

Gestion patrimoniale des ouvrages en terre d'un réseau autoroutier

Earthworks asset management on a motorway network

Pauline POUGET^{1*}, Patrick GARCIN¹

1 EGIS SE Géotechnique, Seyssins, France

**pauline.pouget@egis-group.com*

RESUME : L'article traite de la gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages en terre au moyen d'une méthode innovante numérique. L'étude a visé dans un premier temps à recenser tous les déblais et remblais autoroutiers d'un réseau autoroutier de plus de 1700 km. Pour ce faire, un recensement traditionnel par visite de site aurait nécessité une mobilisation conséquente. Ainsi, une méthode innovante de recensement automatique sur SIG a été développée. Elle a consisté à détecter les remblais / déblais en utilisant les altimétries disponibles (hauteur de l'axe et du terrain naturel) sur les données RGE ALTI, « Référentiel à Grande Echelle » fournies par l'IGN.

In fine, une cartographie de plus de 7000 ouvrages en terre a été produite permettant de visualiser tous les talus sur le réseau autoroutier et d'accéder facilement aux données géométriques et géographiques (hauteur, PR, longueur, surface, pente, sens de circulation et coordonnées). Cette étape de recensement a permis par la suite de caractériser la criticité géotechnique des talus du réseau autoroutier et d'établir le budget prévisionnel d'entretien associé. Les paramètres utiles à l'étude de criticité ont été ajoutés dans la table attributaire des talus sur SIG (géologie du terrain, niveau d'humidité du sol, niveau de précipitation annuelle, pente verticale, etc.). La finalité de la mission est la proposition d'un programme d'investissement pluriannuel jusqu'en fin de concession en 2031. Ce programme présente une proposition d'étalement cohérent des actions à mener sur les ouvrages (étude/suivi/travaux/instrumentation), avec une estimation du coût associé.

La méthodologie mise en pratique dans ce projet a l'avantage de traiter un grand nombre de talus avec les données disponibles. Elle permet de hiérarchiser les talus par ordre de priorité et surtout d'identifier les ouvrages en terre les plus critiques, qui pourront bénéficier d'une étude plus approfondie. Elle constitue une aide à la décision pour le concessionnaire autoroutier.

ABSTRACT: The article focuses on the asset management of a network of earthworks using an innovative digital method. The study initially aimed to identify all motorway excavations and embankments within a motorway network spanning over 1,700 km. To do this, a traditional on-site survey would have required a significant amount of manpower. Thus, an innovative method of automatic GIS mapping was developed. It consisted of detecting embankments/cuttings using available altimetry data (axis height and natural terrain height) from RGE ALTI (Large Scale Reference System) data provided by the IGN.

Ultimately, a map of more than 7,000 earthworks was produced, allowing all earthworks on the motorway network to be visualised and providing easy access to geometric and geographic data (height, PR, length, surface area, slope, direction, coordinates, etc.). This inventory stage subsequently enabled the geotechnical criticality of the motorway network's embankments to be characterised and the associated provisional maintenance budget to be established. The parameters useful for the criticality study were added to the GIS embankment attribute table (geology of the terrain, soil moisture level, annual precipitation level, vertical slope, etc.). The project's objective is to propose a multi-year investment programme up to the end of the concession period in 2031. This programme presents a coherent proposal for spreading out the actions to be carried out on the engineering structures (study/monitoring/works/instrumentation), with an estimate of the associated costs.

The methodology used in this project has the advantage of processing a large number of embankments with the available data. It enables embankments to be ranked in order of priority and, above all, identifies the most critical earthworks, which may benefit from further study. It provides decision-making support for motorway concessionaires.

Mots-clés: Ouvrages en terre ; Système d'Information Géographique ; Recensement ; Criticité ; Aide à la décision.

1 RECENSEMENT DES OUVRAGES EN TERRE

1.1 Introduction

Souvent délaissés par les gestionnaires de patrimoine au profit des ouvrages d'art et des murs de soutènement, les ouvrages en terre (OT) jouent pourtant un rôle crucial pour soutenir ou protéger une section autoroutière. Du fait de l'absence de surveillance imposée sur les ouvrages en terre, ils sont relégués au second plan et traités au cas par cas lors de l'apparition de désordres.

Ainsi les gestionnaires de patrimoine (autoroutiers ou communaux) ont une vision tronquée et souvent minimisée de l'inventaire de leurs ouvrages et des dépenses à prévoir pour les maintenir en bon état. Cet état de fait est souvent accentué par le manque d'exigence ou de recommandation de réalisation d'inspections détaillées des OT. Pour éviter de subir cette situation et de travailler au cas par cas, nous avons développé une méthode innovante de recensement automatique des OT autoroutiers en France. A partir de cet inventaire, le maître d'ouvrage a la maîtrise de son patrimoine et une base de données (BDD) solide pour piloter et prendre des décisions concernant la surveillance, la maintenance et les réparations. L'outil Système d'Information Géographique (SIG) est apparu comme la solution adéquate pour déployer ce recensement (ArcGIS Pro / QGIS / Global Mapper).

1.2 Méthodologie innovante de détection automatique

La méthode repose sur un principe simple : détecter les déblais et remblais à partir des ruptures de pente des ouvrages en terre. Pour accéder aux données altimétriques de la zone d'étude, l'IGN met à disposition en open source le « Référentiel à Grande Échelle » RGE ALTI® (Géoportail, 2025). Il s'agit d'un modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui vise à délimiter le relief du territoire français. Il décrit la forme et l'altitude de la surface du sol à grande échelle. Le produit RGE ALTI® « modèle maillé » est une représentation interpolée de la surface du sol.

La précision du MNT varie selon les zones et les enjeux : elle est notamment précise dans les zones inondables ou littorales pour répondre aux besoins liés à la mise en œuvre de la directive européenne inondation. Lors de la réalisation du projet en 2021-2022, les dalles du RGE ALTI® disponibles sont réalisées via plusieurs méthodes, ce qui engendre une hétérogénéité de la précision altimétrique. Mis à part le LIDAR, le RGE ALTI® est mis à jour à partir des

corrélations d'images aériennes ou de la BD Alti comme indiqué sur la figure 1.


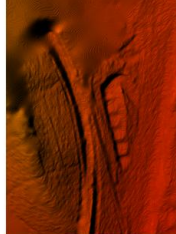
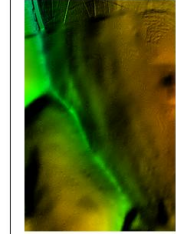
Laser topo – LIDAR (<30cm)	Corrélation d'image	BD ALTI® (2 à 8m)
18% du périmètre géographique	2% (<1,20m) 70% (<70 cm)	10% périmètre géographique
		

Figure 1 Représentation des sources de données du RGE ALTI®

Tout d'abord, des profils en travers perpendiculaires à l'axe autoroutier et espacés de 1 m sont créés dans une zone tampon réduite de 50 m. Chaque profil en travers est ensuite rattaché à une altimétrie grâce à une jointure entre les nœuds altimétriques de l'axe autoroutier et les profils. Ensuite, les différences entre les hauteurs d'axe et le RGE ALTI permet de distinguer le déblai (valeur supérieure à l'axe) du remblai (valeur inférieure à l'axe). Puis, un outil de géo traitement permet de convertir le raster en polygone et d'épouser les formes de l'ouvrage en terre.

Enfin, des critères géotechniques sont appliqués pour éliminer les artéfacts et ne conserver que les talus. Sont donc écartées les pentes inférieures à 18°, les surfaces inférieures à 50 m² et les hauteurs verticales inférieures à 1,5 m (la méthode est synthétisée en figure 2). En effet, le nombre d'objets recensés était trop important, car toutes les ruptures de pente (creux et bosses) étaient inventoriées dans la base de données. Les critères appliqués sont issus des règles de conception des talus : une pente minimale de 3H/1V et une hauteur minimale de 1,5 m, en dessous desquelles peu de désordres sont constatés. A noter que les OT situés en terre-plein central et au droit des ouvrage d'art sont recensés.

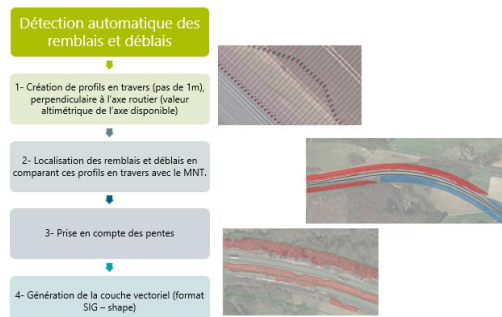


Figure 2 Schéma de la méthodologie mise en place

Le réseau étudié couvre environ 30 départements et s'étend sur environ 3500 km (2 sens de circulation)

dans une zone à faible relief. A l'issue du recensement automatique sur SIG et de l'application des critères géotechniques, presque 12 000 polygones ont été inventoriés dans les deux sens, soit environ 3,7 polygones par km. Cette densité semble disproportionnée, en effet, la détection automatique a parfois conduit à la création de polygones non conformes à des OT, une importante phase de contrôle interne a donc été nécessaire pour cibler le recensement aux ouvrages réels.

1.3 Contrôle interne

Le recensement des ouvrages en terre par méthode automatique a été contrôlé afin de déceler de nouvelles règles d'automatisation et de corriger certains polygones. Une première phase de contrôle a été accomplie sur deux départements puis une seconde a permis de contrôler l'ensemble du réseau.

La première étape du contrôle interne s'est portée sur deux zones test avec des précisions de la donnée entrante RGE Alti différentes. La méthodologie appliquée consistait à passer en revue l'ensemble des tracés pour vérifier la nature du polygone (Versant ou Ouvrage en terre), modifier la géométrie, créer des ouvrages en terre manquants et supprimer les artefacts. Pour ce faire, des outils comme la visualisation des talus sur Google Street, le profil en travers des talus et les images satellitaires ont été utilisés. Il est important de prendre conscience que dans les zones de faible précision où les ruptures de pente sont peu visibles, les OT ne sont pas détectés par la méthode automatique. Le contrôle interne a donc été indispensable pour créer les talus manquants et combler cette lacune.

Ensuite pour la vérification de l'ensemble du réseau, la méthodologie des deux zones tests est appliquée mais uniquement pour les zones du réseau avec une précision altimétrique faible. Ce contrôle est effectué sur la base de requêtage et d'expertise issue de photo interprétation. Pour les autres zones, seul le contrôle des OT jouxtant les passages inférieurs et supérieurs est réalisé, ce qui implique que la géométrie et la nature des autres polygones ne sont pas vérifiées (on estime une erreur à environ 5-10%).

A l'issue de cette deuxième étape du contrôle interne, les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 1. Le nombre d'OT inventoriés en phase finale est réduit de 54 % soit 7 043 talus.

Tableau 1. Bilan du contrôle interne de tout le réseau

Phase	Nombre OT
Traitement automatique	13 030
Après filtre de surface, hauteur et pente	11 925
Après contrôle final	7 043

2 ETUDE DE CRITICITE DES OUVRAGES EN TERRE

2.1 Définition des paramètres

A l'issue de la phase précédente, la table attributaire des OT sur SIG a été enrichie avec les données géographiques (coordonnées GPS, axe, sens, département, précision RGE Alti) et géométriques (hauteur, pente, surface, nature OT, etc) mais c'est une table de données insuffisante pour construire l'analyse de criticité.

En effet, l'étude de criticité vise à prioriser les OT en fonction de leur potentiel de dégradation. Au vu de la volumétrie obtenue, une analyse fine au cas par cas n'est pas envisageable. C'est donc une méthode à l'échelle macroscopique basée sur des critères identifiables à grande échelle qui a été implémentée.

Les 5 critères considérés pour l'étude et calculés directement sur SIG sont synthétisés dans le tableau suivant et détaillés ci-après.

Tableau 2. Synthèse des 5 critères pris en compte pour l'étude de criticité

Critère	Méthode de calcul
Pente	Pente moyenne de l'ouvrage (en °)
Hv	Hauteur verticale maximale de l'ouvrage (en m)
Pluie	Niveau de précipitation annuel en mm par département (Meteociel, 2021)
Humidité	Humidité de surface en indice NDMI
Nature Géologie	Nature géologique de la couche de surface

La pente calculée à partir du MNT indique des valeurs cohérentes avec les ratios traditionnels (2H/1V, 3H/2V et 1H/1V).

Le niveau de précipitation correspond à la moyenne des précipitations mensuelles en mm depuis une décennie. En effet, le site web Météo Ciel a permis de retracer l'historique des niveaux de précipitation de 8 stations météorologiques situées à proximité du réseau étudié (Meteociel, 2021).

L'humidité de surface a été calculée à partir de l'Indice d'Humidité par Différence Normalisée (NDMI) qui est sensible aux niveaux d'humidité dans la végétation. Pour cette analyse, nous utilisons des dalles issues du satellite LANDSAT 8 téléchargées depuis le site de l'USGS (USGS, 2021). A l'issue de ce traitement, on obtient la valeur de l'indice NDMI compris entre -1 (très humide) et 1 (très sec) pour chaque pixel. Pour obtenir la valeur de l'humidité pour chaque OT, il faut intercepter la couche des indices et les tracés des polygones des OT sur SIG. Cette intersection fractionne l'OT initial en une multitude d'objets selon si l'OT est intersecté par un ou plusieurs

indices d'humidité. Nous appliquons enfin deux règles pour basculer les informations vers l'OT unique de référence. Si plus de la moitié de la surface du talus est couvert par une unique valeur d'humidité (> 60%), alors on affecte cette valeur à l'ensemble de l'OT. Si le fractionnement est plus important, on affecte la moyenne de la valeur d'humidité. A noter que l'indice NDMI est un indice d'humidité de surface qui ne représente pas la teneur en eau ou la présence d'eau dans le massif (évaluation jugée trop chronophage pour la volumétrie étudiée).

Enfin, la nature géologique de surface a été obtenue en croisant la couche géologique de la France téléchargeable sur la base Info terre (BRGM, 2021) et les tracés des polygones des OT sur SIG. Suite à cette jointure, chaque OT était caractérisé par une ou plusieurs natures géologiques. Il a été décidé de considérer la nature géologique représentant la plus grande surface sur le talus avec une fiabilité définie en fonction de la nature de l'ouvrage (Déblai/Remblai).

La table attributaire est ensuite extraite du logiciel SIG au format Excel (.xlsx). La suite de la mission sera réalisée uniquement sur un tableur Excel. A noter que nous aurions pu continuer à utiliser les outils SIG mais le client a exigé que la méthodologie et le livrable soient au format Excel.

2.2 Déploiement de la méthode matricielle

L'ensemble des paramètres renseignés dans la BDD ne sont pas le fruit du hasard mais reflètent les indicateurs jugés critiques suite à la lecture des rapports d'inspections et de diagnostics des Ouvrages en Terre Sensibles (OTS). Il s'agit de talus ayant déjà fait l'objet de désordres et travaux sur le réseau étudié.

Le paramètre hydrogéologique est très défavorable à la stabilité d'un talus, ce qui explique la prépondérance des paramètres hydriques comme le niveau de précipitation et le taux d'humidité. Quant aux paramètres géométriques, il a été observé que 65 % des OTS recensés avaient une hauteur supérieure à 5 m. Le critère géométrique est évidemment prépondérant pour une criticité géologique donnée.

Les cinq critères sont évalués selon une échelle comprise entre 1 et 4 comme indiqué dans la Figure 3. Une faible note indique un critère favorable à la stabilité de l'ouvrage.

NOTE	Pente	Hv	Pluie	Humidité (NDMI)	Nature Géologie
1	$18^\circ \leq \alpha < 25^\circ$	$1,5m \leq Hv < 5m$	$Pet \leq 550mm$	$0,33 < NDMI$	Formations stables
2	$25^\circ \leq \alpha < 30^\circ$	$5m \leq Hv < 10m$	$550mm < Pet \leq 650mm$	$0,15 < NDMI \leq 0,33$	Formations moyennement stables
3	$30^\circ \leq \alpha < 35^\circ$	$10m \leq Hv < 15m$	$650mm < Pet \leq 750mm$	$0 < NDMI \leq 0,15$	Formations peu stables
4	$35^\circ \leq \alpha$	$15m \leq Hv$	$750mm < Pet$	$NDMI \leq 0$	Formations instables
GEOMETRIE = Max (note pente; note Hv)			GEOLOGIE = Max (note pluie ; note humidité ; note géologie)		

Figure 3 Détail des notations et des critères pris en compte pour l'étude de la criticité des ouvrages en terre

Concernant la note « Nature Géologie », chaque OT est identifié par une seule nature géologique (issue de la carte géologique de France) classée suivant son effet sur la stabilité du talus (à ce stade nous considérons l'aléa glissement / érosion de talus meubles). Par exemple, les formations classées 1, considérées comme stabilisatrices, concernent les roches dures et le substratum comme le calcaire, le grès, la dolomie, etc. A contrario, les formations instables classées 4 correspondent aux sols meubles pulvérulents comme les alluvions, argiles, limons, tourbe, etc. Ensuite, ces 5 notes sont synthétisées en deux critères principaux :

- Critère GEOMETRIE correspond à la note maximale entre la note de pente et celle de la hauteur ;
- Critère GEOLOGIE correspond à la note maximale entre la note de pluie, la note d'humidité et la note de Nature Géologie.

En faisant le produit de ces deux critères on obtient la note de criticité comme indiqué sur la matrice de criticité présentée ci-dessous.

		GEOLOGIE			
		1	2	3	4
GEOMETRIE	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

Figure 4 Matrice de criticité regroupant la note de géologie et de géométrie

Les notes de criticité obtenues sont comprises entre 1 et 16. Afin de faciliter l'analyse, les notes de criticité sont regroupées pour constituer 4 niveaux d'intensité :

- Criticité très faible : note de 1 à 3 ;
- Criticité faible : note de 4 à 8 ;
- Criticité modérée : note de 9 à 12 ;
- Criticité élevée : 16.

2.3 Analyse des résultats et des limites

La mise en application de la méthode matricielle détaillée dans le paragraphe précédent a permis de mettre en exergue des résultats importants.

De prime abord, le critère le plus défavorable dans l'étude de la criticité est la nature géologique : plus de 6 000 OT ont une nature géologique défavorable. Ceci s'explique en partie par le fait que la plupart des couches géologiques sont considérées comme des « formations instables » (i.e note égale à 4 pour les sols meubles) et que ces types de sol sont assez récurrents dans les zones étudiées.

Cependant, il est fréquent qu'un talus autoroutier soit construit après terrassement pour éliminer les couches superficielles avec des propriétés mécaniques défavorables (remblai et matériaux de couverture). Par conséquent, le critère géologique peut être inexact car la couche géologique considérée pour la criticité a été supprimée, et la vraie nature géologique reste inconnue. Les résultats de ce critère sont ainsi plus fiables pour les déblais (« certitude » quant à la nature du sol en place) que pour les remblais (matériaux importés avec des propriétés mécaniques maîtrisées et non identifiées sur la carte géologique d'InfoTerre). Cette étude permet tout de même d'avoir une première idée de la criticité des OT et une réflexion est en cours sur une meilleure définition des remblais.

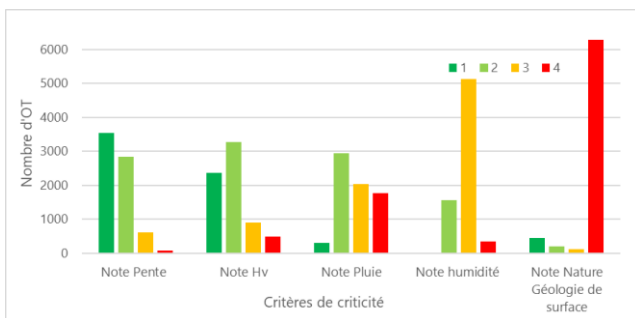


Figure 5 Répartition des notes des critères de criticité des ouvrages en terre du réseau en fonction des critères

Par ailleurs, on constate que plus de 90% des OT du réseau possède une criticité faible voir très faible. Par conséquent, le patrimoine étudié ne semble pas instable. Cependant, il ne faut pas négliger les 6% d'OT (soit 456 OT) considérés comme très critiques. Ces ouvrages en terre sensibles nécessitent une surveillance renforcée (visites de site) et éventuellement la pose d'instrumentation pour suivre l'évolution de sa stabilité si des désordres sont avérés.

A noter que l'analyse de criticité établie est réalisée à une échelle macroscopique avec uniquement 5 critères et pourrait être améliorée. Tout d'abord, à propos des pentes, celles-ci sont sous-évaluées car les délimitations de l'OT vont au-delà du MNT. En effet, la couche topographique conserve uniquement les pentes supérieures à 18° or parfois, des pixels avec une pente < 18° sont inclus dans l'OT ce qui engendre une valeur moyenne de pente par OT plus faible que la réalité. Quant au taux d'humidité, il a été évalué en période estivale pour éviter les couvertures nuageuses et uniquement en 2020 et 2021.

Enfin, la base de données mérite d'être vérifiée grâce à des visites ciblées sur les ouvrages les plus critiques. Les recherches bibliographiques permettraient également de mieux apprécier les confortements nécessaires (préchargement, adoucissement de pente et risberme).

Pour conclure, l'étude de la criticité des ouvrages en terre du réseau étudié a permis de démontrer que la grande majorité de ce parc d'ouvrages ne semble pas sujet à des risques d'instabilités (glissement / érosion) et que seul 6% des OT nécessitent une visite systématique et le cas échéant une surveillance renforcée.

Une mission sur le terrain de 3 jours a été réalisée après l'étude de criticité pour vérifier la cohérence de la base de données sur un échantillon de 11 talus jugés critiques à très critiques. A l'issue de ces visites ponctuelles, on en déduit que le recensement des OT est correct en ce qui concerne les attributs géologiques et géométriques. L'exploitant a également établi des visites complémentaires sur une centaine de talus. Les notes obtenues sont en cohérence avec les critères définis dans la méthode cependant il est arrivé que des talus de forte hauteur et avec une géologie défavorable ne présentent pas de désordre et soient en bon état général. Ainsi, des critères supplémentaires (notamment sur la conception) permettraient d'avoir une approche plus précise sur l'étude de la criticité.

A noter qu'intégrer les futurs utilisateurs de l'outil dès la phase de création a été très bénéfique. D'une part, les échanges avec les gestionnaires de patrimoine et exploitants, qui ont une connaissance fine de leurs ouvrages, ont été une étape clé dans la construction de la méthodologie et du choix des critères (compréhension des spécificités du secteur et de leurs besoins). D'autre part, leur mise à contribution dès les étapes amont a facilité la prise en la main de l'outil et son intégration dans leur quotidien (faciliter le suivi et prioriser les prochaines campagnes d'inspection).

3 PROGRAMMATION BUDGETAIRE

Les dépenses à enclencher par un gestionnaire d'ouvrages pour maintenir en état son patrimoine peuvent se décomposer en 3 catégories :

- Budget Travaux (toute activité consistant à réparer les désordres recensés sur l'ouvrage) ;
- Budget Etude (investigations et instrumentation) ;
- Budget Entretien (entretien courant et visite biennale).

Pour chacun de ces budgets, a été développée une méthodologie permettant d'évaluer l'enveloppe budgétaire à allouer jusqu'à la fin de concession pour maintenir en bon état son parc d'ouvrages en terre (période 2022-2031).

3.1 Budget travaux

L'historique des dépenses en réparation d'ouvrages du réseau étudié (listing des ouvrages en terre

sensibles) a été un entrant primordial pour la programmation budgétaire. Cet échantillon de 61 OTS ayant fait l'objet d'études et/ou travaux a permis de définir les probabilités d'apparition des principaux désordres rencontrés sur talus.

Type de désordre	Type de travaux préconisés	Nombre d'OT	Répartition (%)	Probabilité d'apparition
Glissement Affaissement	Masque drainant / Travaux de confortement	32	50%	0,50
Erosion Ravinement Solifluxion Lentilles	Travaux de confortement	12	19%	0,19
Animaux fousseurs	Grillage anti-fousseurs	10	16%	0,16
Fissures sur chaussée	Traitement de pontage de la fissure / mortier bitumineux pour combler la brèche	5	8%	0,08
Chute pierre	Grillage plaqué	3	5%	0,05
Effondrement	Travaux de confortement	2	3%	0,03

Figure 6 Répartition et probabilité d'apparition des principaux désordres répertoriés dans la BDD OTS

Ainsi, la ventilation pluriannuelle du Budget Travaux a été produite à partir du tableau ci-dessus et d'une hypothèse forte : en 2022, 30 talus seront en travaux sur le réseau et ce nombre augmentera de 3 % par an.

Le choix de considérer 30 talus en travaux par an a été pris après analyse de l'historique des travaux talus du secteur étudié : en moyenne sur les 6 dernières années, 26 talus sont en travaux par an. L'augmentation du nombre d'ouvrages en travaux par an (+ 3 %/an) permet de prendre en compte le vieillissement du parc. Chaque année, le nombre d'OT en travaux augmente à cause du vieillissement naturel de l'ouvrage et du changement climatique (événements pluvieux intenses et fréquents, succession de période gel/dégel, sécheresse intense, etc). Ainsi, en 2031 le nombre prévisionnel d'OT en travaux s'élèvera à 39.

Le montant de travaux annuel a été défini en croisant le nombre de talus en travaux par an et les probabilités d'apparition des principaux désordres indiqués dans le tableau ci-dessus. La formule (1) du calcul des travaux annuels est détaillée ci-après. Cette formule est ensuite appliquée jusqu'à la fin de concession.

$$P_{tx} * \sum(P_{désordre} * FT_{désordre}) \quad (1)$$

où P_{tx} (%) est le taux d'ouvrage en travaux (en 2022, 30 talus sont en travaux soit 0,4 % du parc total)

$P_{désordre}$ (-) est la probabilité d'apparition du désordre indiquée dans la figure 6

$FT_{désordre}$ (€HT) est le montant forfaitaire du désordre (Glissement, érosion, chute pierres, etc).

3.2 Budget études et entretien

Le budget études concerne les IDP (Inspections Détaillées Périodiques), les diagnostics et l'instrumentation des talus.

Concernant la priorisation, deux scénarios ont été envisagés pour l'estimation du budget études :

- Scénario 1 (investissement bas) : ne traiter que les ouvrages à forte criticité (note 16) tous les 5 ans soit une moyenne de 25-40 inspections par an (ouvrages avec des notes Pente et Hauteur égales à 3 ou 4 acceptées) ;
- Scénario 2 (investissement haut) : Ne traiter que les ouvrages à forte criticité (note 16) mais peu importe leur pente (note 1 à 4) soit une moyenne de 40 à 50 inspections par an.

Pour tous les scénarios, les OTS déjà identifiés par le concessionnaire feront l'objet de la première vague d'inspection (61 IDP d'OTS sur la première année du programme de surveillance).

Les IDP sont obligatoires pour les ouvrages d'art et doivent être renouvelées tous les 6 ans. Cette obligation émise par l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO) ne concerne pas les talus, cependant il est fortement conseillé de suivre ces ouvrages dont la stabilité peut se dégrader rapidement et causer des dommages de grande envergure (guides techniques existants). On a considéré un prix forfaitaire différent selon la hauteur du talus.

A la suite des IDP, des diagnostics peuvent être recommandés pour affiner l'analyse et enclencher des essais en laboratoire. Au regard de l'expertise métier EGIS SE Géotechnique et des données historiques des OTS du réseau étudié, il a été considéré que 10 % des talus soumis à une IDP seront traités par un diagnostic.

Enfin, la dernière prestation à réaliser lors de l'étude d'un talus concerne l'instrumentation (pose de piézomètres, d'inclinomètres ou un relevé topographique). Au regard de l'expertise métier EGIS SE Géotechnique et des données historiques des OTS du réseau étudié, il a été considéré que 5 % des talus soumis à une IDP seront instrumentés. Il s'agit d'un prix moyen comprenant 3 types d'instrumentation (inclinomètres, piézomètres et mesures topographiques) en cohérence avec les montants d'instrumentation déboursés sur les OTS (entre 1 000 €HT et 13 000 €HT pour la pose d'un seul instrument).

Le dernier budget concerne l'entretien des talus. En effet, ces derniers doivent être déboisés, élagués et visités régulièrement pour assurer le maintien en bon état du parc d'ouvrages. Il est fréquent de constater que certains désordres observés proviennent d'un manque d'entretien.

Concernant l'entretien courant (supprimer la végétation aux abords des zones sensibles du talus), il est conseillé d'entretenir régulièrement tous les OT à criticité forte et modérée car les talus à forte hauteur (> 10m) et grande pente (> 30°) présentent un risque plus important d'instabilité et d'apparition de désordres.

Pour les ouvrages à forte criticité (note de 16), seuls sont considérés les talus qui n'auront pas fait l'objet d'IDP dans les 5 premières années puisqu'il est supposé que les OT qui seront inspectés seront élagués en amont des visites. Cette sélection conduit à traiter 1 400 ouvrages tous les 2 ans. Le chiffrage du budget d'entretien est établi en fonction du temps passé des patrouilleurs sur le terrain et il est supposé que chaque OT soit entretenu par une équipe de 2 patrouilleurs sur une demi-journée.

Enfin, les visites biennales des patrouilleurs consistent à visiter en un temps limité une grande quantité de talus pour avoir un suivi régulier. Cette visite permet aux patrouilleurs de cibler les parties sensibles d'un talus et d'énumérer les points de vigilance. Ces visites concernent l'ensemble des talus traités en entretien courant pour que la végétation soit éliminée (700 talus à traiter par an). Il est supposé que chaque OT soit visité par une équipe de 2 patrouilleurs pendant un quart de journée. Ces estimations pourront être affinées en fonction du retour d'expérience du maître d'ouvrage sur le suivi en mode furtif de ces ouvrages. Dans notre cas d'étude, nous ne disposons pas de telles données d'entrée.

3.3 Résultats et perspectives

La somme du Budget Travaux, Etudes et Entretien, permet de définir le budget prévisionnel total à déboursier chaque année pour maintenir en bon état son parc d'ouvrages en terre jusqu'à la fin de concession.

Sur la prochaine décennie, nous estimons un budget prévisionnel global (incluant les travaux, l'entretien et les études) compris entre 16 et 16,7 M€ pour ce réseau autoroutier d'environ 1700 km. Il en ressort que l'enveloppe moyenne à déboursier chaque année oscille entre 1,3 M€ et 1,4 M€ en fonction du scénario considéré. Les données historiques disponibles sur les OTS déjà instrumentés et réparés indiquent qu'en moyenne sur ces 5 dernières années, le montant dépensé est évalué à 1,4 M€/an, ce qui corrobore notre estimation.

A la lecture de la figure 7, on note que les dépenses en travaux représentent la part la plus importante du budget total : 56 % du budget total correspond aux travaux avec un pic à 61% en 2031. En effet, les réparations et le confortement de talus sont onéreux. Le budget entretien prend également une part

importante du budget global (32%). Quant au budget Etudes, il représente une part plus faible (14%).

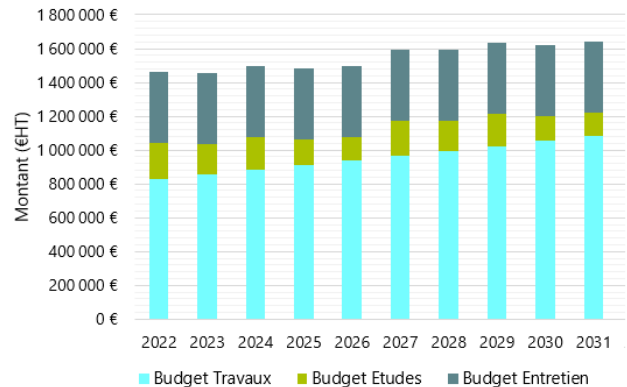


Figure 7 Histogramme des dépenses annuelles en travaux études et entretien pour le scénario 1

Pour la ventilation du scénario 2 détaillée en figure 8, le budget Etudes est plus important puisque 477 OT seront inspectés en 10 ans (contre 338 pour le 1er scénario). Le budget entretien reste identique avec une dépense annuelle de 420 k€ soit 31% du budget prévisionnel global. Il s'agit d'une part non négligeable puisque que cela concerne 1400 talus soit 20% des talus recensés à ce jour. Les études et l'entretien prenant une place importante dans le budget total, la part des travaux est réduite à 54 %.

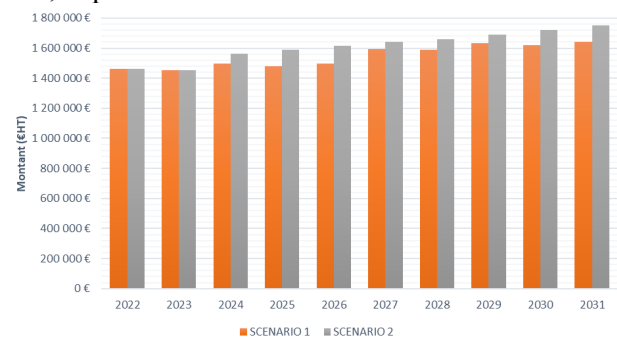


Figure 8 Histogramme des dépenses annuelles en travaux études et entretien pour les 2 scénarios étudiés

La plus-value de cette méthode est d'être paramétrable et évolutive. En effet, toutes les hypothèses considérées peuvent être rectifiées par la réception de nouveaux entrants. La robustesse de cette méthode dépend en partie de la fiabilité des entrants : des entrants plus détaillés et intégrant par exemple la durée des travaux permettront de croiser plus d'informations et ainsi produire une ventilation plus proche de la réalité. Par exemple, les montants travaux des principaux désordres rencontrés sur les talus peuvent évoluer en fonction des prix sur le marché. De même, le nombre de talus en travaux par an peut aussi évoluer suivant les conditions météorologiques et les travaux engagés sur la chaussée.

A l'issue de cette mission et avant de valider le plan de surveillance, il est conseillé de lancer une campagne d'inspection furtive sur les 456 OT avec une criticité globale de 16. Il serait excessif de faire des IDP sur ces 456 talus, ce pourquoi le format de visite plus légère de 2 h par ouvrage à faire par les patrouilleurs est préconisé (visite furtive pour visiter les zones sensibles et identifier les nouveaux désordres). A l'issue de ces visites, la politique talus pourra se réajuster car certains ouvrages en terre seront déclassés.

Les visites réalisées sur le terrain vont permettre d'actualiser la base de données des talus. Pour cela, des patrouilleurs devront mettre à jour la BDD au fur et à mesure des visites et des travaux réalisés. Un autre système plus automatisable permettrait de faire le même travail plus rapidement. Il s'agit de réaliser les visites directement sur des tablettes reliées à un logiciel de gestion de patrimoine. Ainsi, les données acquises sur le terrain sont instantanément renseignées dans la base de données. Pour cela, nous avons développé une application terrain de collecte de données d'inspection d'ouvrages et mis en place une génération automatique des rapports. A titre d'exemple, pour une mission similaire, les équipes terrain ont inspecté 182 ouvrages en 4 semaines avec une livraison de l'ensemble des rapports sous 3 mois. L'application nomade à utiliser sur le terrain, appelée communément WEB SIG, est directement reliée au logiciel SIG ce qui permet de centraliser les données sur un même serveur.

Ces solutions proposées permettront d'optimiser le suivi du parc d'ouvrages en terre en facilitant les visites terrain avec une intégration numérique instantanée des données de terrain sur le logiciel SIG.

4 CONCLUSION

La méthodologie mise en pratique dans ce projet a l'avantage de traiter en temps limité un grand volume de données. L'objectif principal de cette mission est de fournir un outil d'aide à la décision aux gestionnaires de patrimoine et ainsi prioriser les ouvrages en terre pour identifier les plus critiques. Cependant, la méthode appliquée possède à ce stade de développement certaines limites.

Tout d'abord, le recensement automatique est fondé sur un entrant avec une précision hétérogène entraînant des lacunes de détection des talus sur les secteurs à faible précision. Cette limite ne sera plus d'actualité à l'avenir car à partir de 2026, toute la France sera cartographiée avec le relevé LIDAR. Malgré ce frein, le client a fait exécuter des inspections d'une centaine d'OT et confirme la bonne fiabilité du recensement (localisation précise).

Concernant la méthodologie matricielle d'étude de criticité, elle est en accord avec la volumétrie du recensement. Il n'était pas envisageable d'établir une proposition précise d'actions à mener par OT dans le temps imparti. Cependant, il aurait été pertinent de prendre en compte la distance entre le pied du talus et la BAU pour l'étude d'autres aléas comme les chutes de blocs. La variation de température hivernale (cycle gel/dégel) est également un facteur impactant sur la stabilité des talus et mériterait d'être étudiée.

Enfin, une analyse par typologie d'OT (déblais/remblais) et d'aléas sera plus pertinente car les déblais et les remblais ne sont pas soumis aux mêmes types de risque (tassement pour les remblais, chute de blocs et glissement de terrain pour les déblais). Par ailleurs, lorsque des travaux sont terminés sur un talus, la BDD devra être actualisée en diminuant la note de criticité. De plus, pour tirer les bénéfices de cette solution, il faut veiller à ce que la BDD construite à l'issue du recensement soit alimentée en continue par les équipes de gestion de patrimoine pour la rendre fidèle aux évolutions des ouvrages et devenir un outil d'aide à la décision fiable et robuste.

Pour conclure, dans un contexte de renouvellement des concessions françaises, les ouvrages en terre représentent un enjeu important dans les échanges avec les autorités concédantes. Comme indiqué en introduction, les talus sont parfois mis en retrait cependant, grâce à la création de cet outil innovant de recensement, nous facilitons le suivi et la prise de décision concernant la surveillance et la réparation des talus.

A noter que ce projet, déjà développé auprès de plusieurs concessionnaires autoroutiers, peut s'appliquer pour d'autres gestionnaires comme les communes et collectivités territoriales. La méthodologie présentée dans cet article est en effet une première version qui a été affinée par la suite pour une approche plus sélective.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRGM (2021). Recherche InfoTerre, [en ligne] Disponible à l'adresse : [\[Recherche InfoTerre\]](#), consulté le : 08/09/2021.
- Géoportail (2025). Visualisation cartographique-Géoportail, [en ligne] Disponible à l'adresse : [\[diffusionMNxLiDARHD - Ma carte IGN\]](#), consulté le : 29/12/2025.
- Meteociel (2021). Meteociel.fr, [en ligne] Disponible à l'adresse : [\[Meteociel - Météo - observations météo en temps réel et prévisions météo pour la France\]](#), consulté le : 12/09/2021.
- USGS (2021). EarthExplorer, [en ligne] Disponible à l'adresse : [\[https://earthexplorer.usgs.gov/\]](https://earthexplorer.usgs.gov/), consulté le : 01/09/2021.