de géocomposites à l'interface.

L'application du graphique de conception développé doit se limiter à un sol de fondation meuble d'un CBR in situ de 1,0 à 2,5 et à une roche concassée de type 2.1, compactée à sa masse volumique sèche maximale, en tant que couche de gravier à enchâssement de géocomposites. Cependant, la méthodologie convient à l'élaboration de graphiques similaires pour différents états de sol de fondation et types de gravier.#



# Une plateforme de capteurs en ligne au service de la résilience des pentes de terre en Thaïlande

Auckpath Sawangsuriya, Harutus Phoban et Attasit Sawatparnich, Département des autoroutes, Apiniti Jotisankasa, Département de génie civil, Faculté d'ingénierie, Université Kasetsart, Thaïlande

Illustrations © Auteurs

Les terrains montagneux et accidentés de la plupart des régions tropicales, comme la Thaïlande et les pays de l'ANASE, présentent des sols résiduels et des pentes de roches altérées. Ces pentes de terre sont souvent dans un état non saturé, caractérisé par une tension interstitielle négative ou une succion matricielle. L'existence d'une succion matricielle est positive en raison de son effet bénéfique sur la résistance au cisaillement des sols non saturés, augmentant la stabilité des pentes. Cependant, lorsque les pluies s'infiltrent dans la pente, la tension interstitielle augmente et la succion matricielle diminue, ce qui réduit la stabilité de la pente. Souvent aléatoire et difficilement prévisible, ce phénomène, communément appelé rupture de pente induite par les précipitations, constitue l'une des catastrophes naturelles les plus destructrices.

Une hausse de la fréquence des ruptures de pente a été signalée en Thaïlande, en partie à cause du changement climatique, de pluies intenses sur une courte durée, de longs épisodes pluvieux et du développement rapide d'infrastructures ne tenant pas compte de l'évolution des conditions écologiques et hydrologiques des versants naturels. Sur le réseau routier thaïlandais, près de 50 % des ruptures de pente sont liées à une érosion sévère découlant d'un dépassement de la capacité du drainage et du sous-drainage, puis à un glissement peu profond. Face à ces préoccupations, il devient nécessaire de recourir à des capteurs en ligne pour surveiller plusieurs variables relatives au mouvement des pentes critiques, telles que la tension interstitielle, l'humidité et la déformation du sol, les précipitations, etc. L'Internet des objets (IdO) a été progressivement accepté par les agences des routes, les exploitants de transports routiers, les autorités locales et municipales, les populations locales, les chercheurs et les décideurs politiques aux fins de la prise d'une décision appropriée et d'une intervention immédiate de rectification de l'instabilité des pentes.

Dans cette étude, quatre sections d'essai ont été construites le long des pentes de déblai et de remblai des autoroutes nationales du nord de la Thaïlande, bien connu pour ses terrains montagneux et vallonnés et ses attractions

touristiques, et souvent à risque de glissements de terrain sous ses pentes naturelles et façonnées par l'Homme. Une série de capteurs de surveillance en ligne et d'appareils de terrain de type capteurs de teneur en eau du sol, piézomètres, tensiomètres, inclinomètres, clinomètres, pluviomètres, points de tassement, système d'acquisition de données et plateforme IdO, ont été déployés sur chaque site afin de collecter simultanément les données de mesure de terrain dans les conditions climatiques tropicales de la Thaïlande.

## TECHNOLOGIE DE GÉNIE BIOLOGIQUE DES SOLS ET SYSTÈME DE SURVEILLANCE DES PENTES

### Technologie de génie biologique des sols

Pour l'ingénierie des pentes routières thaïlandaises, la technique de génie biologique des sols implique l'utilisation de diverses matières végétales (boutures et tuteurs vivants, semis, herbe de vétiver...) et de structures permanentes (telles que des murs gravitaires en béton et des sacs et matelas géosynthétiques) et temporaires biodégradables (comme des clôtures / grilles en bambou, des filets de jute ou de l'écorce de coco). Ces matériaux sont compatibles et se complètent, comme le montre l'illustration 1. Les ouvrages d'art atteignent des niveaux de performances maximums dans leur état initial, mais ceux-ci se dégradent généralement avec le temps, à des rythmes différents. Les matières végétales, elles, réclament une période de croissance plus ou moins longue avant d'offrir une efficacité optimale. Ainsi, une structure biodégradable de type clôture / grille en bambou ou couche de sol naturel, contribuerait à préserver les plantes en début de croissance. Au moment de la dégradation des structures, les plantes récupéreraient leurs rôles stabilisateurs et restaureraient les conditions écologiques du site. Récemment, des idées plus innovantes, telles qu'un système de barrière capillaire exploitant un sol amendé au biochar (illustration 2), ont également été expérimentées sur des sections de pente d'essai en Thaïlande.

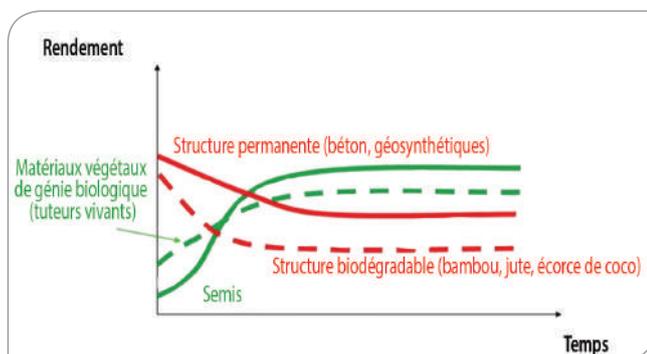


Illustration 1 - Performances conceptuelles de la technique de génie biologique exploitant des matériaux végétaux et des ouvrages d'art

**SYSTÈME DE SURVEILLANCE DES PENTES**

Différents types de capteurs ont été déployés, tels que des piézomètres et des tensiomètres pour mesurer les tensions interstitielles positives et négatives, des capteurs d'humidité du sol, des clinomètres et inclinomètres pour jauger les mouvements du sol et la déformation interne, et des augets basculants pour évaluer l'intensité des chutes de pluie. Chaque variable a ensuite été transmise à la technologie de cloud basée sur le Web (IdO) (illustration 3), au niveau de laquelle l'acquisition des données et l'analyse technique ont permis d'identifier les risques par rapport aux seuils et critères pré-spécifiés, par exemple l'enveloppe pluviométrique critique, le coefficient de sécurité en cours et le niveau de danger global.

**Inclinomètre / clinomètre**

Les mouvements latéraux du sol ont été surveillés à l'aide d'un clinomètre, et ses mouvements de surface et internes, avec un inclinomètre. Les deux types de capteurs étaient couplés à un accéléromètre de haute précision afin de mesurer le degré d'inclinaison par rapport à l'axe vertical à une sensibilité de 140 mV/deg. Des inclinomètres étaient fixés in situ dans le forage pendant la durée de la mesure, tous les mètres environ. Le clinomètre a été attaché à une barre d'acier enfoncée à environ 70 cm de la surface de la pente. Alors que le clinomètre permettait d'identifier le risque de glissement superficiel, l'inclinomètre, lui, convenait davantage à la détection du mouvement d'une rupture profonde.

**Pluviomètre**

Dans le cadre de cette étude, un pluviomètre à augets basculants d'un intervalle de lecture de 5 minutes et d'une précision de 0,2 mm par comptage de pluie, a été utilisé. La plateforme de cloud est parvenue à calculer et a généré en temps réel les chutes de pluie quotidiennes et des trois jours précédents, qui ont ensuite été comparées à l'enveloppe pluviométrique critique, comme le montre l'illustration 4, aux fins de l'estimation de la probabilité de rupture de la pente en temps réel.

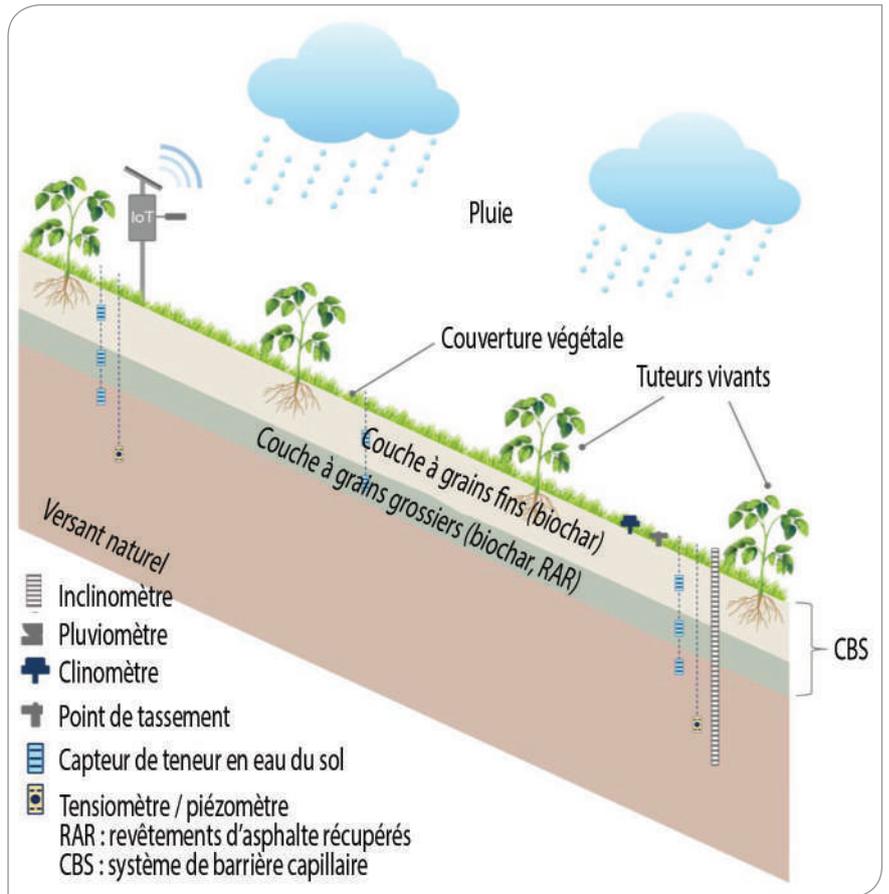


Illustration 2 - Système de barrière capillaire (CBS) et appareils de terrain

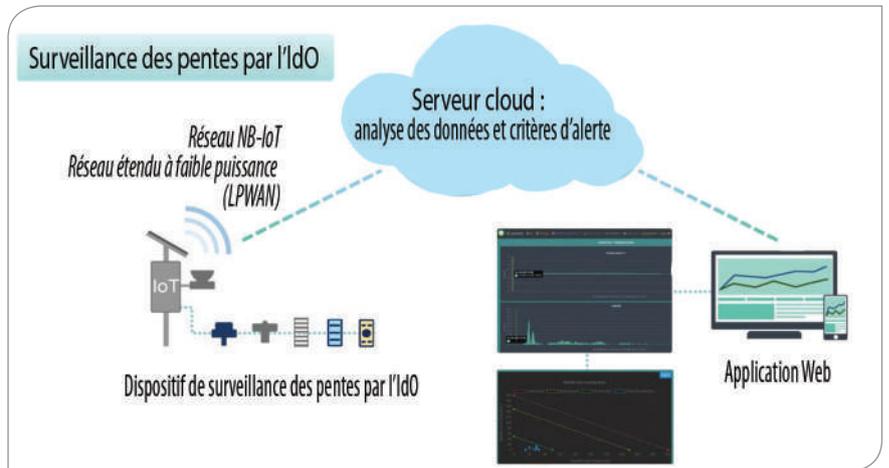


Illustration 3 - Système de surveillance des pentes par l'Internet des objets (IdO)

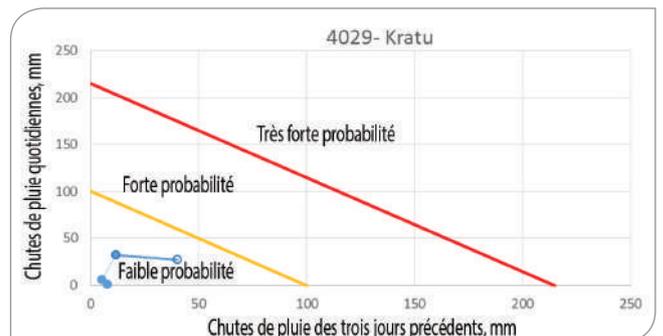


Illustration 4 - Enveloppe pluviométrique type utilisée pour estimer la probabilité de rupture de la pente



### Capteur de teneur en eau du sol

Le capteur de teneur en eau du sol a mesuré la constante diélectrique du sol, qui a été mise en relation avec sa teneur en eau volumétrique (sans dimension,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ). La valeur obtenue (en volts) a été calibrée à l'aide de la teneur en eau volumétrique du sol. La teneur en eau représentait l'humidité du sol, correspondant également à sa tension interstitielle et à sa succion, c'est-à-dire la courbe de rétention de l'eau dans le sol.

### Tensiomètre et piézomètre

Dans la présente étude, le tensiomètre de l'Université Kasetsart (KU) a servi à mesurer la tension interstitielle positive et négative (par ex. la succion du sol). Ce type d'appareil est très important car la pente du sol peut être non saturée, la tension interstitielle devenant négative la plupart de l'année, mais positive lors de longs épisodes pluvieux, ce qui peut déclencher le mouvement et la rupture de la pente. La mesure de la pression interstitielle et des modèles

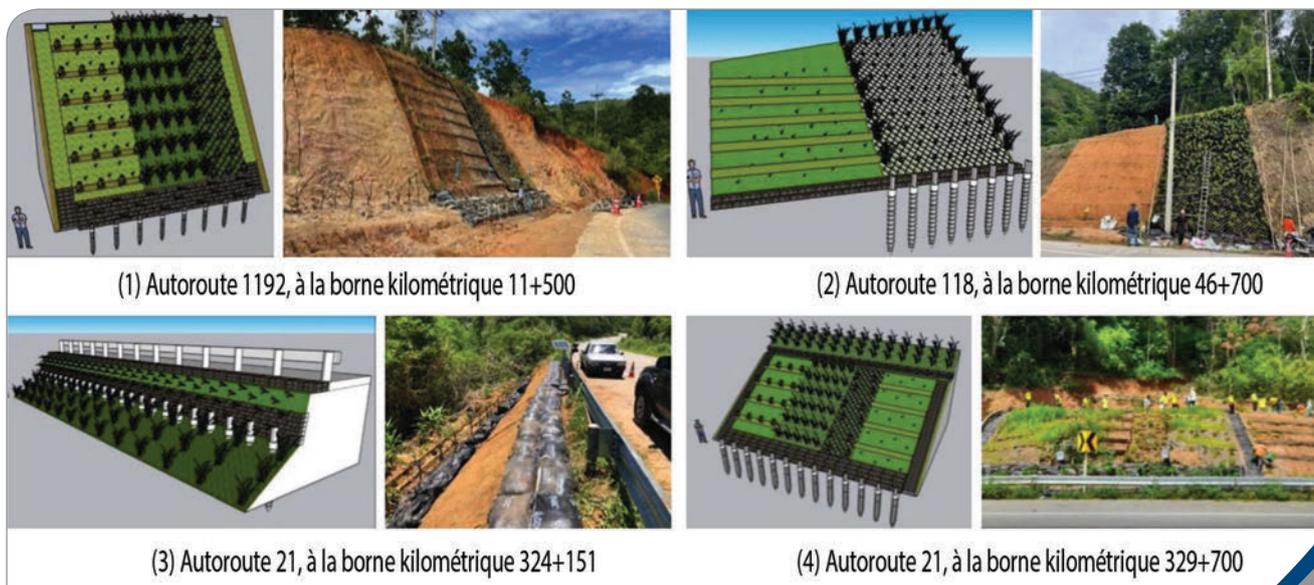


Illustration 5 - Sections d'essai sur le terrain



Illustration 6 - Photos de la section d'essai (4)

de stabilité de pentes (tels que le modèle de pente infinie et l'analyse de la stabilité calculée précédemment) ont permis de calculer en temps réel la contrainte effective du sol, la résistance au cisaillement et le coefficient de sécurité, qui ont ensuite été reportés sur la plateforme en ligne.

### SITES EXPÉRIMENTAUX DE SURVEILLANCE EN LIGNE

#### Description des sections d'essai

En juillet 2022, quatre sections d'essai (illustration 5) ont été entièrement construites le long des pentes de

déblai et de remblai des autoroutes nationales du nord de la Thaïlande. Ces sites expérimentaux ont été sélectionnés en raison de leurs caractéristiques géographiques et climatiques tropicales. Les informations topographiques et hydrogéologiques ont également été explorées à l'aide de levés visuels, par UAV (drones) et de



Illustration 7 - Captures d'écran de la plateforme RRD interactive de surveillance des pentes en ligne

résistivité, du suivi des eaux souterraines par mesure du son de l'air, ainsi que d'essais de pénétration. Mais surtout, une série de capteurs de surveillance en ligne et d'appareils de terrain ont été déployés sur chaque site afin de collecter simultanément les données de mesure de terrain dans les conditions climatiques tropicales de la Thaïlande.

Des systèmes similaires ont été employés pour ces sites, bien que leur cadre géologique diffère. Les pentes latérales et arrière ont été étudiées. Les pieux vissés (2,50 m de profondeur) ont été installés tous les mètres au pied (pour les cas de pente arrière n° 1a, 2 et 4) ou au sommet (pour les cas de pente latérale n° 1b et 3) de la pente. De la terre amendée au biochar a été utilisée pour la couche à grains fins de la barrière capillaire, du granulat d'asphalte recyclé (GAR) pour la couche à grains grossiers (site n° 1a) et du biochar à grains grossiers pour les sites n° 2 et 4. Des tuteurs de bougainvilliers vivants à racines ont été insérés entre des sacs de terre battue pour renforcer les pentes tout en améliorant l'esthétique des lieux.

### SYSTÈME INTÉGRÉ DE SURVEILLANCE DES PENTES EN LIGNE

L'illustration 7 montre des captures d'écran de la plateforme RRD (Round Robin Database) interactive de surveillance des pentes en ligne. Cette plateforme a notamment pour avantage de proposer des jumeaux numériques des appareils et d'afficher à l'écran des relevés en temps réel. La carte, elle, précisait l'emplacement des stations de surveillance. Il était également possible de calculer en temps réel la variation du coefficient de sécurité en fonction de la pluviométrie à partir des résultats de la surveillance de la tension interstitielle.

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les performances et l'efficacité de plusieurs couvertures végétales et CBS mis en place sur quatre sites expérimentaux ont été étudiées et

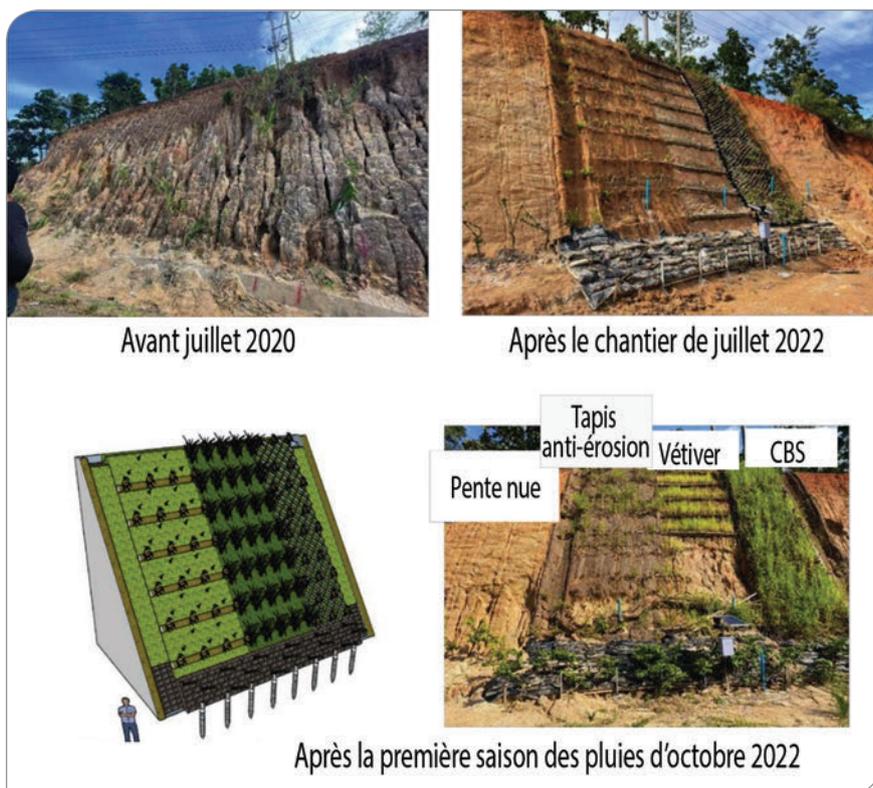


Illustration 8 - Résultats de l'inclinomètre en place sur la section 1b (autoroute 1192, à la borne kilométrique 11+500)

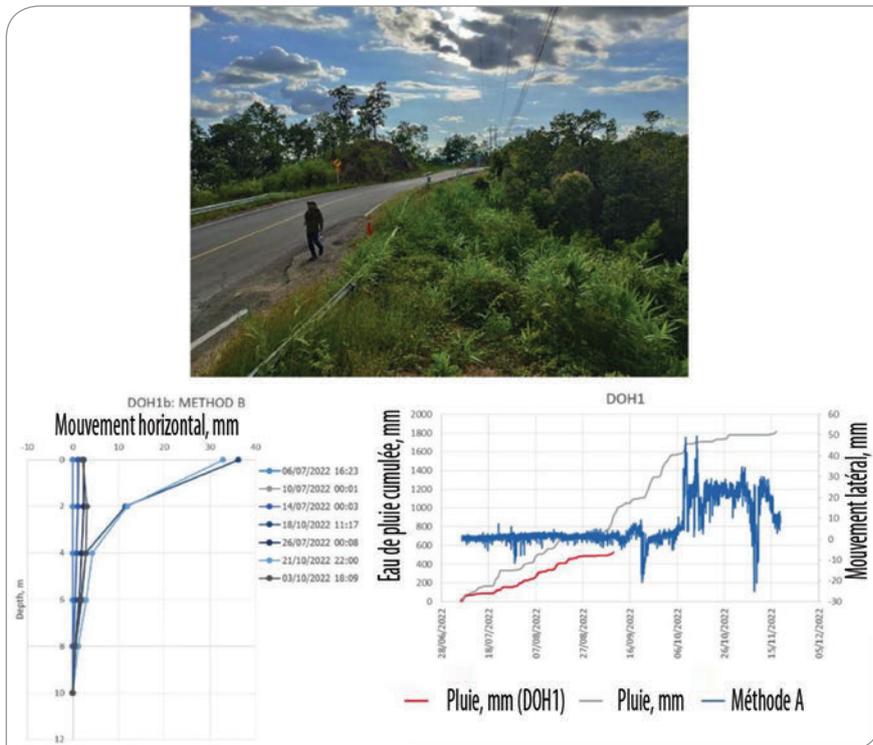


Illustration 9 - Résultats de l'inclinomètre en place sur la section 1b (autoroute 1192, à la borne kilométrique 11+500)

comparées compte tenu des résultats de la surveillance sur le terrain et du principe de la mécanique des sols non saturés. La tension interstitielle, ainsi que la teneur en eau et les mouvements du sol mesurés sur le terrain ont été contrôlés simultanément à l'issue du chantier. Les résultats

des expériences menées sur ces sections d'essai sont décrits ci-après.

*L'illustration 8* présente certains résultats types obtenus avec l'inclinomètre en place. Le mouvement latéral du sommet de la pente concordait bien avec les dégâts constatés sur le revêtement de chaussée, et sa vitesse, avec les précipitations accumulées. L'épaisseur totale du sol en mouvement était d'environ 3-4 mètres, ce qui correspondait à l'épaisseur du remblai de la route. Ce type de mouvement de pente peut être surveillé en temps réel et ainsi faciliter la gestion de la sécurité routière pendant les longs épisodes pluvieux ou la saison de la mousson.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La sévérité de l'érosion et de la rupture des pentes des autoroutes est croissante en raison du changement climatique et de la multiplication des infrastructures. Dans la présente étude, la plateforme de capteurs en ligne a été développée à des fins d'alerte précoce et d'évaluation de la performance des pentes issues du génie biologique. Une série de capteurs de surveillance en ligne et d'appareils de terrain de type capteurs de teneur en eau du sol, piézomètres, tensiomètres, inclinomètres, clinomètres, pluviomètres, points de tassement et systèmes d'acquisition de données et de surveillance des pentes par l'IdO, ont été déployés sur quatre sections d'essai situées le long des pentes de déblai et de remblai des autoroutes nationales du nord de la Thaïlande afin de collecter simultanément les données de mesure de terrain dans les conditions climatiques tropicales du pays. Il est possible d'en tirer les conclusions et recommandations suivantes :

- Les solutions naturelles de type couverture végétale, système de barrière capillaire et stabilisation par génie biologique, sont à la pointe en termes de coût, de résilience, de durabilité, de respect de l'environnement et d'esthétique pour le développement futur de la croissance verte du réseau autoroutier.
- La stabilisation par génie biologique a permis d'appliquer des pratiques d'ingénierie judicieuses conjointement à des principes écologiques intégrés favorisant la résilience et la durabilité des pentes. Elle a contribué à réduire les risques de glissement de terrain, à renforcer la résilience des infrastructures, à encourager une programmation efficace de l'entretien et à améliorer les plans d'urgence et d'intervention. Elle a également eu des bienfaits sur l'engagement communautaire et la sensibilisation sociale grâce à des ateliers, au transfert de connaissances et au renforcement des capacités.
- La prise de décision en temps réel fondée sur les données de la plateforme de capteurs en ligne s'est révélée utile et durable, favorisant l'amélioration de la résilience des pentes et le rétablissement plus rapide de la sécurité lors de longs épisodes pluvieux et/ou d'intenses chutes de pluie au cours d'événements extrêmes.
- Les administrations de transport routier, tant au niveau managérial qu'opérationnel, ont besoin d'outils de surveillance et d'évaluation en temps réel pour prendre des décisions critiques concernant la gestion de la circulation pendant les travaux de construction et de remise en état des infrastructures routières existantes.
- L'intérêt des secteurs public et privé pour l'investissement dans des projets d'instrumentation de terrain et de technologie de l'IdO, ainsi que le développement commercial de la plateforme de capteurs en ligne et la poursuite de sa mise en œuvre étaient nécessaires à plus grande échelle.
- Comprendre la conception résiliente, les stratégies d'adaptation et les méthodes d'évaluation, apprécier la vulnérabilité des infrastructures et surveiller les paramètres de performance compte parmi les facteurs clés de l'élaboration réussie d'une solution naturelle au service d'infrastructures durables, résilientes au climat.#

# Stabilisation du glissement de terrain de Galandroud en Iran

Alireza Chalekaee, Organisation iranienne d'entretien des routes et de transport, Succursale du Mazandéran, République islamique d'Iran

Illustrations © Auteur

Phénomènes naturels, les glissements de terrain sont de plus en plus fréquents ces dernières années. Dans la plupart des cas, ils provoquent des dommages considérables et irréparables aux ressources naturelles, routes et bâtiments. Chaque année, l'Iran en comptabilise plusieurs centaines, de différentes ampleurs et formes, sur son territoire. Les provinces du Nord, notamment le Mazandéran, subissent de nombreux glissements de terrain en raison de leurs conditions particulières en termes de géologie, de climat, d'eaux souterraines et de rapidité des changements d'occupation des sols, entraînant des pertes financières et humaines. Le 19 mars 2018, le village de Spiu, dans la région de Galandroud, a connu l'un des glissements de terrain les plus vastes du pays, aux dégâts colossaux.



Alireza Chalekaee

## GLISSEMENT DE TERRAIN DE SPIU

Le glissement de terrain de Spiu est survenu sur la route qui relie les villages de Spiu et Galandroud, dans la province du Mazandéran, en Iran. Le risque est élevé dans la région en raison des caractéristiques morphologiques, de l'instabilité des matériaux et de la présence de facteurs favorables. La plupart des glissements de terrain se produisant sur des pentes sont rotationnels ou mixtes. Parmi les principales formations instables de la région figure celle de Shemshak, qui se compose essentiellement de schiste et de marne et qui est responsable de l'instabilité des pentes causée par un drainage inadéquat. Dans le cadre de la présente étude, des géologues et des experts se sont rendus sur la zone de glissement à plusieurs reprises pour l'examiner.

## VISITE DU SITE ET IDENTIFICATION DE LA GÉOMÉTRIE DU GLISSEMENT DE TERRAIN

L'enquête sur site a permis de constater que ce glissement de terrain avait obstrué les sources et foncièrement modifié l'écoulement souterrain. La présence de fissures de traction en amont de la masse du glissement de terrain confirme l'importance du mécanisme de régression de ce dernier. Parmi les principaux facteurs contribuant aux glissements de terrain dans cette région figurent la perte de végétation, l'intrusion des eaux souterraines et les matériaux meubles. Une succession de fissures de traction et de sous-escarpements de 2 mètres de haut maximum a été observée, indiquant l'activité de la masse de glissement.

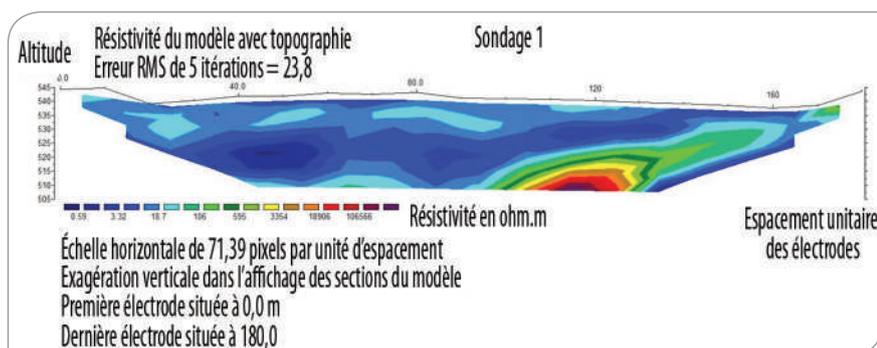


Illustration 1 - Données d'inversion des profils recueillis dans la zone du glissement de terrain du village de Spiu

L'étude de la géométrie et des circonstances de terrain du glissement a révélé que sa profondeur était faible le long de la route principale et à son pied et qu'elle commençait à s'accroître juste après la surface de séparation. Les marnes blanches argileuses, étanches à l'eau, constituent la majeure partie des matériaux déplacés au pied. Ce problème augmente la pression interstitielle et induit une déformation locale. Le pied de glissement résulte de l'accumulation des masses déplacées, et les masses soulevées, du glissement. Le creusement de tranchées sans opérations d'entretien contribue à aggraver les instabilités. Il est essentiel de contrôler les surfaces de glissement, mais également de créer des murs de soutènement dans la zone et d'utiliser des pieux pour arrêter les mouvements de terrain le long de l'axe.

Des dégâts et des déplacements colossaux peuvent être observés le long des pentes de Spiu, vers l'est, au-dessus du pied du glissement de terrain. Le processus régressif des glissements de terrain accroît la probabilité de déformation. Par ailleurs, les fuites d'eau en tout point du glissement de terrain témoignent de l'accumulation des eaux infiltrées et souterraines due à l'inefficacité du drainage de la terre. Les multiples ouvertures des fissures de traction

sont révélatrices de leur expansion et d'un retrait de terre, ce qui doit être rigoureusement traité. C'est pourquoi il est recommandé de construire un anneau de drainage en amont du glissement et dans la zone de l'escarpement principal.

## PHOTOGRAMMÉTRIE

Une technique de photogrammétrie exploitant un drone a été employée pour créer une carte de la zone du glissement. Il est crucial de déterminer la zone déformée par le mouvement de terrain pour identifier et caractériser les glissements de terrain. Une fois les fissures et fractures importantes localisées, des études sur le terrain et des images satellites et d'UAV (orthophotos) ont permis de repérer les principaux escarpements, sous-escarpements et déformations des limites du glissement de terrain.

La stabilisation des glissements de terrain repose essentiellement sur l'identification et la détermination de la géométrie de la surface des glissements, ainsi que des conditions d'humidité et d'eaux souterraines. Des études géophysiques ont donc été menées dans la zone touchée par le glissement de terrain du village de Spiu, dans la province du Mazandéran. La méthode géoélectrique a été appliquée, avec utilisation de réseaux pôle-dipôle et dipôle-dipôle. Les résultats ont été obtenus sur place grâce à la technique de résistivité électrique.

## MÉTHODE GÉOÉLECTRIQUE

Quatre profils dans la direction nord-sud et dans la masse de glissement ont été réalisés et évalués via deux réseaux pôle-dipôle et dipôle-dipôle. La résistivité électrique spécifique a été mesurée dans les quatre profils, chacun d'une longueur maximale de 200 mètres et d'un espacement de 10 mètres entre deux points successifs.

## INTERPRÉTATION BIDIMENSIONNELLE DES SECTIONS DE MODÈLE GÉOLOGIQUE RÉEL DES PROFILS ÉTUDIÉS

La résistivité électrique réelle de la Terre, déterminée par la solution inverse, fournit de nombreuses informations sur l'emplacement des structures souterraines. Les données d'inversion des profils recueillis dans la zone du glissement de terrain du village de Spiu sont présentées dans l'illustration 1. Des zones de faible résistivité sont repérées près de la surface de chaque section, ce qui est probablement dû à l'infiltration d'eau de surface et à la forte teneur en eau du sol. Ces régions à forte humidité relative dans les profondeurs des sections sont vraisemblablement les sites au niveau desquels l'eau s'échappe des sources situées en amont en raison de leur détournement ou de leur obstruction.

## ANALYSE DE LA STABILITÉ DE LA PENTE

L'analyse de la stabilité d'une pente, qu'elle soit naturelle ou façonnée par l'Homme, correspond au processus de régulation de sa sécurité. Cette régulation consiste à calculer les contraintes de cisaillement induites le long de la surface de glissement la plus critique et la plus probable et à les comparer à la résistance au cisaillement du sol. Dans l'examen de la stabilité de pentes de terre, il est fondamental de déterminer leur surface de glissement critique et de calculer le niveau de confiance associé. L'étude de stabilité dans la zone de glissement de Spiu a débuté par la sélection d'une section dans un état critique au milieu de la surface de glissement. Des études géotechniques antérieures menées dans la région ont été exploitées pour évaluer l'état interne du terrain et établir les paramètres géotechniques. Dans l'étude mentionnée précédemment, sept forages mécanisés d'une profondeur de 10 à 25 mètres ont été réalisés. Quatre forages, désignés BH1-L1, BH2-L2, BH4-L2 et BH3-L2, se trouvent à proximité de la zone d'étude, comme le montre l'illustration 2. Dans la zone du glissement, il a été découvert une séquence de limon et d'argile de différents degrés de plasticité, laissant deviner qu'un glissement s'est produit à la limite entre le limon et l'argile.

Les données tirées des forages ont permis de créer la coupe géologique présentée dans l'illustration 3.

Après résolution du modèle à l'aide des propriétés données, un coefficient de sécurité a été trouvé, indiquant que la surface du glissement de terrain se situe dans la partie inférieure et le pied du glissement. Il est nécessaire de déterminer la surface de glissement probable en examinant la sensibilité et en modifiant les paramètres spécifiés pour construire un modèle de glissement qui reflète les conditions dominantes. Modifier les paramètres effectifs dans les couches présentant un potentiel de glissement et mesurer la fissure de traction qui déclenche



Illustration 2 - Localisation des forages

le glissement nous permettra de localiser la surface de glissement la plus proche.

Pour obtenir une solution stabilisante, les propriétés finales des couches ont été déterminées en fonction des résultats de l'analyse de sensibilité. D'après les études, la présence d'eau et l'absence de drainage adéquat constituent les principales causes d'instabilité et d'apparition de glissements de terrain. Pour assurer la stabilité de la zone, la stratégie à adopter consiste donc à former un réseau de drainage approprié pour orienter et collecter les eaux de surface. En raison du caractère régressif du glissement de terrain, le plan de stabilisation doit également prévoir la pose de murs et de pieux afin de consolider le site et d'empêcher le déplacement du glissement de terrain.

## SOLUTION DE STABILISATION DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE SPIU

Les études géotechniques ont révélé que le limon, l'argile et de jeunes alluvions avec des couches de charbon interstratifiées étaient les principaux matériaux géologiques. Par ailleurs, le niveau des eaux souterraines dans quatre trous de forage varie de 2 à 3 mètres. L'étude géophysique a montré que la profondeur des eaux de surface et infiltrées allait d'une profondeur relativement faible à 4 mètres. En outre, de légères anomalies de résistivité géoélectrique dans des sections spécifiques de la masse de glissement indiquent la présence d'eau interne. La déviation des sources en amont en est probablement la cause. La profondeur de la couche aquifère profonde s'étend de 5 à 29 mètres. La plupart des projets doivent donc prendre en compte le drainage des eaux souterraines et d'infiltration. De plus, la zone doit être surveillée à l'aide d'UAV et de techniques GPS double fréquence avant et après la stabilisation. La mise en œuvre, par étapes, d'opérations d'entretien est un facteur crucial de réussite, permettant de limiter le mouvement des masses de glissement.

### Étape 1. Surveillance initiale de la zone de glissement (tâche préalable)

Il est indispensable de surveiller et de mesurer la vitesse de déplacement de l'ensemble de la masse du glissement de terrain avant d'entreprendre la moindre action dans la zone afin de réguler l'opération de stabilisation. Aux fins de cette tâche, des points fixes de surveillance seront définis par GPS double fréquence (précision millimétrique), en fonction des changements détectés lors des visites sur le terrain. Des UAV (précision centimétrique) surveilleront également la zone du glissement, ce qui permettra d'obtenir un modèle de variation de la surface.

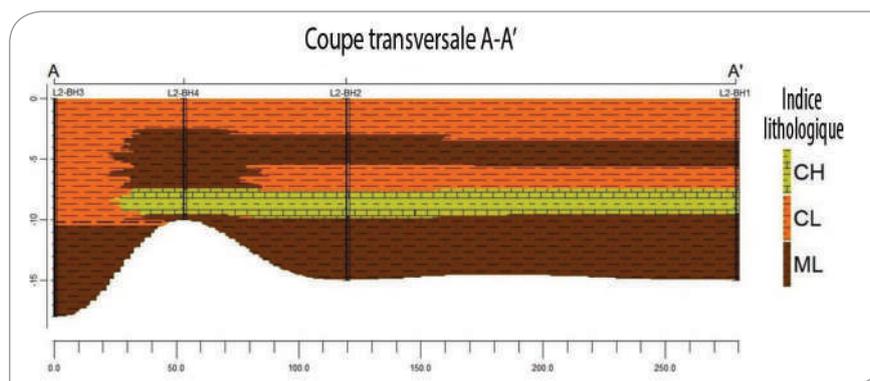


Illustration 3 - Coupe géologique dérivée des forages

### Étape 2. Réalisation de drainages peu profonds et profonds autour et à l'intérieur de la masse du glissement de terrain

Les drains profonds et semi-profonds constituent des méthodes efficaces pour évacuer et diriger les eaux d'infiltration et d'écoulement vers les couches aquifères du glissement. Les profondeurs et contraintes opérationnelles tirées des forages exploratoires et des études géophysiques ont permis d'estimer la profondeur de la tranchée à environ 3 mètres. Les tranchées drainantes doivent être remplies de matériaux drainés pour éviter que le système d'évacuation ne cède en cas de déformation. Le coût élevé de l'opération réclame d'effectuer le drainage dans la masse du glissement et en amont, par étapes et en fixant des priorités.

### Étape 3. Excavation de la galerie horizontale pour le drainage en profondeur

Les études géophysiques ont montré qu'une couche aquifère profonde était présente au centre de la masse du glissement, résultant probablement de l'origine des sources au-dessus. Par conséquent, des drainages doivent être réalisés à l'aide de tunnels horizontaux creusés selon la méthode de la gravité, le long d'un coffrage assurant une stabilité à des points stratégiques. Par ailleurs, des matériaux drainés peuvent être utilisés pour garantir la stabilité à long terme en cas de risque d'effondrement.

### Étape 4. Surveillance post-drainage

La performance du drainage, réalisé par étapes, doit être surveillée comme lors de l'étape initiale du plan de stabilisation. Le degré de déplacement doit être consigné, et l'efficacité du drainage, contrôlée à chaque étape.

### Étape 5. Excavation pour ajuster la pente et la géométrie

Au regard de la superficie considérable de la zone du glissement de terrain de Spiu, une méthode mixte a été adoptée. Une correction géométrique doit être effectuée localement pour assurer la stabilité sur place. L'application de techniques de

rectification de la pente doit être suivie de la conception d'un mur de soutènement porteur, d'un porte-à-faux et d'un gabion. Il est nécessaire de déterminer la vitesse de déplacement et les propriétés géotechniques du sol pour le plan de rectification de la pente et du mur.

### Étape 6. Installation de pieux et de murs de soutènement ou gabions

La route principale reliant Spiu à Galandroud, la circulation dense en périodes de vacances et l'accessibilité aux habitations situées en amont sont autant d'éléments contribuant à l'importance de l'entretien des glissements de terrain. Par conséquent, outre le tracé de la route drainante, il est essentiel de déterminer les caractéristiques géomécaniques de la surface de glissement et l'excavation maximale possible des pieux en fonction des conditions du sol.

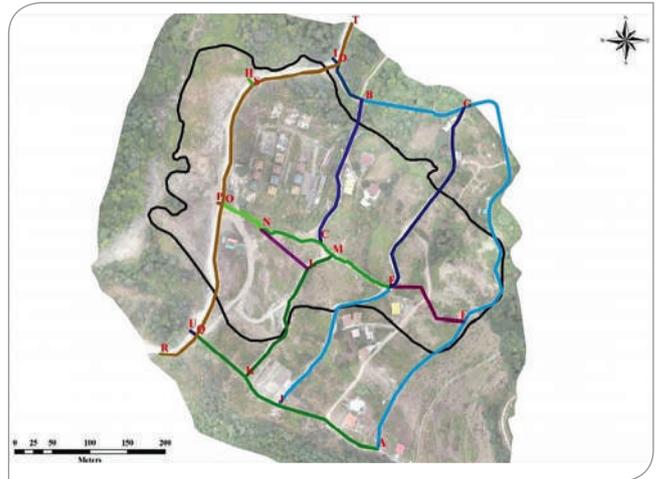


Illustration 4 - Plan de la voie de drainage

### Étape 7. Surveillance post-construction

Le contrôle du comportement des structures dans la masse du glissement de terrain requiert l'application de deux techniques : la télédétection par UAV et les observations in situ. La résistance des structures et des bâtiments à l'intérieur des glissements de terrain doit également être évaluée. Une fois que la stabilité générale de la terre a été validée via la surveillance, des mesures curatives locales, comme le renforcement des fondations, la pose de pieux et la construction de murs de soutènement, doivent être prises pour les bâtiments concernés.

### Étape 8. Installation d'un système de drainage

Selon les résultats des analyses effectuées et si la présence d'eau représente la principale cause d'instabilité, il est conseillé de créer un système de drainage qui transporte l'eau en aval du versant glissant de Galandroud pour stabiliser la pente. En cas de drainage inefficace, il est important d'utiliser des matériaux grossiers et des tuyaux ondulés pour collecter l'eau de la pente et l'acheminer jusqu'au ponceau. L'illustration 4 montre le tracé prévu de la voie de drainage. Le système de drainage de la pente doit être construit de manière à transporter l'eau vers son pied.

## CONCLUSION SUR LE PLAN DE STABILISATION

Le glissement de terrain de Spiu-Galandroud a été étudié sous différents angles, notamment la géologie, le génie géologique, l'analyse des risques sismiques, la cartographie, les levés géophysiques et les analyses de stabilité. Voici les principaux résultats de ces études, ainsi que des recommandations :

- Le manque de perméabilité, la présence d'eau souterraine, la percolation, le changement d'occupation des sols et la perte de végétation sont les principales causes de survenue du glissement, dont la stabilité à long terme repose, en grande partie, sur la revégétalisation.
- La démarche de stabilisation doit privilégier la conception d'un réseau de drainage en raison de la présence d'eau d'infiltration interne et de surface.
- Le drainage doit s'effectuer progressivement et en fonction des données de surveillance. La surveillance doit se faire par voie terrestre, à l'aide de GPS double fréquence, et par voie aérienne, via des UAV.
- Le processus de surveillance doit démarrer et se dérouler avant les opérations de stabilisation. Le degré de déplacement possible est ainsi estimé à chaque étape de la stabilisation et exploité aux fins de l'actualisation du plan.
- Des tranchées de drainage doivent être soigneusement creusées, et la section effondrée doit être rétablie et remplie de matériaux de drainage.
- Le drainage étant crucial pour la stabilisation de la terre, l'équipe d'inspection doit le surveiller de près, tout comme l'approvisionnement en matériaux.
- Si la masse du glissement n'est pas contrôlée, le département des routes devra évaluer la route, puis installer des pieux.
- Le drainage en arc doit être installé en priorité en amont de la masse de glissement et de la route principale et à intervalles réguliers.#



# HISTOIRES DE ROUTES

commun de kilométrage pour toutes les routes, la chose est pratiquement irréalisable. En effet tous les chemins ne convergent pas vers un point unique ; on devrait donc adopter une origine qui se trouverait en dehors du tracé de certains d'entre eux. Dans ces conditions la dernière borne de la section et la première de la suivante pourraient n'être distantes que de quelques mètres ou au contraire être séparées de plus d'un kilomètre. En outre il pourrait arriver que la première borne de la section prenant son origine dans la ville ne portât pas le n° 1 : on aurait donc des kilomètres boiteux et le numérotage deviendrait incompréhensible pour le public.

## TYPE ET ORIENTATION DES BORNES KILOMÉTRIQUES

En ce qui concerne le type des bornes, sans méconnaître qu'une borne triangulaire du genre de celle préconisée par l'Automobile-Club devant le 1er Congrès de la Route présenterait certains avantages pour les inscriptions, l'Office National du Tourisme a pensé qu'en vue d'arriver dans le plus bref délai possible à l'uniformité réclamée, il convenait de s'en tenir au modèle rendu réglementaire sur les Routes nationales par la circulaire du 21 juin 1853 et dont l'emploi, sans être encore général, est déjà fort répandu.

En conséquence, il a cherché à tirer le meilleur parti possible des bornes actuelles, au point de vue de la signalisation des directions et des distances, mais sans en changer le type ni l'emplacement.

Le type de borne kilométrique défini par la circulaire de 1853 est un bloc de pierre dure mesurant de hauteur au-dessus du sol, y compris le socle de 0m10. Il a la forme d'un prisme rectangulaire de 0m25 x 0m35 de section et surmonté d'un demi-cylindre. Le grand côté du rectangle est parallèle à l'axe de la route.

L'Office National du Tourisme propose tout d'abord de faire tourner la borne de 90° sur elle-même, afin d'orienter ses larges faces du côté le plus favorable aux inscriptions de direction et de distance.

Il propose ensuite de réserver aux inscriptions intéressant le public les faces de la borne visibles de la route et de reporter sur la face postérieure celles d'ordre administratif.

Ces principes étant admis, le bornage de la route n'apparaît plus aux yeux du public et il reste à utiliser le mieux possible les faces visibles de la route pour les indications des directions et des distances.

## Inscriptions sur les bornes kilométriques

En ce qui concerne celles-ci, l'Office National du Tourisme s'est inspiré des vœux émis par le 1er Congrès International de la Route.

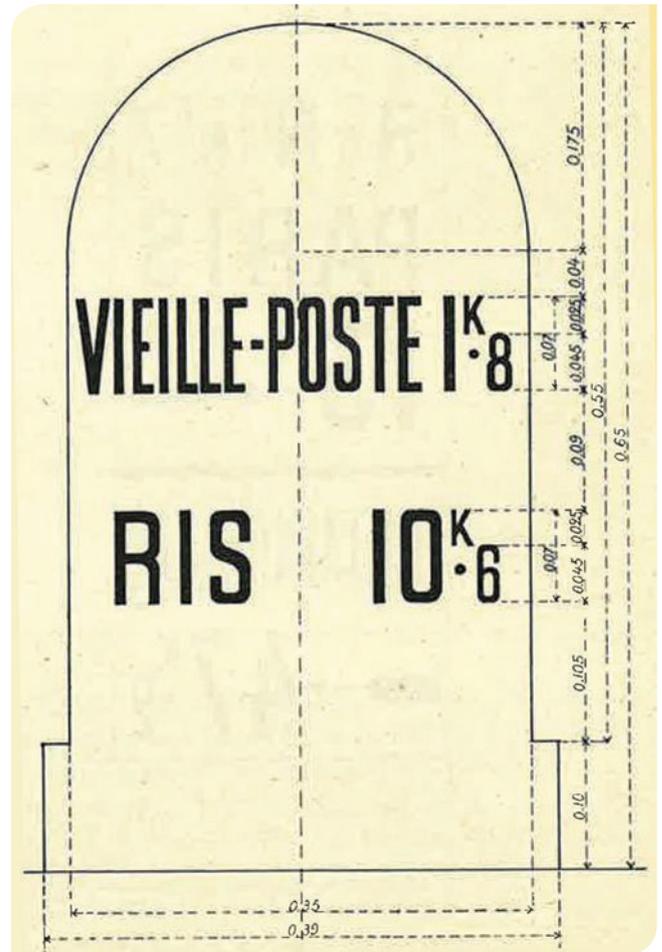


Figure 2

Sur la partie supérieure et courbe de la face antérieure (figure 1), il propose d'inscrire :

1. Le titre et le numéro de la route, sous forme aussi abrégée que possible, par exemple pour une route nationale : R. N. N° 7 ;
2. Au-dessous, les noms des grandes villes limitant dans les deux sens la section de route sur laquelle se trouve la borne ;
3. Sous chacun des noms, une flèche de direction et la distance des centres.

Ainsi se trouve réalisé, à l'égard du public, le sectionnement des routes de grand centre à grand centre.

Les dimensions de la face permettent l'adoption d'une hauteur de 0m06 pour les lettres des noms et de 0m08 pour les chiffres indiquant la distance kilométrique, de 0m05 pour les chiffres de distance hectométrique.

Dans ces conditions les inscriptions sont bien lisibles pour celui qui passe sur la route.

Chaque face latérale est réservée exclusivement aux noms et distances des localités sises en aval de la borne dans le sens de la marche du lecteur (figures 2 et 3).

Comme l'a demandé avec raison le Congrès, les inscriptions

devront être peu nombreuses. L'Office National du Tourisme estime qu'on ne devra jamais indiquer plus de deux localités ; la première devra être toujours la plus proche, fût-ce un groupe de quelques maisons seulement, car les indications de la borne s'adressent surtout à la circulation locale et il importe d'indiquer au voyageur l'endroit le plus rapproché où il pourra se procurer un renseignement ou trouver du secours. En ce qui concerne le grand tourisme, les indications des bornes sont complétées par celles des plaques, comme il sera dit plus loin.

Le choix de la deuxième localité à indiquer dépendra des circonstances locales et devra toujours avoir pour but de compléter judicieusement les indications fournies par les plaques.

Une hauteur de 0m07 pourra être donnée aux lettres des noms et aux chiffres kilométriques, une hauteur de 0m045 aux chiffres hectométriques.

Quant à la face arrière (figure 4), elle recevra le nom du département, le numéro de la borne correspondant au kilométrage administratif et enfin l'altitude de la borne au-dessus du niveau de la mer.

Dans le cas exceptionnel où la face arrière de la borne est adossée à un obstacle, on inscrira le numéro administratif de la borne sur sa face antérieure et au bas de celle-ci en chiffres de 0m06 (figure 5).

Telles sont les propositions de l'Office National du Tourisme pour les routes qui sont pourvues de bornes conformes au type de 1853.

- Sur les autres, ou bien les dimensions des bornes adoptées par les Services permettent de se conformer pour les inscriptions aux indications qui précèdent : dans ce cas les bornes pourront être conservées et n'être remplacées par le type réglementaire - qu'au fur et à mesure de leur destruction ;
- Ou bien les bornes sont d'un modèle trop petit : dans ce cas, l'Office National du Tourisme propose de commencer par remplacer les bornes actuelles tous les 5 kilomètres par une borne réglementaire.

L'équipement de la route se complètera au fur et à mesure de la destruction des vieilles bornes.

## Bornes hectométriques

En ce qui concerne les bornes hectométriques, on y inscrira sur la face antérieure leur distance à la borne kilométrique précédente et non plus la distance à l'origine du kilométrage (figure 6).

## Bornes limites des départements

Les bornes dont la pose a été prescrite à la limite des départements par l'Instruction du 11 février 1813 du

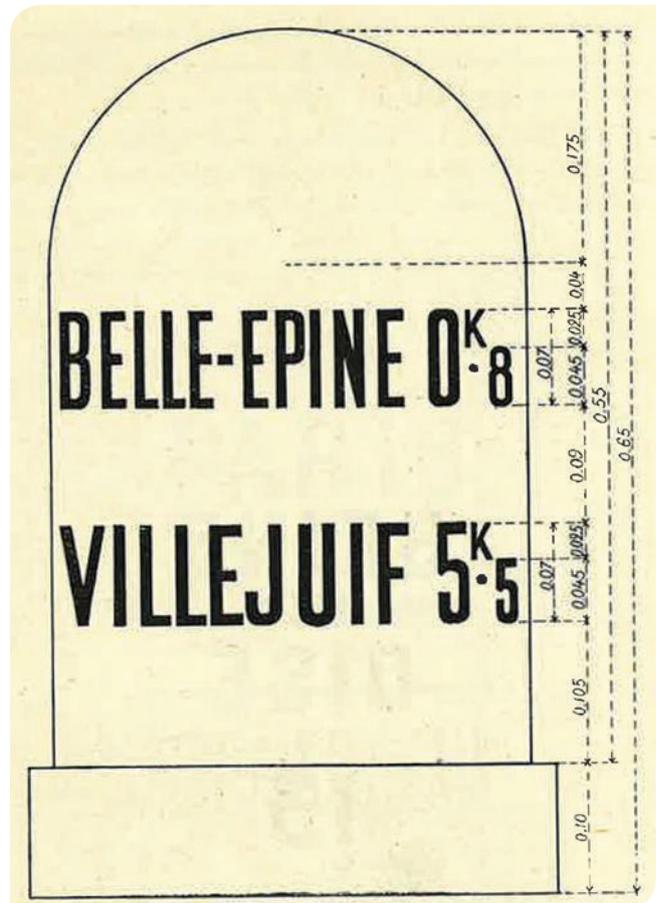


Figure 3

Directeur des Routes devront être établies partout où elles n'existent pas.

Les inscriptions sur la face antérieure seront complétées par l'indication des centres limitant la section et celle des distances à ces centres (figure 7).

Les faces latérales (figure 8 et 9) recevront les mêmes inscriptions que celles des bornes kilométriques.

## Plaques indicatrices

Au point de vue du grand tourisme, c'est, comme il a été dit ci-dessus, dans les plaques indicatrices qu'il convient de chercher la solution du problème de la signalisation des directions et des distances. Ce système présente une souplesse qui fait défaut aux bornes et la multiplication des plaques ainsi que leur agrandissement peuvent être envisagés sans entraîner des dépenses excessives.

Les modèles de plaques à employer seront différents suivant qu'il s'agit d'un point situé dans un lieu habité ou d'un point situé en rase campagne.

## Agglomérations

En ce qui concerne les agglomérations, le touriste se plaint avec raison de ne trouver nulle part



Figure 4



Figure 5

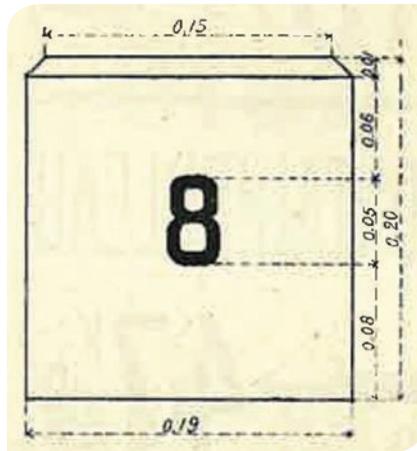


Figure 6

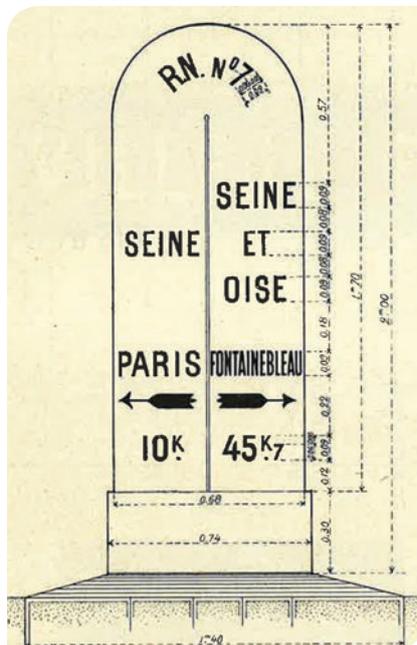


Figure 7

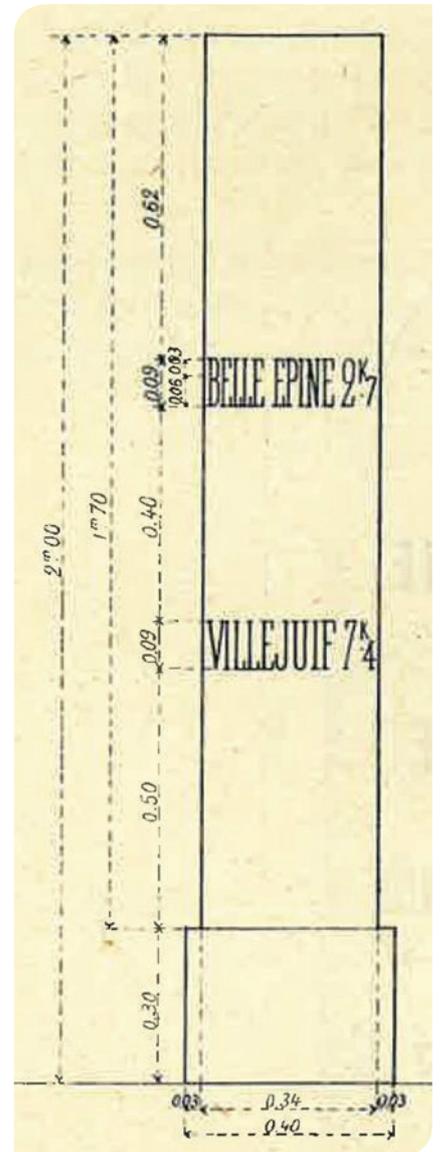


Figure 8

l'indication du nom de la localité qu'il aborde.

La première amélioration à apporter consistera donc dans la pose à l'entrée de la localité et perpendiculairement, à l'axe du chemin, d'une grande plaque portant uniquement le nom de ladite localité en lettres de 0m12 au moins (Modèle n° I, *figure 10*).

Reste à guider le touriste à l'intérieur de l'agglomération. S'il s'agit d'une localité peu importante dont le plan est simple, où les voies servant aux itinéraires les plus suivis se distinguent, sans confusion possible, des chemins secondaires, il suffira de poser aux bifurcations de ces derniers des plaques murales conformes au modèle n° II (*figure 11 et 11bis*) qui,

au lieu de donner des indications dans les deux directions comme les plaques actuellement en usage, n'en donnent que pour celui des embranchements de chemin sur lequel elles sont posées. De plus, afin de pouvoir faire usage de caractères mesurant 0m08 de hauteur et facilement lisibles, sans donner à la plaque plus de 0m60 x 0m40, le nombre des localités indiquées ne devra jamais dépasser deux.

L'emploi de la plaque à deux directions, modèle II bis (*figure 12*), est néanmoins prévu, mais il est réservé au cas d'un chemin aboutissant sur un autre ; la plaque est alors posée sur ce dernier et face à l'embranchement. La plaque modèle II bis mesure 0m80 x 0m40 ; les caractères ont 0m08 de hauteur.

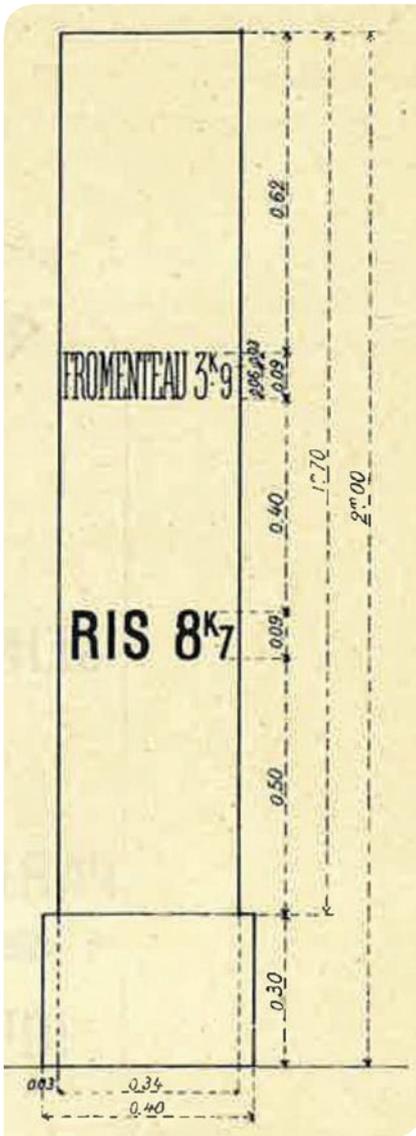


Figure 9

S'il s'agit d'une grande ville ou d'une agglomération à rues sinueuses, ou encore si l'on a intérêt à diriger le touriste par des voies détournées mais spacieuses et peu encombrées, il conviendra de remplacer, ou tout au moins compléter le système de signalisation ci-dessus par un jalonnement des principaux itinéraires sur tous les points où l'hésitation est possible au moyen de plaques posées parallèlement à l'axe de la route et portant simplement, sans indication de distance, le nom du premier grand centre dans chacune des directions.

Le modèle III (figure 13) sera celui qui trouvera la plus courante application. Le modèle III bis (figure 14) servira à l'origine d'un itinéraire. Le modèle IV (figure 15) suppose que la section de

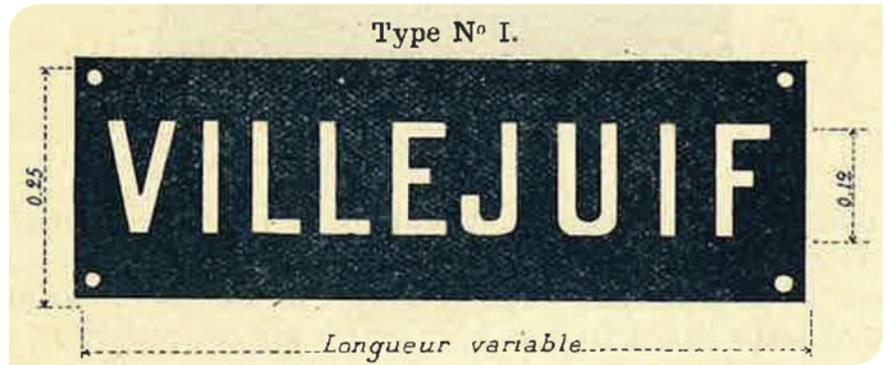


Figure 10



Figure 11



Figure 11 bis

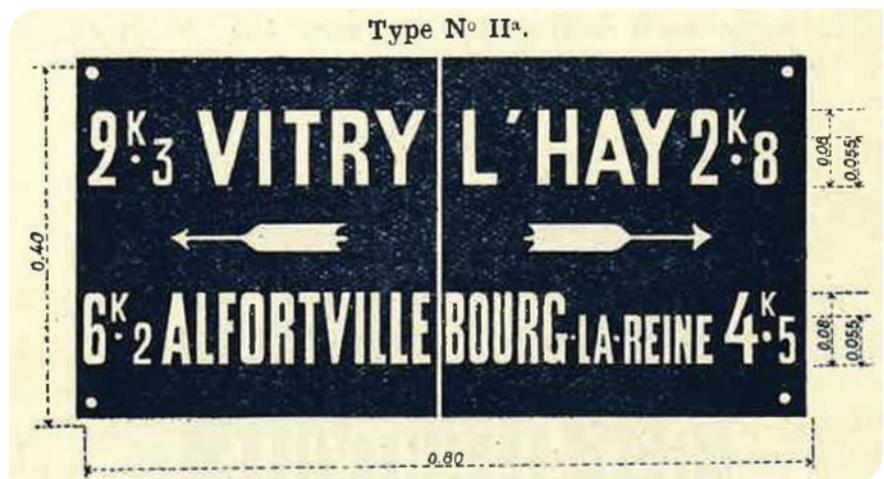


Figure 12

route considérée est commune dans un sens à deux grands itinéraires.

Dans le cas d'une section commune dans les deux sens à deux itinéraires, il sera préférable de juxtaposer ou de superposer deux plaques du modèle III.

Ces plaques sont destinées en principe à être fixées parallèlement à l'axe de la rue aux supports de l'éclairage public afin d'être lisibles la nuit.

A défaut de cette solution, on les scellera aux façades des immeubles ou on aura recours à des supports spéciaux.

Intentionnellement on a réduit autant que possible les dimensions de ces plaques, afin qu'elles ne nuisent pas trop à l'esthétique des traverses ; à cet effet la hauteur des caractères a été fixée à 0m09. Pour que les inscriptions soient bien visibles on devra s'efforcer de poser les plaques le plus près possible des bordures de trottoir.

## Rase Campagne

En ce qui concerne les sections de route en rase campagne, le système de signalisation ne comprend que la pose



mots courts de 5 à 6 lettres pourront être lus — avec les dimensions adoptées pour les plaques modèles V et VI — à des distances voisines de 80 mètres.

La partie inférieure reçoit les noms et distances des localités qui se trouvent de part et d'autre de la route sur le chemin croiseur. Des flèches indiquent les directions. Ces plaques sont à double face. Dans le cas où un chemin aboutit sur un autre sans le croiser, on fera usage de la plaque modèle n° VI (figure 17 et 17 bis).

La partie inférieure ne fait, plus saillie que d'un côté sur la partie supérieure, indiquant ainsi par sa forme seule qu'on est en présence d'un embranchement de chemin.

Le dispositif des inscriptions repose sur le même principe que pour le modèle N° V. On remarquera que, pour entrer dans les vues du 1er Congrès International de la Route, les inscriptions d'ordre administratif ont été bannies des modèles de plaques proposés. De même, l'on n'a eu recours à aucun signe conventionnel, les indications portées sur les plaques devant se suffire à elles-mêmes.

## Couleur du fond des plaques et des caractères

Les récentes expériences n'ont fait que confirmer celles du Touring-Club de France et de l'Automobile-Club au sujet de la supériorité du bleu foncé pour le fond des plaques et de la couleur blanche pour les caractères des inscriptions.

Il a été reconnu qu'il y avait intérêt à supprimer tout liséré blanc sur le bord des plaques : il prend de la place et nuit à la lecture des inscriptions.

Tous les modèles de plaques entrant dans le système de signalisation décrit ci-dessus sont donc à fond bleu foncé avec inscriptions blanches.

Toutefois, pour la partie supérieure des plaques, modèles n° V et VI, il a paru avantageux d'adopter la couleur blanche pour le fond et la couleur bleu foncé pour les inscriptions ; elle est ainsi nettement différenciée de la partie inférieure et elle est traitée de la même manière que les bornes dont elle joue l'office à l'égard de l'indication des localités desservies par la route suivie.

## Nature des plaques

En ce qui concerne la fabrication des plaques les essais projetés porteront sur diverses matières ; tôle vernie cuite au four, tôle émaillée et verre étiré. Ils feront ressortir les avantages et les inconvénients des divers procédés de fabrication ainsi que leur prix de revient.

## Système d'attache et de support

Les plaques des modèles n° I, II et II bis sont en principe murales; elles sont percées de 4, 6 ou 9 trous et fixées au mur au moyen de pattes à scellement ou de vis en cuivre avec tampons en bois.

Pour l'attache des plaques modèles n° III, III bis et IV sur les supports de l'éclairage public, on fera usage de colliers dont la forme et les dimensions dépendront de celles du support. A défaut de cette solution on adoptera un poteau dont le modèle devra, en général, être arrêté d'accord avec la municipalité.

Les plaques des modèles V et VI exigent, en raison de leur double face et de leurs grandes dimensions, l'emploi d'un poteau présentant une disposition particulière.

Celui dont l'essai sera fait sur l'itinéraire Paris-Trouville (figure 18) consiste en un tube cylindrique creux en acier de 0m07 de diamètre et de 0m003 d'épaisseur. Il mesure 4m25

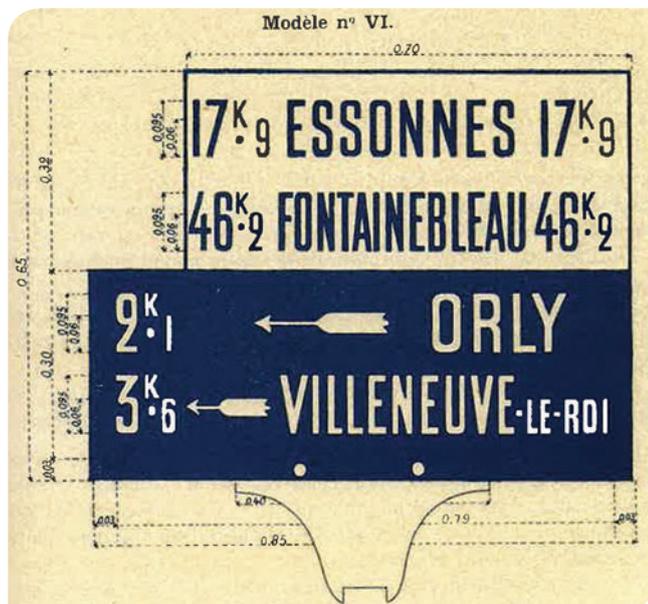


Figure 17 - Recto

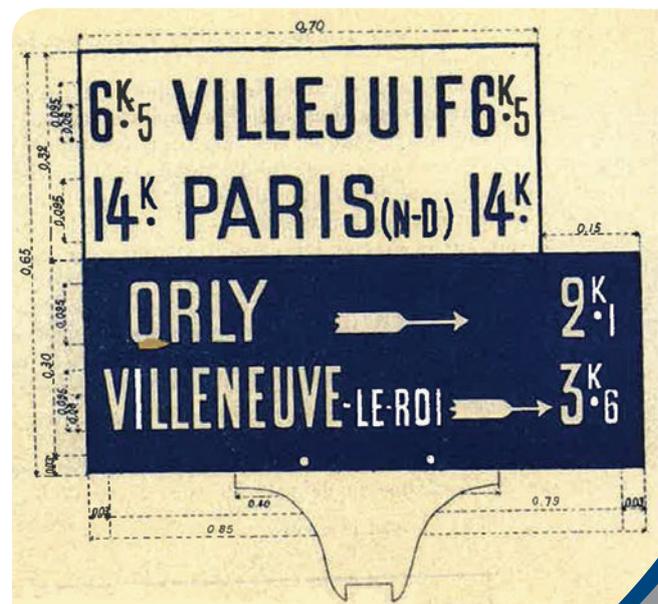


Figure 17 bis - Verso

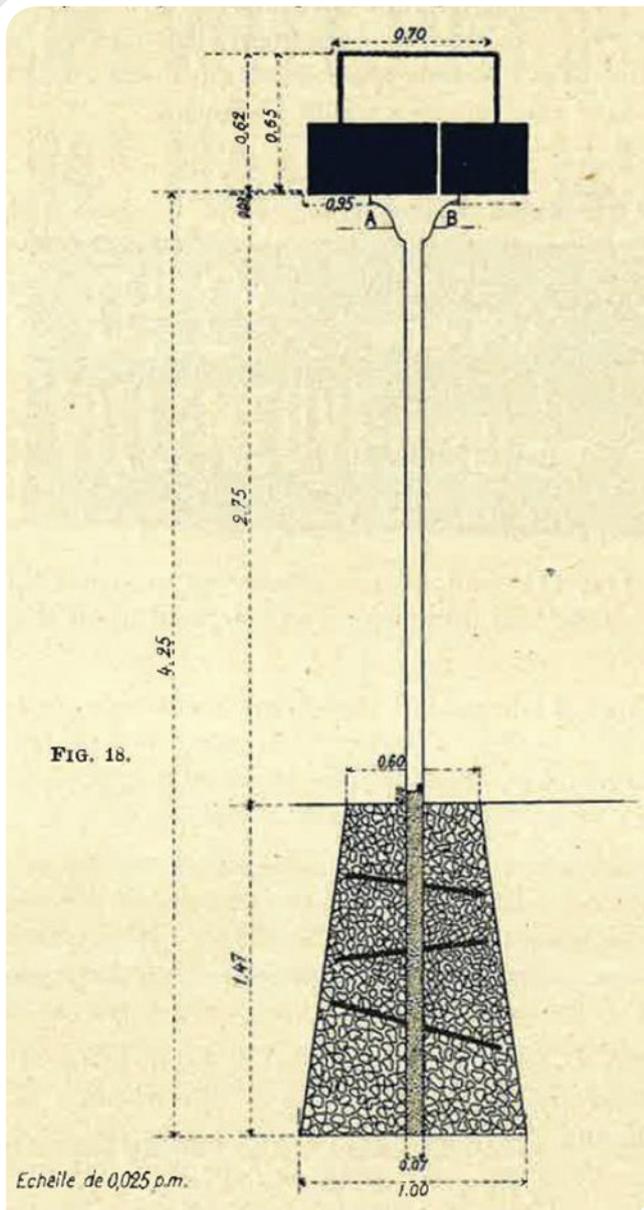


Figure 18

de longueur dont 1m47 noyés dans un massif de fondation en béton : trois tiges transversales assurent une liaison intime du poteau avec le massif de béton.

A sa partie supérieure le tube présente suivant un diamètre une fente large de 0m003 et haute de 0m21 dans laquelle on introduit la partie inférieure de la plaque. Une double plate-bande de 0m03 de largeur et de 0m006 d'épaisseur est rivée sur le pourtour de la partie inférieure de la plaque. Elle est renflée au droit du poteau et forme collier. Un certain jeu est laissé entre les plates-bandes et la plaque de manière à permettre la facile introduction du poteau dans le collier.

La plaque une fois en place, on supprime le jeu en serrant fortement les boulons de deux écrous traversant les plates-bandes et la plaque de part et d'autre du poteau.

Cette disposition fort simple permet de confier aux cantonniers la mise en place du poteau et de la plaque et de démonter celle-ci sans toucher au poteau quand il y a lieu de la réparer ou de la remplacer. Pour augmenter la visibilité du poteau la nuit, il sera peint en blanc.#

# ROUTES/ROADS

*Routes/Roads  
accepte volontiers  
des encarts  
publicitaires :  
un quart de page,  
une demi-page,  
une page entière,  
une couverture  
(2, 3 ou 4)*



*Prix de vente :  
Format A4 :  
2000 € TTC  
Format A5 :  
1000 € TTC  
Quart de page :  
500 € TTC  
Pour les couvertures,  
nous consulter*

*Mise en page  
effectuée par  
l'annonceur*

*Fournir  
de préférence  
trois encarts,  
en anglais,  
français  
et espagnol*

*Cette page pourrait être la vôtre !  
Elle vous attend !*

**Demande de renseignements et de devis à :**  
**[gen-sec-piarc@piarc.org](mailto:gen-sec-piarc@piarc.org)**

APPEL À  
COMMUNICATIONS



# 17<sup>e</sup> CONGRÈS MONDIAL DE LA VIABILITÉ HIVERNALE ET DE LA RÉSILIENCE ROUTIÈRE

*Garantir l'excellence routière en toutes saisons*

CHAMBÉRY - SAVOIEXPO - FRANCE  
10-13 mars 2026 | FRANÇAIS

[www.piarc-chambéry2026.com](http://www.piarc-chambéry2026.com)



origine verticale - CCAT