

Vers une modélisation géologique 3D pour la gestion des risques géotechniques en zones de balmes Lyonnaises.

Towards 3D geological modelling for geotechnical risk management in the Lyon balmes areas

Catherine Pothier^{1,*}, Hervé Tronchère-Cottet², Christophe Rigotti¹, Claire Clement³, Louis Vinet⁴

¹ Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information
INSA Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, LIRIS, UMR5205, 69621 Villeurbanne, France

² Direction de l'archéologie de la Ville de Lyon, UMR CNRS 5600 EVS Lyon, France

³ Direction Prévention Sécurité de la Ville de Lyon, France

⁴ Expert Géologue, Sans laboratoire, France

*catherine.pothier@insa-lyon.fr

RESUME : La ville de Lyon compte deux collines fortement urbanisées, dont la topographie des balmes (pentes abruptes) a été très modifiée au fil des siècles. La géologie de ces collines est complexe et inclut notamment des alternances de couches perméables et imperméables. Certaines couches sont parcourues par des structures souterraines du type galeries de drainage parfois reconnues et confortées ou totalement oubliées. La topographie, la géologie particulière et la présence de galeries font que ces zones sont le siège d'instabilités gravitaires (glissement de terrains, fontis...) depuis de nombreuses années. Pour faire face à cette problématique, un modèle géologique en 3D a été développé pour mieux comprendre et gérer ces aléas sur une zone de la colline de la Croix-Rousse. Une base de données stratigraphique a été créée avec des sources hétérogènes (bases de données publiques, données provenant de nombreuses sociétés privées d'expertises géotechniques, travaux universitaires...) comprenant plus de 600 limites de couches et inclinaisons géoréférencées. La bibliothèque open source GemPy développée en Python a été utilisée pour créer par interpolation un modèle 3D de la stratigraphie de la colline. La topographie de la zone a ensuite été ajoutée. Le modèle obtenu montre avec précision la répartition et l'agencement des différentes couches géologiques en trois dimensions. Cette vision d'ensemble de la géologie en 3D est cruciale pour la gestion du risque en amont des projets de construction ou lors de la gestion en cas d'accident, et contribue ainsi à la sécurité des zones habitées.

ABSTRACT : The city of Lyon has two heavily urbanized hills, where the topography of the *balmes* (steep slopes) has been significantly modified over the centuries. The geology of these hills is complex, notably including alternating permeable and impermeable layers. Some of these layers are traversed by underground structures, such as drainage galleries, which are sometimes identified and reinforced, or in other cases, completely forgotten. The topography, unique geology, and the presence of galleries make these areas prone to slope instability (landslides, sinkholes, etc.) for many years. To address this issue, a 3D geological model was developed to better understand and manage these hazards in an area of the Croix-Rousse hill. A stratigraphic database was created using heterogeneous sources (public databases, data from numerous private geotechnical firms, academic research, etc.), including over 600 georeferenced layer boundaries and orientations. The open-source Python library GemPy was used to create a 3D stratigraphic model of the hill through interpolation. The topography of the area was then integrated. The resulting model accurately displays the distribution and arrangement of the various geological layers in three dimensions. This comprehensive 3D geological overview is crucial for risk management prior to construction projects or during emergency response, thereby contributing to the safety of inhabited areas.

Mots-clés : modélisation ; 3D ; géologie ; risques ; balmes ; Lyon

1 INTRODUCTION

Dès l'Antiquité, le développement urbain de Lyon — *Lugdunum* — s'est structuré autour de ses reliefs dominants : les plateaux de la Croix-Rousse au Nord et celui de Fourvière à l'Ouest. Si ces hauteurs ont constitué les premiers pôles d'implantation des habitants, l'expansion progressive de la cité a contraint à l'occupation des versants escarpés, localement désignés sous le terme de « balmes ». Cependant, au fil des années, ces balmes ont été retravaillées, entaillées pour accueillir les nouveaux aménagements urbains. La géologie complexe, l'existence de galeries de drainage oubliées dans ces collines et la topographie remaniée font que ces balmes sont le siège d'instabilités gravitaires récurrentes (glissement de terrains, coulées boueuses, éboulements rocheux, affaissements de sol ou fontis liés à des cavités/galeries souterraines...). Depuis la catastrophe du glissement de terrain sous Fourvière en 1930 (40 morts), ces zones sont placées sous surveillance par la Ville de Lyon et ont été classées en ZRG (Zone à Risques Géotechnique) en 1982. La Croix-Rousse fut aussi le lieu de glissements de terrains meurtriers comme ceux d'Herbouville/St Claire en 1932 (30 morts) et en 1977 (3 morts).

Parallèlement à cette surveillance du territoire, la connaissance de la géologie du sous-sol lyonnais s'est considérablement approfondie du début du XIX^e siècle à nos jours (David, 1966 ; Mandier, 1987). Cette progression s'appuie sur des analyses et des synthèses portant sur les formations glaciaires et fluvioglaciales, ainsi que sur l'élaboration de modèles de synthèse (Vinet, 1991 ; Mongereau, 2010). Néanmoins, des incertitudes et des divergences d'interprétation subsistent, tant il demeure complexe de reconstituer avec précision la chronologie des événements géologiques.

Cet article, après avoir décrit la géologie générale de la colline de la Croix-Rousse, a pour objectif de présenter la démarche de sa modélisation géologique 3D. Le but de cette modélisation est d'améliorer la connaissance du sous-sol et de permettre une meilleure cartographie des zones à risques potentiels.

2 CONTEXTE HYDRO-GÉOLOGIQUE DE LA CROIX-ROUSSE

2.1 Description du contexte géologique

Situé à l'interface du Massif Central et des Alpes, le site de Lyon doit sa configuration actuelle à l'existence d'un fossé d'effondrement tectonique ayant affecté la région dès le début de l'ère Tertiaire (Oligocène). Ce réceptacle s'est progressivement comblé jusqu'au Pliocène, suivant une séquence sédimentaire passant d'un

contexte continental à marin, pour finir par un retour au régime continental. À l'Ouest, elle repose sur les derniers reliefs du Massif Central, constitués d'un socle cristallophyllien ancien. À l'Est, elle surplombe un empilement complexe de sédiments issus de la « mer de la Molasse » péri-alpine.

Au Miocène, ce comblement est marqué par des argiles conglomératiques et des sables mollassiques. La transition vers le Pliocène voit l'installation d'environnements lacustres et deltaïques, déposant des séries d'argiles siliceuses (jaunes), graveleuses (bariolées vertes et marrons) puis limoneuses. La fin du Pliocène est caractérisée par le dépôt d'argiles grises de type bressan, suivi d'un comblement détritique massif par des matériaux alpins (cailloutis argileux plio-villafranchiens). C'est à cette période qu'apparaît le réseau hydrographique précurseur, amorçant le découpage du relief actuel.

Au Quaternaire, la dynamique est dictée par les cycles glaciaires alpins. Plusieurs pulsations de l'inlandsis atteignent la région lyonnaise, s'étendant jusqu'à l'ouest de la vallée du Rhône. Ces avancées déposent des complexes morainiques (argiles et moraines caillouteuses à blocs) qui viennent napper et figer la structure des reliefs préexistants.

Lors du retrait des glaces, un saupoudrage de sédiments éoliens (loess et lehm) recouvre les moraines et les plateaux, tandis que l'érosion fluviale entame son travail de sculpture finale.

La Saône façonne alors son tracé actuel, creusant un méandre encaissé qui sépare physiquement la colline de la Croix-Rousse de celle de Fourvière. Parallèlement, le Rhône dépose ses alluvions dans la plaine de l'Est, alors que des colluvions morainiques se stabilisent sur les versants. L'ensemble de ces informations sont résumées dans le log stratigraphique de la figure 1. La colline de la Croix-Rousse culmine de nos jours à 254 m NGF (Pothier 2022).

2.2 Description du contexte hydrogéologique

La colline de la Croix-Rousse comporte trois aquifères majeurs. En bas de la colline, le socle cristallin contient un aquifère de fracture. La circulation d'eau y est dictée par la densité et l'ouverture des discontinuités tectoniques. En haut, se trouve un mélange de moraines argilo-caillouteuses (peu perméables) et de lentilles de cailloutis et sables alluvionnaires (très perméables) ce qui forme un système complexe et hétérogène, où les eaux circulant préférentiellement dans les lentilles sableuses, piégées entre des niveaux plus argileux (Vinet 1991). Ce système présente souvent des caractères de nappes captives ou semi-captives localisées. Les couches argileuses du Miocène et du Pliocène créent aussi des acquifères captifs dans lesquels,

depuis l'époque romaine, l'Homme creuse des galeries de drainage pour capter l'eau. Ces galeries ont une longueur variable allant de quelques mètres à des réseaux complexes de plusieurs centaines de mètres. Malheureusement, la localisation de ces ouvrages n'est plus connue suite à son remplacement par le réseau public de distribution d'eau à la fin du XIXème siècle et à la non-consignation des informations les concernant. Ces ouvrages dès lors non entretenus deviennent les vecteurs de circulation d'eau non contrôlée, pouvant accélérer la décompression des terrains environnants et créer des fontis ou des mouvements de terrain.

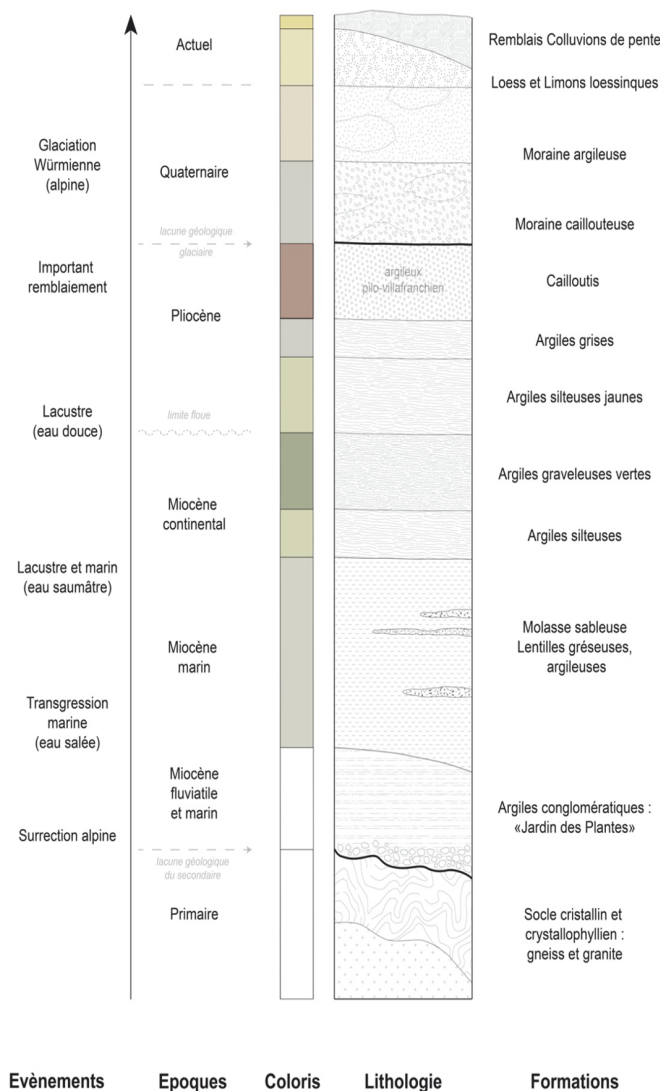


Figure 1. Log stratigraphique de la colline de la Croix-Rousse

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 Bases de données utilisées

Afin de réaliser un modèle géologique 3D le plus précis possible, plusieurs bases de données ont été consultées. La première, gérée par la Ville de Lyon, a été créée en 1986. Elle regroupe l'ensemble des sondages effectués depuis cette date sur le secteur de la Croix-Rousse. Des données issues d'une campagne d'investigation de 1964 (Russo 1964) ainsi que de travaux plus anciens ont été également intégrées. Cette base est enrichie annuellement d'une trentaine de nouveaux sondages (carottés ou destructifs avec prélèvements), provenant des dossiers instruits mensuellement par la Direction Sécurité et Prévention (permis de construire, déclarations préalables, etc.). Elle intègre par ailleurs les sondages verticaux et horizontaux — dont le plus long dépasse 380 m — réalisés en 2009 lors des études de reconnaissance pour le doublement du tunnel de la Croix-Rousse. La nomenclature des horizons géologiques utilisée dans cette base émane des interprétations effectuées au fil des années par les géologues de l'INSA de Lyon. Cette base de données fait partie d'une application plus globale de la cartographie des risques sur la Ville de Lyon gérée par la Direction Sécurité et Prévention de la Ville de Lyon. Les incidents (glissements de terrains, fontis...) sont aussi répertoriés dans cette base ainsi que l'ensemble des permis de construire instruits. La figure 2 représente en 3D les différents sondages de la base de données de la Ville de Lyon.

La seconde source utilisée est la Banque du Sous-Sol (BSS) du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) accessible en ligne, essentiellement pour la zone du plateau de la colline de la Croix-Rousse. Les sondages sont parfois interprétés mais la nomenclature des couches géologiques est différente de celles de la Ville de Lyon. De ce fait un important travail de réinterprétation et homogénéisation a été nécessaire, cette étape a pris plusieurs mois pour assurer la conformité des étiquettes des couches.

En complément, des sondages géologiques ont été extraits à partir d'études anciennes, réalisées dans le cadre de grands travaux dans la zone d'étude comme la coupe du tunnel de la rue Terme (1862), la coupe de la montée de la Grande Côte (1977), du tunnel du funiculaire de Croix-Paquet (1890)...

3.2 Fusion des bases de données.

Une étape importante de nettoyage et de consolidation des données a ensuite été effectuée sur la base de données de la Ville de Lyon, cette base ayant été remplie durant presque 40 ans par différents géologues universitaires sans exploitation globale. Les différentes sources ont ensuite été fusionnées en utilisant comme référence la nomenclature des couches géologiques de la base de données de Ville de Lyon. Ce choix permet

d'avoir une nomenclature adaptée au contexte local et très pertinente pour les experts du site. Il résulte toutefois dans un grand nombre de couches, correspondant à un niveau de détail pouvant nuire à la lisibilité de la base pour son usage prévu. Certaines couches ont alors été réunies lors de la constitution de la base de données globales, tout en permettant de conserver l'alternance des couches perméables et imperméables et aussi de différencier les natures des terrains dans l'approche de la gestion du risque. Le tableau 1 résume les 11 couches principales gardées, par exemple les deux familles de moraines caillouteuses et argileuses ont été fusionnées. Dans la base globale, chaque forage est considéré comme une succession de limites de couches (interfaces entre deux strates, en haut le toit et en bas le mur), chacune possédant des coordonnées XYZ dans un système de projection géographique standard (RGF93 v1 / CC46 – EPSG : 3946). Dans le cas où les données sont connues, l'orientation et le pendage de la couche sont aussi indiquées, sinon par défaut l'orientation est mise à Nord 0 et le pendage horizontal. Ainsi un ensemble de plus de 300 sondages a été traité ce qui représente sur la partie ouest de la colline de Croix-Rousse plus de 600 limites de couches et environ 200 sur la partie est, cette dernière zone étant le siège de moins de constructions et d'un rocher plus affleurant.

Il faut cependant noter que les sondages sont de profondeurs variables allant de 6 m à plus de 80 m en partant de la surface, de ce fait les interfaces entre certaines couches sont moins représentées.

Tableau 1. Couches géologiques retenues

Couche géologique	Code et couleur	Id
Remblais	remblais	1
Limon / lehm	limon000	2
Alluvions	allusore	3
Moraine	morarcog	4
Argile miocène-pliocène	argmipli	5
Argile jaune limoneuse	argjauli	6
Argile graveleuse miocène (verte bariolée)	arggrami	7
Argile silteuse miocène	argsilmi	8
Sable molassique miocène	sabmolmi	9
Formation du Jardin des Plantes	argcolmi	10
Socle cristallin	basement	11

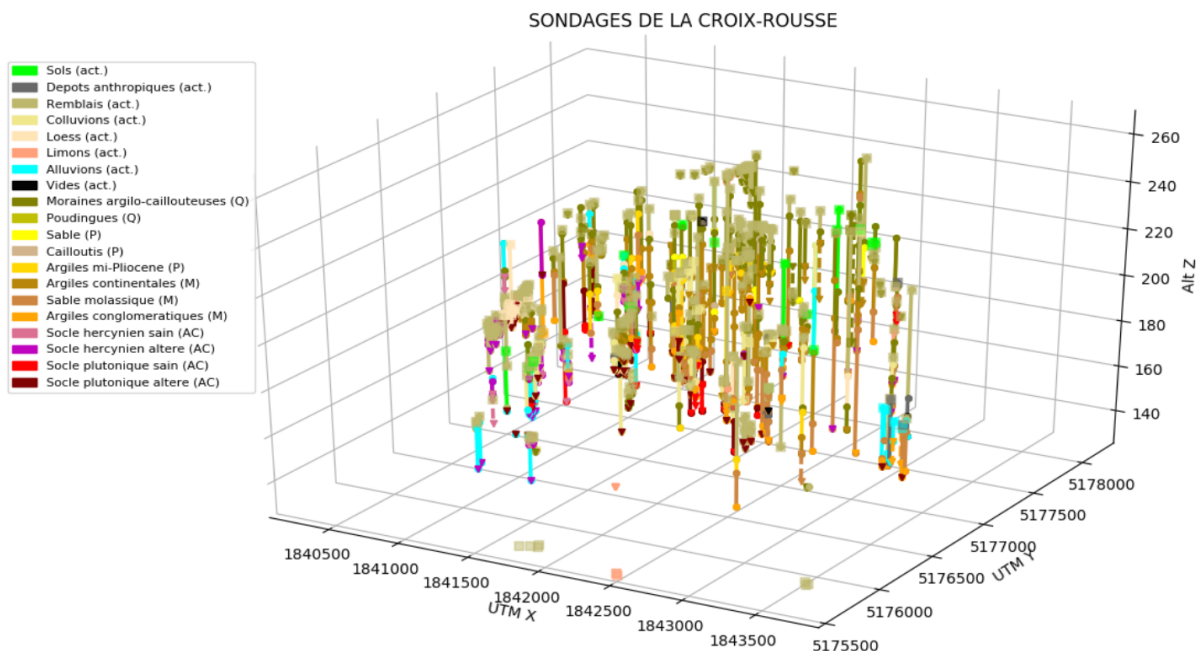


Figure 2. Visualisation des sondages de la base Ville de Lyon

3.3 Modèle numérique de terrain

La modélisation géologique 3D a été effectuée sur l'ensemble de la Croix-Rousse soit un bloc d'une longueur de plus de 2 km et d'une largeur de 1 km. Sa hauteur varie entre 130m NGF (cote du bas des berges des fleuves) et 254 m NGF, point culminant de la colline de la Croix-Rousse. Le modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation provient du site <https://data.grandlyon.com> et date de 2023, la densité du nuage de points est de 30 points / m² et la précision est de 10 cm en altimétrie (Z) et de 20 cm en planimétrie (XY).

3.4 Modélisation 3D en strates

La bibliothèque open-source GemPy-Legacy, développée en Python (De la Varga 2019), a été employée pour la génération des modèles géologiques structuraux 3D de la colline de la Croix-Rousse. Contrairement aux approches explicites traditionnelles,

GemPy-Legacy (https://github.com/gempy-project/gempy_legacy) repose sur une méthode de modélisation implicite qui permet de représenter les structures géologiques sous forme de surfaces équipotentielles à partir d'un champ scalaire continu. L'algorithme de base utilise une méthode d'interpolation par cokrigage universel, s'appuyant sur les travaux de Lajaunie et al. (1997). Cette approche permet d'intégrer simultanément des données ponctuelles d'interfaces (contacts de couches) et des données vectorielles d'orientations (pendages). L'un des avantages majeurs de GemPy réside dans sa capacité à gérer de manière automatisée des relations topologiques complexes, telles que les séries sédimentaires discordantes ou les réseaux de failles, en définissant des règles de priorité entre les différentes unités stratigraphiques. En couplant ces contraintes à une discrétisation sous forme de grille de voxels ou de maillages de surfaces, l'outil garantit une cohérence géométrique globale, indispensable pour une analyse géologique précise de la zone.

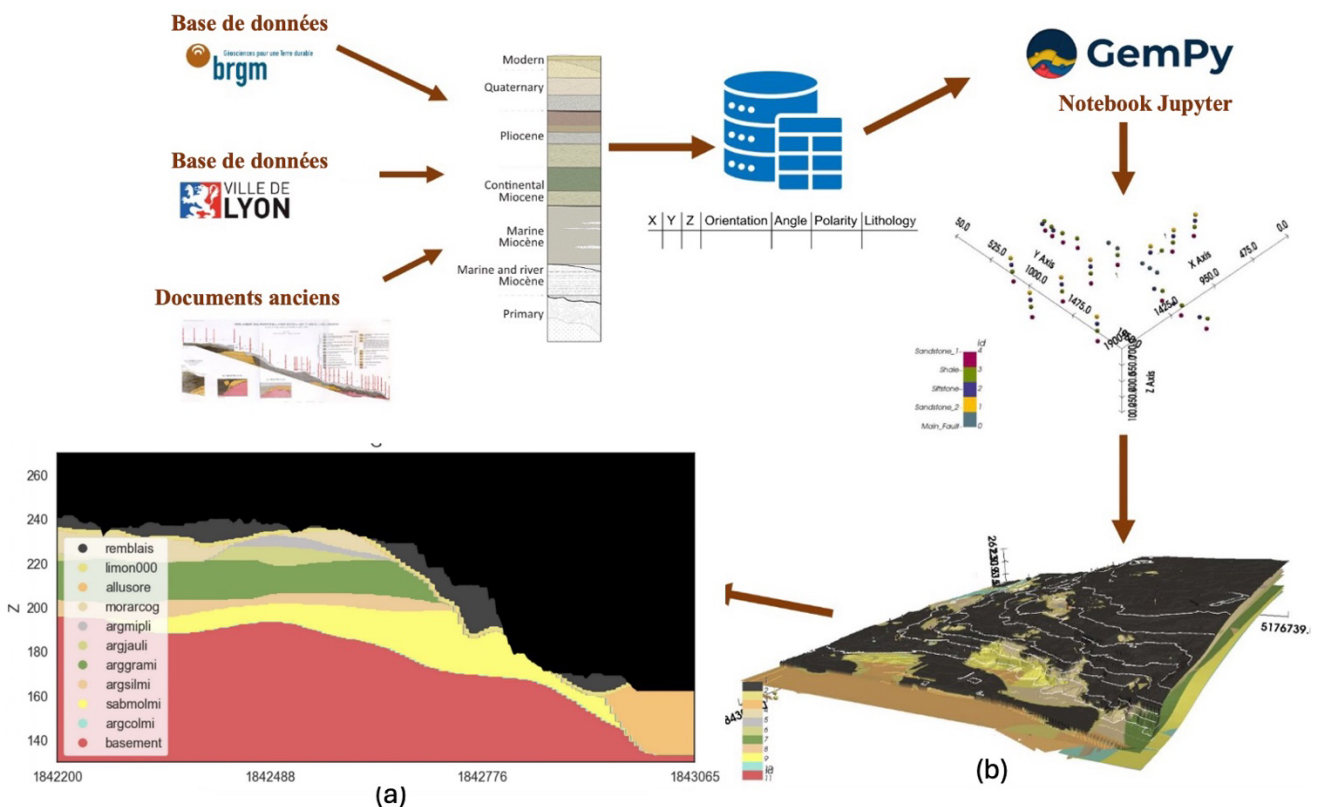


Figure 3. Processus de modélisation

3.5 Processus globaux

La succession des étapes de la modélisation sont illustrées figure 3. Une fois les bases de données complétées, vérifiées et exploitées, deux fichiers d'entrées l'un contenant les informations liées à la lithologie de chaque interface et l'autre les données d'orientation et de pendage de chaque couche ont été préparés. Puis un code python utilisant la librairie Gempy-Legacy a été développé pour exploiter ces fichiers pour générer un modèle tridimensionnel géoréférencé présentant les 11 strates géologiques de la colline de la Croix-Rousse.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Premiers résultats et ré-analyses

La figure 4 présente le résultat de la modélisation suivant la coupe Est-Ouest de la colline, la coupe (AA') est positionnée sur la figure 5. L'échelle verticale ayant été volontairement augmentée (fois 10) pour permettre une meilleure visualisation des défauts du modèle. L'examen de ces premières coupes transversales Est-Ouest souligne à quel point la définition précise des orientations et des pendages est importante. En effet, sur ces premières coupes, les couches géologiques semblent se couper ou avoir des formes inappropriées. Ces aberrations viennent du fait que les orientations et pendages ont été saisis par défaut à N 0° par manque d'information dans les données de sondages. Or en réalité la structure la structure n'est pas totalement tabulaire et il existe des surfaces locales d'érosion.

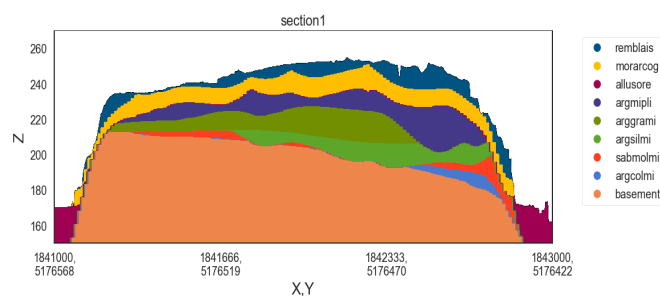


Figure 4. Coupe Ouest-Est (AA') de la colline de la Croix-Rousse suivant le tunnel

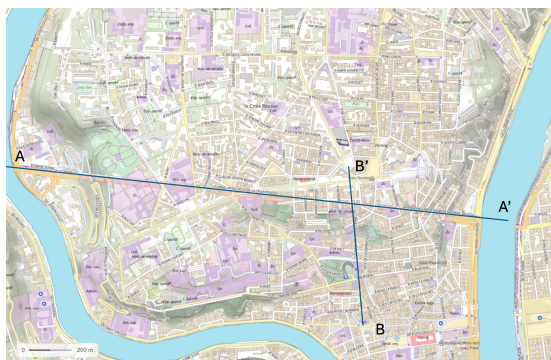


Figure 5. Positionnement des coupes géologiques

Une étude de sensibilité itérative portant sur les paramètres d'orientation et de pendage des couches a été initiée, les gammes de variation retenues s'appuyant sur l'analyse de documents bibliographiques (Russo, 1964). L'étude a d'abord porté sur les coupes Est-Ouest, en raison de la présence d'alluvions dont la position varie fortement en fonction du pendage de leur toit, avant d'être étendue aux coupes Nord-Sud. Par exemple, le passage d'une couche à pendage nul (figure 6a) à une couche à pendage non nul (figure 6b) illustre bien l'impact de ce paramètre : la couche bleue change d'orientation et permet aux couches orange/rouge, vertes et violettes d'affleurer en haut de la structure. On notera par ailleurs que les couches de loess/limons n'apparaissent pas dans cette configuration, et que les argiles jaunes et les argiles du mi-Pliocène ont été temporairement fusionnées afin d'ajuster les pendages. Ce processus itératif a été appliqué à un ensemble de limites de couches. Les coupes ainsi obtenues ont ensuite été confrontées à des références d'archives, notamment la coupe Est-Ouest issue des travaux de doublement du tunnel de la Croix-Rousse, les profils de sondages géologiques horizontaux réalisés lors de la reconnaissance de ce tunnel, ainsi que la coupe Nord-Sud de la rue Terme (figure 7).

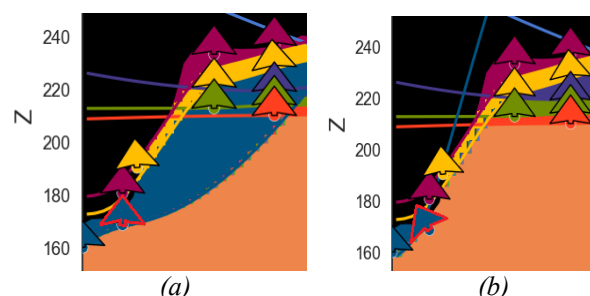


Figure 6. Importance des vecteurs d'orientation

Des corrections ont donc été apportées aux données d'entrée lorsque des écarts étaient constatés entre l'interpolation 3D et les coupes connues. Ce processus a été répété plusieurs fois, chaque itération permettant au modèle de se rapprocher des données réelles et de gagner en précision, jusqu'à atteindre un niveau de raffinement optimal. Cette étape a été la plus délicate et la plus longue de l'étude.

4.2 Résultats et discussion

La version actuelle du modèle géologique 3D de la colline de la Croix-Rousse (figure 3a) montre que le socle présente des sortes de « marches » marquant des remontées soudaines de son niveau vers l'ouest. L'existence d'une ou plusieurs failles nord-sud à ces endroits est en cours d'étude à partir d'anciens travaux (Russo, 1964), ces failles semblent aussi apparaître dans des rapports géologiques établis lors du

doublage du tunnel de la Croix-Rousse. Après le travail sur la gestion des pentages, les couches des sables molassiques et des argiles silteuses jaunes forment bien les biseaux attendus s'affinant vers l'Ouest. En effet, ces couches disparaissent, au contact de la remontée ouest du socle, leur partie supérieure étant tronquée par la phase érosive ayant précédé le dépôt des argiles vertes graveleuses (Mongereau

2010). Enfin, une épaisseur d'environ une dizaine de mètres de moraine non colluvionnée est présente sur le dessus du plateau et un manteau colluvial irrégulier descend sur les flancs de la colline. En surface, toute la géologie est recouverte par une couche de remblais anthropiques peu épaisse.

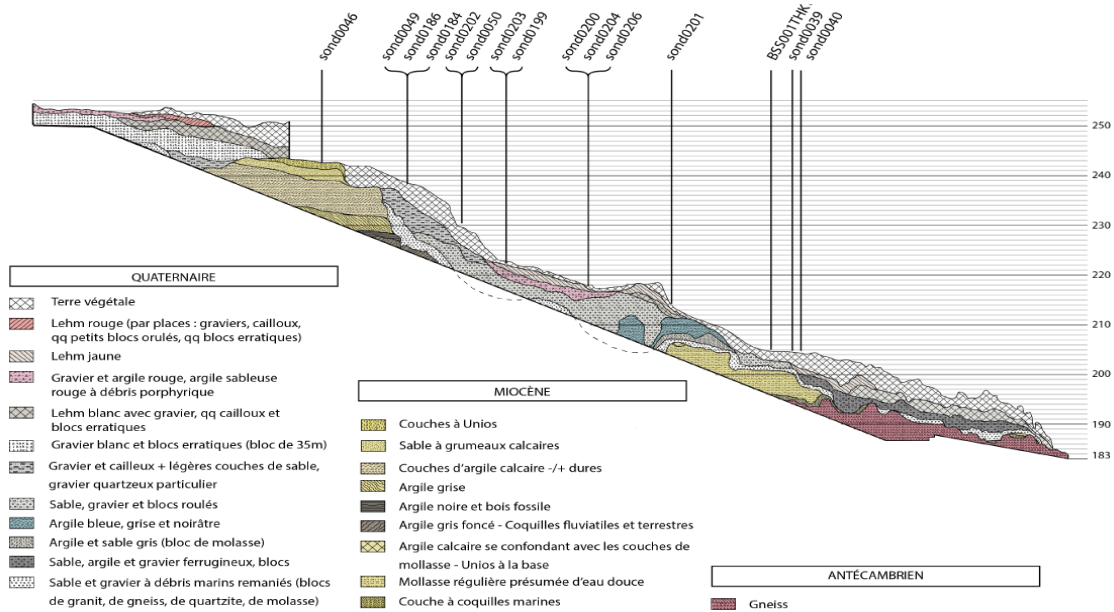


Figure 7. Coupe de la rue Terme (sur la base des travaux de Fontannes 1887).

Des corrections ont donc été apportées aux données d'entrée lorsque des écarts étaient constatés entre l'interpolation 3D et les coupes observées. Ce processus a été répété plusieurs fois, chaque itération permettant au modèle de se rapprocher des données réelles et de gagner en précision théorique, jusqu'à atteindre un niveau de raffinement optimal. La figure 8 présente à titre d'exemple la coupe de la rue Terme obtenue grâce au modèle 3D suivant la coupe BB' figure 5.

4.3 Possibilité d'évolution du modèle

Le modèle obtenu, en adéquation avec les coupes de la bibliographie, montre la répartition et l'agencement des différentes couches géologiques de la Croix-Rousse en trois dimensions (figure 3b). L'aménagement urbain sur cette colline lyonnaise est toujours en plein essor et chaque année de nouveaux sondages sont effectués dans le cadre de ces projets. Par exemple, la réhabilitation de l'École des Beaux-Arts abritant la Direction de l'Archéologie a donné lieu à une nouvelle campagne de sondages profonds (une quinzaine de mètres) dans une zone où la géologie est encore mal connue. Par son code modulaire et ses fichiers d'entrées facilement modifiables, il est possible de mettre à jour le modèle assez régulièrement. Pour le faire évoluer au fil des campagnes de sondages, l'expertise d'un géologue local est primordiale pour l'analyse post-modélisation. Le modèle est donc amené à évoluer au fil des campagnes de sondages.

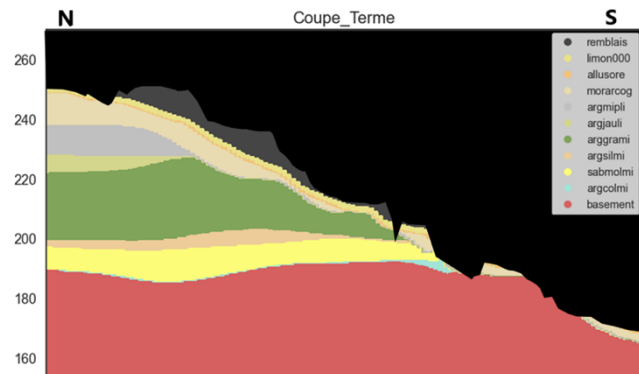


Figure 8. Coupe de la rue Terme extraite du modèle (coupe BB')

4.4 Utilisations du modèle pour la recherche en zone de risque de mouvements de terrain

Ce modèle géologique a été créé pour différents objectifs dont le premier était de synthétiser les connaissances géologiques sur les collines lyonnaises et d'avoir un outil évolutif capable de s'adapter à la découverte de nouvelles données géologiques. Les collines lyonnaises avec leur géométrie particulière, leur géologie complexe et leur nappes captives sont le siège de nombreux risques géotechniques. Dans ce contexte, ce modèle a aussi pour but de pouvoir produire rapidement des coupes géologiques des zones concernées par des sinistres afin de mieux comprendre la phénoménologie, même si rien ne remplacera dans la suite du traitement du sinistre des investigations complémentaires comme des sondages géologiques ou pressiométriques.

4.5 Utilisations du modèle pour la recherche de galeries oubliées

Les galeries de captage d'eau sur les collines lyonnaises sont cartographiées par les services compétents de la Métropole de Lyon. Une fusion entre les données des galeries (emplacement, sens découlement) et le modèle géologique permettra de mieux comprendre les circulations d'eau dans les différents horizons géologique et d'affiner la connaissance de l'hydrogéologie souterraine lyonnaise. De plus, les zones méconnues en termes de présence de galeries confrontées aux potentielles nappes captives, pourraient permettre d'émettre des hypothèses sur des galeries encore non redécouvertes.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Si la création d'un modèle 3D géologique de la colline de la Croix-Rousse à partir de plusieurs sources de données et d'une librairie open-source python permet de mieux appréhender globalement la géologie très spécifique de cette zone de Lyon, ce travail reste encore exploratoire et universitaire. Cependant, cette connaissance de la géologie en 3D permettra de mieux identifier la répartition des lithologies « à risques ». Dans ce contexte, les perspectives de développement et d'utilisation de ce modèle géologique 3D sont nombreuses. Son développement et ses premières utilisations (Tronchère-Cottet 2025) dans le cadre d'une étude d'un réseau de galeries antiques montre son potentiel. Un modèle similaire sera à terme également développé sur la zone de Fouvière.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé en partie grâce au soutien financier du LabEx IMU (ANR-10-LABX-0088) de l'Université de Lyon, dans le cadre du Plan France 2030 mis en place par l'État et géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre entre autres des stages de master 2 de Mehdi Marsh et Mathieu Paulin. Références bibliographiques

David L. (1967). *Formations glaciaires et fluvioglaciales de la région lyonnaise*. Imprimeur-éditeur Département des sciences de la Terre, faculté des Sciences de Lyon.

De la Varga, M., Schaaf, A., and Wellmann, F. (2019). GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion, *Geosci. Model Dev.*, 12, 1-32

Fontannes F. (1887). *Les terrains tertiaires et quaternaires du promontoire de la Croix-Rousse, à Lyon*. Archives du Muséum d'histoire naturelle de Lyon, tome 4. pp. 27-44.

Lajaunie, C., Courrioux, G. and Manuel, L. (1997) Foliation fields and 3D cartography in geology : principles of a method based on potential interpolation, *Mathematical Geology*, vol. 29, no. 4, 1997, p. 571-584

Mandier P. (1987). le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire ; *Revue de Géographie Alpine* 75-1 pp. 87-89

Mongereau, N. (2010). *Géologie de Lyon*. Editions Lyonnaises d'Art et d'Histoire, Lyon, France.

Pothier C. (2022). Géologie de Lyon, Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=xbtEDLkaGoM> consulté le 12 novembre 2025.

Russo Ph. (1964), *Géologie et hydrologie appliquées à l'urbanisme dans les collines lyonnaises : La Croix-Rousse*, Edition AUDIN, collection Ville de Lyon - Service de la voirie Lyon.

Tronchère-Cottet, H., Pothier, C., Dessaint, P. (2025) The "fish bones galleries" of Lyon, France: combining archaeological and geological 3D modelling to understand a mysterious ancient underground structure, *CAA 2025 conference "Digital Horizons, Embracing Heritage in an Evolving World"*, 5-9 mai 2025, Athens, Grèce.

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 de doctorat, INSA de Lyon.