

La géotechnique au cœur de la préservation et de la maintenance du patrimoine architectural des balmes de Lyon

Geotechnical engineering at the core of preserving and maintaining the architectural heritage of Lyon's balmes

Noah LE THIES¹, Pierre XEMARD¹, Stéphane CURTIL^{*1},

1 GEOTOPIA, Paris-Grenoble, France

**stephane.curtil@geo-topia.fr*

RESUME : L'article vise à présenter la méthodologie développée pour le diagnostic des ouvrages géotechniques situés sur les pentes des coteaux de la ville de Lyon, France (69). Ils sont plus de 700, principalement des murs de soutènement, des parois rocheuses jusqu'à 50 m de hauteur, et des talus naturels ou réaménagés.

Pour chacun d'eux, les reconnaissances de terrain ont permis d'établir une évaluation de l'état des ouvrages visant à identifier les signes précurseurs de désordres puis concevoir et programmer les opérations de surveillance et de maintenance des ouvrages et les éventuels travaux de confortement afin de préserver le patrimoine lyonnais et réduire les risques d'occurrence de sinistres impliquant les usagers.

ABSTRACT: This article aims to present the diagnostic of geotechnical structures located on the slopes of the hillsides of the city of Lyon, France (69). There are more than 700 such structures, mainly retaining walls, rock wall up to 50 m in height, and natural or re-designed slopes.

Diagnostic assessments have been carried out to evaluate the condition of these structures and to plan preventive maintenance. The objective is to identify early warning signs of potential failures and to design and schedule repairs in order to preserve Lyon's heritage and reduce the risk of incidents involving the public.

Mots-clés : soutènement ; risque gravitaire ; diagnostic ; patrimoine architectural ; maintenance.

1 INTRODUCTION

La ville de Lyon a construit et façonné au fil des âges de nombreux ouvrages géotechniques sur les pentes de ses coteaux et versants (les Balmes de Lyon) permettant son urbanisation et le développement des infrastructures.

Dans le cadre de la préservation de son patrimoine architectural, parfois vieux de plusieurs siècles, et de la sécurisation de ses espaces vis-à-vis des usagers, la ville de Lyon procède à des diagnostics périodiques afin de déterminer l'état de dégradation de ses ouvrages et d'établir des priorités à la maintenance préventive. Ainsi, 67 sites, tels que des parcs et jardins publics, des écoles et d'autres sites à caractère public, regroupant plus de 700 ouvrages élémentaires, répartis dans les 1^{er}, 4^{ème}, 5^{ème} et 9^{ème} arrondissements, ont fait l'objet de diagnostics géotechniques détaillés afin de déceler les indices d'instabilité de structures.

Ce travail, réalisé par GeoTopia en 7 mois, se décompose en 3 étapes clés :

- Une phase préliminaire visant à caractériser le contexte géologique, géomorphologique, hydrogéologique, topologique et historique de chaque site a été menée. Des outils de traitement de données ont été mis en place, tels que le géoréférencement de l'ensemble des sites et de leurs ouvrages élémentaires grâce au logiciel Open-Source QGIS ou encore un code Python permettant de recueillir l'ensemble des données récoltées et de générer un document de synthèse par ouvrage. Ce travail préliminaire permet également de déterminer les conditions d'accès de chaque site en établissant des plans de route fiables afin de préparer chaque intervention de terrain.
- Les visites de sites pour le repérage et le diagnostic de chaque ouvrage, répartis en 3 points clés :

description géomorphologique et structurale détaillée, l'implantation et la prise de photos.

- Le travail de traitement des informations post-visite afin d'homogénéiser les informations récoltées, notamment grâce à un outil interne développé en code Python, et de définir les travaux nécessaires à chaque ouvrage et leurs priorités vis-à-vis des enjeux qu'ils représentent.

Il est à noter que le travail réalisé est confronté dans ses analyses et conclusions avec les recommandations provenant d'un premier diagnostic similaire réalisé en 2007 sur certains sites. Nos observations et analyses sont ainsi confrontées aux conclusions du précédent état des lieux afin d'évaluer l'évolution des ouvrages ainsi que la bonne réalisation des travaux de confortement préconisés il y a 18 ans.

2 METHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC

La méthodologie du diagnostic de stabilité géotechnique des 700 ouvrages se divise en 4 parties, détaillées ci-après :

- L'étude préliminaire sur la base des données historique et de bibliographie,
- L'expertise visuelle sur les différents sites,
- La constitution d'une base de données techniques et la formalisation cohérente et homogène des constats techniques,
- L'analyse et la qualification multicritère de la stabilité géotechnique des ouvrages permettant des recommandations de travaux de surveillance ou de maintenance.

En pratique, le diagnostic géotechnique préliminaire visuel d'un très grand nombre d'ouvrages impose la mise en place d'une méthodologie robuste, appliquée systématiquement, garantissant la fiabilité et la cohérence des analyses techniques. Pour ce faire différents outils numériques ont été développés tout en s'appuyant sur des outils publics ou open-source.

Une des difficultés de l'exercice visant à apporter à la Ville de Lyon un diagnostic géotechnique d'expertise visuel robuste et exhaustif est que le géotechnicien se retrouve confronté à une multiplicité d'ouvrages par leur type (mur de soutènement, talus, falaise, versant, ouvrage en maçonnerie, etc.) mais également par leur dimension parfois juste métrique à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Dans ce contexte, les observations et analyses de terrain doivent permettre une approche différentielle argumentée à la fois des risques associés à la stabilité générale des ouvrages (rupture d'ensemble sur le versant), à leur stabilité interne (rupture interne), ou encore à leur stabilité locale par dégradation

ponctuelle sans enjeux sur la stabilité générale ou locale mais pouvant exposer les usagers à la chute de bloc, de pierres, de moellons de maçonnerie ou encore de liant hydraulique ou de plaque de parement ou d'enduit de rupture.

Il est précisé que les diagnostics géotechniques visuels de l'ensemble des ouvrages s'inscrivent dans une démarche plus globale visant à identifier les ouvrages les plus critiques pour ensuite engager la démarche classique et habituelle de diagnostic détaillé de stabilité géotechnique conformément à la norme NF P94-500 de novembre 2013.

2.1 Etudes préliminaires

L'étude préliminaire de site est essentielle pour collecter les informations historiques, qu'elles soient géologiques, hydrogéologique ou liées à la structure des ouvrages anciens en maçonnerie. Elle apporte un socle de compréhension homogène sur le contexte des sites et sur leurs particularités qui permet de fiabiliser les diagnostics tout en optimisant les temps d'intervention sur site.

2.1.1 Implantation des sites

Tout d'abord, l'implantation et le repérage de chaque site sur le logiciel Open-Source QGIS est primordiale pour plusieurs aspects. Elle permet de :

- Valider les limites géométriques du diagnostic dans un contexte parcellaire urbain,
- Visualiser l'implantation des potentiels ouvrages de chaque site pour optimiser les trajets dans les sites mais également entre sites dans une démarche de mobilité optimisée et douce,
- Proposer une évaluation primaire des enjeux selon la topographie et les hauteurs des ouvrages de soutènement et falaises.

La prise en compte de la responsabilité du géotechnicien sur le périmètre de sa mission est fondamentale car les études et diagnostics doivent intégrer, au-delà de la limite administrative, la zone d'influence géotechnique de l'ouvrage. Ainsi tous les ouvrages se situant partiellement à l'intérieur d'un site sont étudiés dans leur intégralité y compris pour leurs parties hors de l'emprise foncière directe. Par exemple, un mur de soutènement appliquant sa fonction sur plusieurs parcelles cadastrales, dont celle étudiée, sera diagnostiqué dans son intégralité, et non uniquement sur la portion strictement incluse dans la parcelle concernée.

De la même manière, lors des missions de diagnostic, toute identification d'une vétusté avancée sur un ouvrage géotechnique d'un site est notifiée au Maître d'Ouvrage. La Figure 1 présente l'implantation de certains des sites étudiés.

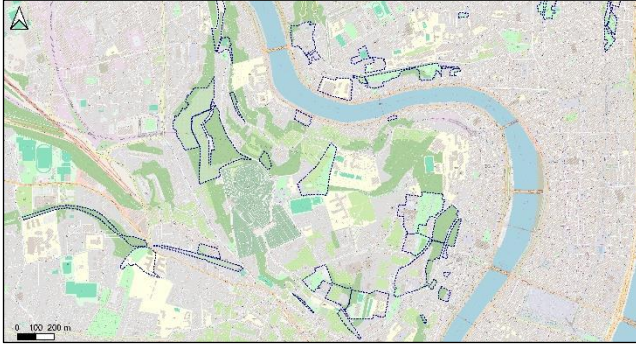


Figure 1. Plan partiel d'implantation des sites étudiés

Ce travail préparatoire a permis d'optimiser la performance de l'expertise sur site d'une part en réduisant les temps mobilisés pour les déplacements entre ouvrages et leur géolocalisation et d'autre part en concentrant les observations d'expertise sur les ouvrages, leur environnement et leurs structures. En effet, la qualité de l'expertise nécessite une parfaite disponibilité. Ne pas être accaparé par les détails matériels de repérage géographique libère du temps et de l'énergie pour mieux appréhender et comprendre la conception historique des ouvrages et identifier les principales pathologies auxquelles ils peuvent être exposés.

2.1.2 Analyse du contexte de chaque site

Dans un deuxième temps a été établi le contexte géologique, hydrologique, topologique et historique de chaque site, afin de récolter le maximum d'information favorisant une compréhension fine de l'environnement, des enjeux et d'orienter ainsi le diagnostic.

La carte géologique au 1/50 000 du BRGM est intégrée dans une couche appropriée et légendée dans la base de données QGIS. Une routine interne permet de générer facilement des extraits de carte géologique avec une légende adaptée, importés dans une fiche de synthèse pour chaque site. Lors de la visite de terrain, le contexte géotechnique est déjà connu et pris en

compte pour le diagnostic et l'évaluation des risques : présence de sols sensibles au phénomène de retrait-gonflement ou aux mouvements de terrain, présence d'une nappe ou d'écoulements souterrains, informations structurales pour les formations rocheuses telles que l'identification des familles de discontinuités, etc.

La Figure 2 présente le contexte géologique des sites présentés en Figure 1.

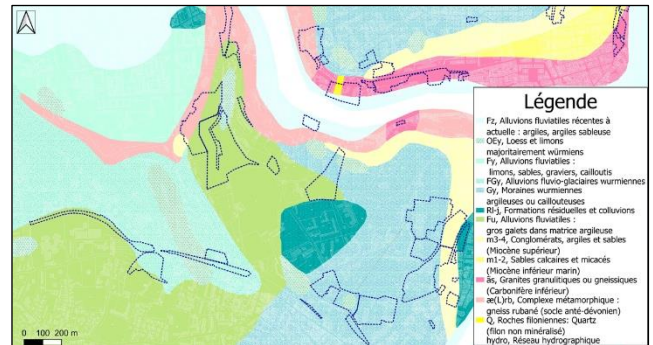


Figure 2. Contexte géologique de certains sites étudiés

2.1.3 Création d'un modèle de fiche synthèse

Afin de synthétiser l'ensemble des données établies dans l'étude préliminaire puis recueillies lors des observations de terrain, il a été décidé d'établir une base de données liée à un modèle de fiche de synthèse par ouvrage, permettant une édition et des corrections automatisées lors du post-traitement des données brutes de site.

Cette fiche est découpée en 2 parties. La première (à gauche sur la Figure 3) synthétise toutes les données générales relatives au site, et notamment sa localisation, le contexte géologique et historique déterminés lors de la phase préliminaire. La seconde partie (à droite sur la Figure 3) intègre l'ensemble observations de terrain : données géotechniques et synthèse du diagnostic préliminaire de terrain de l'ouvrage élémentaire.

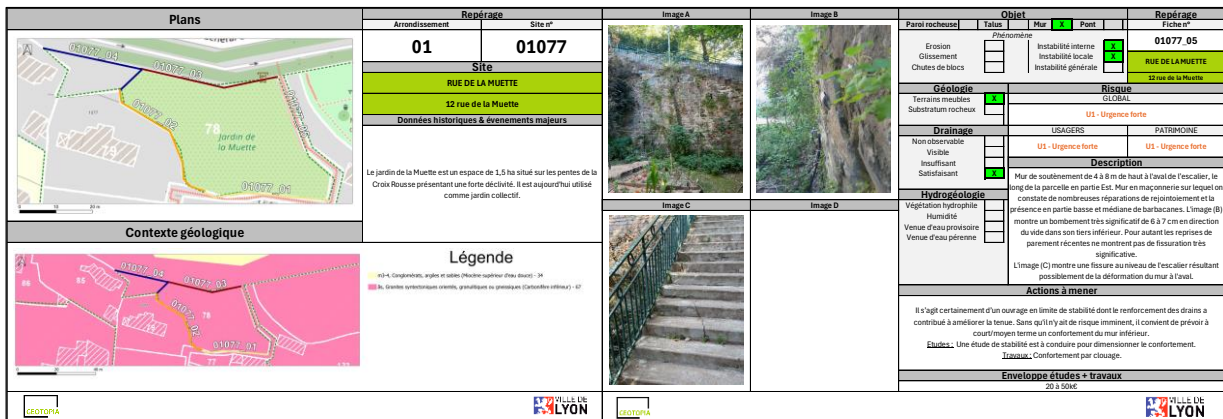


Figure 3. Modèle de fiche synthèse par ouvrage

2.2 Visite sur site

2.2.1 Préparation des accès aux sites

Les contraintes et autorisations d'accès à chacun des sites étudiés sont identifiées au préalable en collaboration avec les occupants des sites (jardins partagés, établissements scolaires, etc.) et le Maître d'Ouvrage ; les opérations de défrichage préalables permettent une observation détaillée de l'ensemble des ouvrages.

2.2.2 Implantation

L'implantation des ouvrages joue un rôle clé pour une étude de cette ampleur, car elle permet d'une part d'identifier chaque mur de soutènement, paroi rocheuse, pont ou talus étudié de manière claire et précise afin d'éviter toute confusion lors du post-traitement et d'autre part, de servir de support pour les futures opérations d'études ou de travaux.

Ainsi, après une implantation provisoire en phase préliminaire évoquée en §2.1.1, une seconde implantation, plus précise, est réalisée sur site : l'implantation des ouvrages est adaptée en fonction des repères alentours visibles sur les plans ou en fonction de leurs évolutions potentielles, comme un mur de soutènement partiellement ou complètement détruit, ou encore un talus dont l'emprise aurait été augmentée ou diminuée.

La Figure 4 présente un exemple d'implantation des ouvrages d'un site étudié. Les figurés linéaires peuvent représenter des murs de soutènement, des parois rocheuses ou des ponts, tandis que les figurés surfaciques peuvent représenter des talus, des dépressions ou des affleurements rocheux.

Ce travail de synthèse sur les implantations des ouvrages élémentaires constitue le cœur de la base de données qui servira au Maître d'Ouvrage pour la gestion future de son patrimoine des Balmes de Lyon.

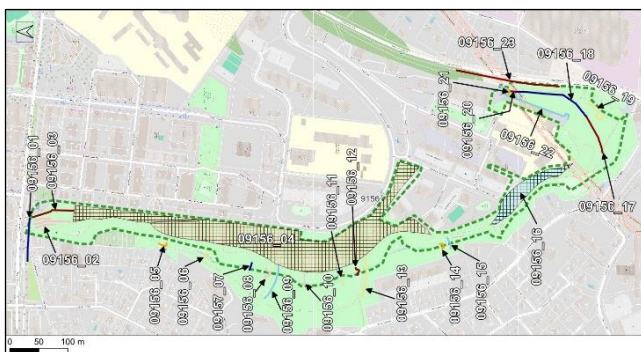


Figure 4. Implantation des ouvrages du site du parc du Vallon

2.2.3 Description des ouvrages

La description visuelle des ouvrages sur site par un expert en géotechnique permet d'établir le diagnostic préliminaire de l'état de stabilité géotechnique de l'ensemble des ouvrages.

Les ouvrages sont répartis en 4 catégories : les murs de soutènement, les talus, les parois rocheuses et les ponts.

Ensuite, la géologie est étudiée, en relation avec le travail préliminaire et le contexte géologique de la zone référencée en amont de la description. Cela permet d'identifier les principales caractéristiques des ouvrages et d'identifier les potentielles origines possibles des désordres.

Prenons par exemple le cas d'un mur de soutènement, l'interprétation de fissures ou d'un déversement sera totalement différente s'il est fondé soit sur un terrain meuble ou sur le substratum rocheux. De même selon la géologie des terrains à l'amont, les interprétations des désordres géométriques et structuraux pourront conduire à un diagnostic différent selon les conditions des écoulements souterrains attendus.

Vient ensuite la description détaillée de chaque ouvrage et de ses caractéristiques propres ; par exemple, pour un mur de soutènement : matériaux de construction, nature des liants et état de vieillissement (pierres maçonnées, béton armé, pierres sèches, gabions, ...), hauteur, hauteur soutenue, emprise, présence de fissures, de déversement, de bombements, de tassements ou tassements différentiels et toutes anomalies susceptibles de révéler une dégradation des conditions de stabilité.

En complément, l'analyse intègre des détails quant à la temporalité des désordres observés : un désordre très ancien (dizaines à centaine d'années), non évolutif sera considéré comme moins préoccupant qu'un désordre récent évolutif. La prise en compte des travaux de confortement ancien et de leur efficacité dans le temps complète les données d'entrée permettant d'établir le diagnostic préliminaire de stabilité.

Une attention particulière est également portée aux conditions de drainage, de collecte des eaux et à l'entretien réellement mis en place. Les conditions hydrogéologiques et les ouvrages de gestion des eaux sont décrits : présence de barbacanes pour un mur de soutènement, obstruction ou non, présence de traces d'humidité et d'écoulements, présence de système de cunette à l'amont permettant une meilleure collecte et évacuation des eaux, ou encore si des trajets préférentiels d'écoulement des eaux, causant parfois des désordres, sont observés.

Une part importante des ouvrages de soutènement, s'ils ont été correctement conçus et construits, n'ont

pas fait l'objet de campagne d'entretien systématique dans le temps de telle sorte qu'il est souvent constaté des dégradations de l'efficacité des systèmes de gestion des eaux à l'origine de désordres et de dégradations de la stabilité.

La Figure 5 présente le désordre d'un mur de soutènement lié à un défaut d'écoulement des eaux du fait d'un mauvais drainage. L'eau, n'arrivant pas à être évacuée par les barbacanes, a tracé des chemins préférentiels d'écoulement sous la base du mur, entraînant une érosion interne des matériaux et un tassement différentiel causant de nombreuses fissures. La création d'un système de cunette à l'amont associé à un renforcement du nombre de barbacanes a été préconisé en complément de la réparation classique des fissures et du parement.



Figure 5. Fissurations d'un mur de soutènement liées à un défaut de gestion des eaux à l'amont

Pour un talus, la description intègre sa hauteur et ses pentes, la présence de végétation favorisant la stabilité de surface, les indices d'évolution récents ou anciens des talus, les travaux de confortement de type clouage, la mise en place de grillages plaqués ou de géotextiles ainsi que la qualification de l'efficacité des travaux de confortement anciens.

Sur les pentes non entretenues la présence d'une végétation envahissante impose un quadrillage fin de la zone pour de déceler les signes précurseurs d'instabilité.

La Figure 6 présente un talus diagnostiqué présentant des signes d'instabilité, repérés notamment grâce à plusieurs arbres inclinés marqueurs

d'instabilité de surface : courbures résultant d'une croissance sur un terrain en mouvements.



Figure 6. Exemple d'un arbre ayant poussé dans un talus en mouvement

Concernant les parois rocheuses, leur description relève principalement de l'analyse structurale (familles de discontinuités) et de la mécanique des roches : géologie structurale, fracturation, diaclases qui sont décrites et identifiées individuellement puis en familles (orientations, extension, espacement, épontes, altération, etc.) de manière à définir les mécanismes cinématiques de déformation et évaluer les risques de chutes de blocs. Il est noté le rôle déterminant de la végétation poussant dans les diaclases qui est à l'origine de la majorité des déclenchements de nouvelles instabilités.

La description de parois rocheuses passe également par la prise en compte des travaux de confortement anciens : clous, tirants d'ancrage ou grillage. La Figure 7 présente une paroi rocheuse d'environ 25 m de hauteur diagnostiquée au cours de la mission.

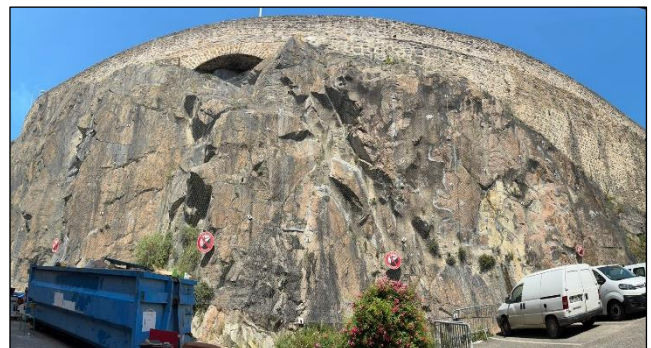


Figure 7. Exemple d'une paroi rocheuse diagnostiquée

Enfin, concernant les ponts, les données collectées comprennent : leurs principales dimensions, la nature des matériaux de construction (pierres maçonnées, béton armé, bois, etc...), puis leurs

conditions de fondation. Les désordres géométriques sont ensuite recherchés et décrits (fissure, déformations, évolution des liants, etc.) pour évaluer le niveau de stabilité géotechnique. La Figure 8 présente un pont en pierres maçonnées diagnostiqué.



Figure 8. Exemple d'un pont diagnostiqué

Enfin, la description des enjeux situés dans la zone d'influence géotechnique de l'ouvrage complète le diagnostic sur site de manière à alimenter la matrice de criticité puis la matrice de décision des actions à engager en priorité par la Commission des Balmes. Un ouvrage situé au milieu d'un terrain inoccupé et dont l'accès est fermé au public, malgré un état de dégradation et d'instabilité avancé, pourra ne pas être traité avec la même urgence qu'un ouvrage dont l'état de stabilité est moins précaire mais situé dans un site accueillant du public.

2.2.4 Etat de référence des ouvrages

En complément de la mission de diagnostic d'expertise visuelle des ouvrages, il a été constitué une base de données de photographies complétant efficacement et sans biais d'appréciation, les descriptions géotechniques des ouvrages. En effet, l'expérience montre qu'il est extrêmement difficile de qualifier les évolutions lentes et progressive des ouvrages géotechniques, pourtant essentielles pour l'établissement des diagnostics de pathologie de vieillissement. Les principales sont incluses au sein de la fiche synthèse de chaque ouvrage.

Dans une démarche d'optimisation des process et des traitements ces photos sont prises via l'application mobile SCOUT développée par le CEREMA, qui permet le suivi du cheminement sur site, la géolocalisation précise des photographies, avec le repérage automatique de la direction de prise de vue, puis, avec programmation d'un code Python, la répartition automatique des photos dans chaque dossier d'ouvrage élémentaire, réduisant très fortement le temps imparti aux tâches fastidieuses à faible valeur ajoutée technique.

Une ou deux photos d'ensemble présentent l'ouvrage dans son ensemble et les enjeux alentours, puis deux ou trois photos d'éléments particuliers décrits dans l'analyse illustrent la description : fissures, barbacanes obstruées, glissements de terrains, chutes de blocs, et bien d'autres phénomènes.

L'ajout d'une échelle permet à une personne n'ayant pas vu l'ouvrage d'appréhender rapidement la géométrie de l'ouvrage, son orientation, les enjeux et les désordres relevés sur site. L'expérience montre toutefois, qu'en site urbain dense il n'est pas toujours évident de retranscrire parfaitement en photo ce qui est observé sur terrain : manque de recul pour prendre une vue d'ensemble, angle de photo difficile à avoir pour caractériser les bombements, fissures situées en hauteur nécessitant un zoom dégradant la qualité de l'image, etc. La multiplication des prises de vue, sous réserve d'une bonne géolocalisation, permet cependant de réduire ces contraintes et offre toujours la possibilité d'une exploitation future en cas de constat d'aggravation de désordres.

2.3 Traitement automatique des données

Une fois les visites de diagnostic sur site réalisées, le traitement de l'ensemble des données pour constituer la base de données globale des ouvrages se fait par application de critères de notation, homogènes et prédéfinis pour chaque paramètre relevé sur site. Cette démarche garantit l'homogénéité des diagnostics.

Pour ce faire, le traitement des données recueillies en phase préliminaire et sur site est assuré de manière semi-automatique au moyen d'un code Python développé en interne pour intégrer des descriptions sous format audio convertis en texte, des photographies et des plans d'ouvrages pour créer finalement un document de synthèse homogène par ouvrage. L'outil d'automatisation traite les données en deux temps. Tout d'abord, les informations récoltées en phase préparatoire ainsi que les plans d'implantation et cartes géologiques du site sont directement intégrés au livrable final.

Puis vient l'étape d'intégration des informations récoltées lors de l'expertise de terrain qui sont traitées par le code Python afin d'identifier automatiquement les descriptions et données et les classer selon les différents thèmes et domaines dans la base de données générale du projet. Pour cela le programme, grâce à un système de mots-clés prononcés sur le terrain, répartit les informations techniques de diagnostic au sein de la base de données générale. Par exemple, pour cocher la case correspondante au type d'ouvrage étudié, lors de la création de la description audio sur site, le mot-clé « Objet » est prononcé suivi de « mur », « talus », « paroi rocheuse » ou « pont » ; le programme

complète alors automatiquement la base. Pour ce qui est de la description de l'ouvrage ou des actions de maintenance à prévoir, les mots clés « Description » ou « Action à mener » permettent de renseigner automatiquement la base avec l'ensemble du texte situé après.

Ce traitement automatique des données pour constituer une base de données apporte est un gain de temps important dans la formalisation des diagnostics des 700 ouvrages. Cette optimisation opérationnelle forte permet de mobiliser plus de ressources sur l'analyse technique de fond. Pour autant elle ne dispense pas de la phase de contrôle interne et de validation de chaque fiche de synthèse par un expert géotechnicien qui apporte le regard critique de l'expérience.

Le contrôle interne intègre également la vérification de la cohérence des données provenant des différentes phases d'études : les diagnostics anciens de 2007, l'implantation en photo aérienne sur QGis, l'implantation réalisée sur site, ainsi que les compléments d'observations sur les différents sites.

3 DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE

3.1 Méthode générale de diagnostic

La méthodologie des diagnostics géotechniques visuels préliminaires des 700 ouvrages s'est donc organisée avec :

- Recueil et synthèse homogène des données,
- Identification des désordres visibles à toutes les échelles et qualification des niveaux de criticité de désordres par analyse multicritère (stabilité générale, stabilité interne, structure, etc.),
- Identification des indices d'évolution de la stabilité des ouvrages (stabilité interne et externe)
- Qualification du niveau de risque d'évolution des désordres à court, moyen et long terme,
- Qualification du niveau de stabilité géotechnique de l'ouvrage par combinaison entre criticité des désordres et zone d'influence géotechnique : allant de désordres graves mais localisés à désordres mineurs mais généralisés par exemple,
- Attribution d'une note globale de diagnostic de stabilité géotechnique

Cette démarche d'analyse permet d'établir le diagnostic géotechnique préliminaire basé uniquement sur des observations d'expertise de site, sans dimensionnement, ni rétro-analyse ou calcul de stabilité. Il dresse un recensement et une classification du risque géotechnique associé aux 700 ouvrages identifiés dans les Balmes de Lyon. L'exploitation des

résultats de cette phase de diagnostic se poursuivra après identification des ouvrages les plus critiques.

3.2 Analyse de risque – Priorité d'intervention

En pratique, une fois le diagnostic géotechnique préliminaire sur site réalisé, l'analyse est poursuivie en intégrant la sensibilité de la zone d'influence géotechnique, c'est-à-dire la prise en compte des impacts sur les avoisinants résultant d'une défaillance d'une partie ou de tout l'ouvrage.

L'analyse de risque qui permet de définir un niveau d'urgence pour les opérations de maintenance porte sur 2 paramètres principaux : d'une part le niveau de risque pour le patrimoine, c'est-à-dire l'ouvrage en lui-même et ses voisins et d'autre part le niveau de risque pour les usagers, c'est-à-dire la prise en compte du risque de mise en danger des personnes en cas de rupture de l'ouvrage. Les priorités sont classées selon 5 niveaux :

- U0 : Urgence immédiate
- U1 : Urgence forte
- U2 : Urgence moyenne
- U3 : Urgence faible
- U4 : Urgence nulle

Ce système de classification des urgences permet d'identifier les ouvrages à traiter en priorité mais également de définir des délais d'intervention encadrés afin de prévoir et programmer les travaux nécessaires pour la ville de Lyon :

- U0 : Intervention d'urgence
- U1 : Intervention à court terme (< 2 ans)
- U2 : Intervention à moyen terme (2 à 10 ans)
- U3 : Intervention à long terme (> 10 ans)
- U4 : Aucune intervention prévue

3.3 Programmation de la maintenance

Le diagnostic de stabilité géotechnique par ouvrage sert ensuite pour les ouvrages les plus critiques à définir, de façon préliminaire, les natures d'actions à engager, leur enveloppe financière et le critère d'urgence.

Pour les sites relevant d'une classification U0 à U2, il est défini la nature et le périmètre des études géotechniques complémentaires à réaliser pour la poursuite des études et pour la préservation des ouvrages. Deux orientations sont retenues :

- La maintenance légère et l'auscultation (suivi de fissures, inclinomètre, suivi topographique de précision, etc.), pour les ouvrages avec désordres simples et risques moyens, dans un objectif de préservation du patrimoine et d'analyse de

l'évolution des parties d'ouvrage avec désordres mineurs dans le temps,

- Des travaux de réparation, de mise en sécurité ou encore de de préservation du patrimoine, pour les ouvrages présentant un niveau de risque plus important. Pour ces ouvrages sont alors définies les études géotechniques complémentaires à prévoir : diagnostic géotechnique détaillé (mission G5) puis conception géotechnique (missions G2) des travaux de réparation et confortement.

Prenant en compte le caractère ancien et historique des principaux ouvrages, la démarche de conception s'orientera alors préférentiellement vers des réparations plutôt que vers des techniques de reconstruction, en privilégiant les matériaux en place et l'utilisation des techniques de construction traditionnelles, afin de conserver l'identité des sites.

Les opérations de maintenance sont généralement peu variées avec l'élimination de la végétation, des purges, des reprises de maçonnerie et de l'entretien des dispositifs de drainage par exemple. Certains ouvrages (mur, talus, falaises) devront également être confortés par clouage avec ponctuellement mise en place de grillages plaqués. Les ouvrages de soutènement plus endommagés feront l'objet d'études spécifiques de confortement intégrant la conception géotechnique et le confortement structurel interne (reprise des fissures, renforcement par inclusions armées verticales, injections de régénération de maçonnerie, etc.).

4 CONCLUSIONS

Le développement d'une méthodologie robuste de diagnostic géotechnique a permis à GeoTopia de réaliser une analyse préliminaire des risques géotechniques associés aux 700 ouvrages élémentaires du patrimoine des Balnes de la ville de Lyon.

La classification systématique des niveaux de risques géotechniques des ouvrages permet maintenant à la ville de Lyon de mettre en place des

outils de surveillance adaptés, de poursuivre la planification de la maintenance et surtout, pour les ouvrages à niveau de risque le plus important de planifier les études et travaux de confortement et réparation.

Enfin au-delà de la simple analyse technique, l'utilisation systématique d'outils numériques a permis la constitution d'une base de données qui servira, à l'avenir, de socle pour le suivi et la maintenance préventive des ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- David L. (1967). Formations glaciaires et fluvioglaciacaires de la région lyonnaise. Imprimeur-éditeur Département des sciences de la Terre, faculté des Sciences de Lyon, pp 60.
- Noury G., Rey A (2022). L'intérêt d'un diagnostic historique approfondi : la sécurisation d'un éboulement à Montbazou (37). Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lyon, France.
- Pothier C., Chappart C., Vinet L., Bouillod N. (2020). Les collines de la Ville de Lyon : notes géologiques, JNGG2020, Lyon (France).
- Pothier C., Vinet L., Bouillod N., Bounpraseuth O. (2022). Les fontis de la Ville de Lyon entre 1960 et 2009 : typologie et causes. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Lyon, France.
- Vinet L., Kastner R., Laréal P., Mangereau N. (1993). Versants des collines de la ville de Lyon : méthodologie de la prévention des accidents géotechniques. Revue Française de Géotechnique, n°64, pp. 67-69.
- Vinet L. (1991). Typologie et prévention des risques et accidents géotechniques en site urbain : les collines de la Ville de Lyon entre 1977 et 1990. Thèse Laboratoire Géotechnique Lyon : INSA de Lyon.