



INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT (IAEG)

IAEG COMMISSION 25 PUBLICATION NO. I

Recommandations pour le développement et l'application de modèles de génie géologique appliqués aux projets

Auteurs principaux

Fred Baynes et Steve Parry

Editeurs principaux

Martin Culshaw et Jim Griffiths

Auteurs et éditeurs contributeurs

Wayne Barnett, Jorge Bejeman, Anthony Bowden, Richard Brehaut, Joe Cant, Trevor Carter, Dafydd Chandler, Roberto Cravero, Martin Culshaw, Antonio Dematteis, Yogendra Deva, Diego Dicurzio, David Dobson, Jia-Jyun Dong, Mark Eggers, Peter Fair, Robin Fell, Phil Flentje, Andrew Forsythe, Martin Griffin, Jim Griffiths, Bill Haneberg, Nizam Hasan, Chris Jack, Graeme Jardine, Stratis Karantanellis, Aliko Kokkala, Christoph Kraus, Teemu Lindqvist, Robert MacKean, Vassilis Marinos, Stuart Millis, Tim Nash, Judith Nathanail, Paul Nathanail, Simon Nelis, Alicia Newton, Jan Novotny, Darren Paul, Alistair Schofield, David Shilston, Ian Shipway, Doug Stead, Keith Turner, Giovanna Vessia, David Waring, Felicia Weir, Ann Williams, Erik Wunder

Bibliographic reference

Baynes, F. J. and Parry, S. 2024. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. Version 2.0. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. I, 81 pp. (<https://www.iaeg.info/C25EGMGuidelines/>)

Copyright is owned by the IAEG except for some figures that were first published by others. You may not copy or adapt this publication without first obtaining permission. Contact the Secretary General of the IAEG at iaegsg@163.com. You may quote extracts of a reasonable length without prior permission provided a full acknowledgement is given of the source of the extract.

Recommandations pour le développement et l'application de modèles de génie géologique appliqués aux projets

Traduction d'un document produit par l'IAEG Commission 25 Working Group

Traduction de l'anglais vers le français par Morgane Gillard (MG).

Contrôle scientifique par Jean-Alain Fleurisson (CFG), Johan Kasperski (CETU, CFG), Gildas Noury (BRGM, CFG) et Jean-David Vernhes (UniLaSalle, CFG)

Version française du 07/11/2025.

Version	Date	Status	Produced by
IAEG C25 EGM Guidelines v1.0.pdf	14 December 2022	Guidelines & Examples v1.0	Fred Baynes & Steve Parry
IAEG C25 EGM Guidelines v2.0.pdf	9 August 2024	Guidelines v2.0	Fred Baynes & Steve Parry

L'Association internationale de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (AIGI), les auteurs, les éditeurs et les contributeurs ne garantissent en aucune manière l'exhaustivité, la pertinence ou l'utilité des informations contenues dans ce document. Les utilisateurs de ces Recommandations sont responsables de leurs propres décisions quant à l'application des informations qu'elles contiennent.

Table des matières

INTRODUCTION	I
I RECOMMANDATIONS POUR L'ELABORATION DES MGG	3
I.1 Principes de Construction des MGG	4
I.1.1 Définitions	4
I.1.2 Principes fondamentaux	5
I.2 Processus de développement d'un MGG	10
I.2.1 Aperçu du processus de développement	10
I.2.2 Choix du niveau de développement du MGG	11
I.2.3 Détail du processus de développement	13
I.2.4 MGG et Eurocode	20
I.3 Assemblage et communication du MGG	22
I.3.1 Introduction	22
I.3.2 Consignes pour la documentation des éléments d'un MGG	22
I.3.4 Établir les rapports du MGG	24
I.3.5 Créer et visualiser un modèle numérique 3D	26
I.4 Gerer les incertitudes du MGG	30
I.4.1 Introduction	30
I.4.2 Sources d'incertitude	30
I.4.3 Évaluation holistique de la fiabilité d'un MGG par revue critique	30
I.4.4 Autres méthodes pour évaluer l'incertitude et la fiabilité d'un MGG	30
I.5 Garantir la qualité du MGG	33
I.5.1 Vérification de la qualité du processus de développement du MGG	33
2 COMMENTAIRES SUR LES RECOMMANDATIONS	35
2.1 Principes de construction des MGG	36
2.1.1 Définitions	36
2.1.2 Principes fondamentaux	36
2.2 Processus de développement des MGG	37
2.2.1 Aperçu du processus de développement	37
2.2.2 Choix du niveau de développement du MGG	42
2.2.3 Détails du processus de développement	42
2.2.4 MGG et Eurocode	53

2.3	Assemblage et communication du MGG	54
2.3.1	Introduction	54
2.3.2	Consignes pour la préparation des composantes d'un MGG	54
2.3.3	Conséquences sur l'approvisionnement du projet	54
2.3.4	Établir les rapports de MGG	54
2.3.5	Création et visualisation d'un modèle numérique 3D	58
2.4	Gérer les incertitudes du MGG	68
2.4.1	Introduction	68
2.4.2	Sources d'incertitudes	70
2.4.3	Évaluation holistique de la fiabilité d'un MGG par révision	71
2.4.4	Autres méthodes d'évaluation de l'incertitude et de la fiabilité du MGG	71
2.5	Garantir la qualité des MGG	76
2.5.1	Objectifs globaux de qualité du MGG	76
2.5.2	Vérification de la qualité du processus de développement du MGG	76
2.6	MGG ET INGÉNIERIE DE PROJET	79
2.6.1	Présentation	79
2.6.2	Aperçu des étapes du MGG et du projet	79
2.6.3	Le MGG dans les investigations de site	80
2.6.4	Le MGG dans la gestion de la construction	83
2.7	REFERENCES	84
	Appendix A – Contributeurs	87

Recommandations pour le développement et l'application de modèles de génie géologique lors de projets

INTRODUCTION

L'objectif de ces Recommandations est de fournir des conseils succincts, pratiques, accessibles et faisant autorité sur l'utilisation efficace de Modèles de Génie Géologique (MGG) pour une large gamme d'applications incluant le génie civil, l'exploitation minière, les études d'aléas, les études offshore, l'aménagement du territoire et les évaluations environnementales. Ces Recommandations, d'une portée générale, sont destinées à être utilisées ou à servir de référence par les parties prenantes de projets de toutes envergures, interagissant avec le terrain ou nécessitant une compréhension de celui-ci. Elles sont destinées à être appliquées partout sur le globe.

Un Modèle de Génie Géologique (MGG) représente une explication et une description globale permettant l'interprétation et l'évaluation des conditions géologiques d'ingénierie et permet d'évaluer l'interaction de ces conditions avec le projet proposé, de sorte que des décisions techniques appropriées puissent être prises tout au long du cycle de vie du projet, de son initiation à sa conclusion. En adoptant cette définition, l'intention est d'aller au-delà du concept selon lequel un "modèle" est une représentation tridimensionnelle simplifiée et statique des conditions du terrain, et de reconnaître que la conception et le développement d'un MGG représentent un processus continu d'accumulation de connaissances fournissant une direction et un contrôle de l'ingénierie du terrain tout au long d'un projet.

Ces Recommandations ont été élaborées pour fournir des conseils aux professionnels sur "l'approche MGG", y compris sur les techniques de modélisation 3D, ainsi que pour informer les consultants, les clients, les maîtres d'ouvrage, les organismes gouvernementaux et les régulateurs sur l'utilisation des Modèles de Génie Géologiques lors de projets.

Les Recommandations ont été développées par les membres de la commission C25 de l'AIGI – la Commission pour l'Utilisation des Modèles de Génie Géologique – et représentent les points de vue consensuels des contributeurs.

Il est prévu que ces Recommandations soient traduites dans d'autres langues pour être diffusées à l'échelle internationale auprès de la communauté des ingénieurs-géologues et des géotechniciens. Les Recommandations continueront à être révisées en fonction des retours d'expérience issus de leur utilisation dans différentes régions du monde.

Les Recommandations comprennent deux parties :

1. Les recommandations pour l'élaboration des MGG (Partie 1). Ces recommandations indiquent comment élaborer un MGG approprié pour tout projet en interaction avec le terrain.
2. Les commentaires relatifs aux recommandations (Partie 2). Ces commentaires fournissent des informations complémentaires, si nécessaire, pour chaque recommandation et sont structurés avec la même numérotation de paragraphe pour faciliter la consultation ; des liens hypertextes sont fournis le cas échéant.

Notes :

1. L'objectif de ces Recommandations est de fournir des informations et d'aider à la prise de décision ; elles sont d'application volontaire.
2. Ces Recommandations peuvent avoir des variations dans l'approche et la méthode pour tenir compte des besoins spécifiques de l'ingénierie géologique et du projet.

Contexte

L'utilisation de "modèles" en géologie de l'ingénieur a été discutée par Zaruba et Mencl (1954 en tchèque) et Morgenstern et Cruden (1977), bien que la première coupe transversale du terrain créée pour illustrer les conditions géologiques lors d'un projet d'ingénierie peut sans doute être considérée comme le premier modèle de génie géologique. Un exemple est le travail réalisé par William Smith, avec la création de cartes géologiques et de coupes pour la construction d'un canal au Royaume Uni au 18^{ème} siècle. Fookes (1997) a fait connaître l'idée de modèles en géologie de l'ingénieur à un plus large public, mais en qualifiant simplement ces modèles de modèles géologiques. Fookes *et al.* (2000) a affiné cette approche pour inclure le concept "d'histoire géologique totale", c'est-à-dire que les caractéristiques techniques du sol résultent de l'histoire géologique et géomorphologique complète de la région. Knill (2003) a suggéré qu'un "modèle géologique" n'est pas en soi approprié à des objectifs d'ingénierie car il ne définit pas suffisamment les conditions d'ingénierie au sein du terrain naturel, ni n'aide à la réalisation d'un projet. Il proposa qu'il soit plus utile de considérer des modèles géologiques, des modèles de terrain et des modèles géotechniques, le type de modèle choisi étant lié à l'avancement du projet. Bock *et al.* (2004) ont fourni une réflexion sur la relation entre les disciplines de la géologie de l'ingénieur, de la mécanique des sols et des roches, mais aussi sur les centres d'intérêt des sociétés savantes internationales, la nature des modèles géologiques et des modèles de terrain.

La Commission C25 de l'IAEG a publié un rapport intermédiaire (Parry *et al.*, 2014) qui a défini un modèle comme "une approximation de la réalité créée dans le but de résoudre un problème", a décrit une méthodologie pour développer des modèles de génie géologique, a différencié la composante conceptuelle et observationnelle de ce processus, et a fourni des exemples. Cette approche a été adoptée dans de récentes recommandations (par exemple The Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 28, pour les terrains glaciaires et périglaciaires, Giles *et al.*, 2017). Cependant, l'approche MGG n'a pas encore été intégrée aux normes nationales et internationales.

Baynes *et al.* (2021) ont développé le rapport intermédiaire du C25 et ont souligné que le MGG représente un cadre de connaissances qui peut être utilisé pour comprendre et communiquer tout ce qui est connu des conditions géologiques et des techniques associées à n'importe quelle étape d'un projet.

Les présentes Recommandations ont été développées par les membres de la Commission C25 de l'IAIGI - Commission pour l'Utilisation des Modèles de Génie Géologique – à la suite de la 12^{ème} Conférence Régionale Asiatique de l'IAIGI qui s'est tenue en 2019 à Jeju, en Corée du Sud. Une première version des Recommandations a été présentée lors de la 3^{ème} Conférence Régionale Européenne de l'IAEG qui s'est tenue à Athènes en octobre 2021.

La version 1.0 des Recommandations de l'IAEG C25 MGG a été mise à disposition sous forme de PDF téléchargeable gratuitement sur le site de l'IAEG à partir du 14 décembre 2022.

En 2024, les Recommandations ont été révisées suite aux commentaires reçus et les exemples inclus dans la version 1.0 ont été supprimés. Cependant, certaines figures des exemples ont été conservées dans le Commentaire.

La liste des contributeurs aux Recommandations et leurs pays d'origine figure en Annexe A.



Recommandations pour le développement et l'application de modèles de génie géologique lors de projets

I RECOMMANDATIONS POUR L'ELABORATION DES MGG

1.1 PRINCIPES DE CONSTRUCTION DES MGG

1.1.1 Définitions

Les termes importants utilisés dans ce guide sont définis ci-dessous ; d'autres termes seront définis lors de leur apparition dans le texte.

- **Modèle** : une approximation de la réalité créée dans le but de résoudre un problème.
- **Géologie de l'ingénieur** : l'application des connaissances géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques à l'ingénierie.
- **Modèle de Génie Géologique (MGG)** : une explication et une description globale qui permet l'évaluation et l'interprétation cohérente des conditions géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques qui pourraient avoir un impact sur un projet et ses caractéristiques techniques. Le MGG comprend des composantes à la fois conceptuelles et observationnelles, et peut être constitué d'un ensemble de modèles et d'approches indépendants. Le Modèle Géologique, le Modèle Géotechnique et l'Évaluation des aléas constituent des résultats du cadre de connaissances du MGG.
- **Modèle conceptuel** : un modèle basé principalement sur des concepts et des interprétations relevant de la géologie en lien avec les implications d'ingénierie. Un modèle conceptuel temporel (parfois appelé modèle évolutif) illustre comment les conditions du terrain ont pu évoluer au cours des temps géologiques et des temps plus récents.
- **Modèle d'investigation** : un modèle basé principalement sur des investigations et des mesures géologiques et géotechniques. Celles-ci sont contraintes dans l'espace par des données 3D (xyz) ou dans l'espace et le temps par des données 4D (xyz plus le temps). De plus en plus, le modèle observationnel est élaboré dans un environnement numérique.
- **Unités homogènes géotechniques** : volumes de terrain avec une histoire géologique similaire et des caractéristiques d'ingénierie similaires qui sont établies dans le contexte de l'ingénierie du projet.
- **Cartographie géologique** : la préparation d'une carte décrivant la distribution et les limites en surface des unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur. Celle-ci comporte également les structures géologiques, la géomorphologie et les conditions hydrogéologiques. Ces éléments sont importants pour le projet en utilisant une sémiologie appropriée réalisée à une échelle et un niveau de détail déterminés par l'objectif de la cartographie. Ce dernier peut aller de l'évaluation des ressources régionales à la confirmation des conditions de fondation.
- **Modèle Géologique** : un produit du corpus de connaissances du MGG qui explicite la distribution dans l'espace 3D des unités géologiques d'ingénierie, des conditions hydrogéologiques et des processus géologiques et géomorphologiques.
- **Modèle Géotechnique** : un produit du corpus de connaissances du MGG qui fournit les caractéristiques techniques du projet et/ou les paramètres géotechniques des aspects pertinents du Modèle Géologique.
- **Modèle analytique** : une simplification du Modèle Géologique et du Modèle Géotechnique développée à des fins d'évaluation, d'analyse ou de conception technique.

- **Modèle numérique** : rassemblement et présentation de données dans un environnement logiciel pour permettre la visualisation, l'interprétation et l'aide à la communication de parties du MGG, de plus en plus élaboré en 3D.
- **Visualisation numérique** : le résultat d'un modèle numérique, généralement sous la forme d'un affichage graphique en 2D ou 3D de parties sélectionnées des données.
- **Modèle de Terrain** : un type de modèle, souvent spécifié comme un livrable dans les contrats ou requis par les normes, qui fournit une synthèse de la compréhension des conditions du terrain et des eaux souterraines sur un site à un moment précis. Cela peut inclure des paramètres géotechniques pour les différentes unités qu'il contient. La signification de ce terme varie selon les codes et les normes.
- **Aléas** : processus ou phénomènes géologiques et géomorphologiques qui peuvent avoir un impact négatif sur un projet, par exemple les effondrements de cavités naturelles et artificielles, émanations de gaz, les chutes de blocs, les glissements de terrain, l'activité sismique, etc.
- **Projet** : objectif pour lequel le MGG est élaboré. Les MGG sont généralement utilisés pour évaluer la réponse du terrain à un projet d'ingénierie, mais ils sont également utilisés pour des applications plus larges telles que l'évaluation des ressources naturelles, les évaluations régionales des aléas, etc.

1.1.2 Principes fondamentaux

1.1.2.1 Le MGG évalue les interactions entre le projet et le sol

L'objectif du MGG est d'évaluer la réaction du terrain aux changements. Il implique généralement l'examen des interactions possibles entre le projet et le terrain. Un MGG efficace doit anticiper la nature du terrain et la façon dont celui-ci pourrait réagir au projet.

1.1.2.2 Le cadre de connaissances du MGG

Le cadre de connaissances du MGG représente une compréhension des conditions géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques importantes pour l'ingénierie du projet, pouvant servir à résoudre des problèmes d'ingénierie (Figure 1-1). Un MGG n'est pas un "modèle" unique mais représente plusieurs modèles dynamiques, tout en constituant également le référentiel des données sous-jacentes (si elles ne sont pas intégrées aux modèles eux-mêmes), les documents d'appui (par exemple, les rapports d'étude de site) et le cadre de connaissances qui rassemble tous ces éléments. Dans la mesure du possible, un MGG doit s'appuyer sur toutes les connaissances disponibles et pertinentes, doit être construit de façon logique suivant les principes établis dans les présentes Recommandations, doit se concentrer sur les conditions géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques pertinentes et les caractéristiques techniques importantes pour le projet. Enfin, il doit être clairement communiqué.

Les trois principaux produits d'un MGG pour un projet sont le Modèle Géologique, le Modèle Géotechnique et l'Évaluation des aléas.

1.1.2.3 Les MGG comprennent des idées conceptuelles et des données d'observation

L'équilibre entre les idées conceptuelles et les données d'observation au sein d'un MGG va varier selon le type de projet, son envergure, la complexité géotechnique du site et l'état d'avancement du projet (Figure 1-1). L'évaluation du terrain au début d'un projet est avant tout conceptuelle, car elle

repose principalement sur les connaissances, l'expérience et la référence à d'autres exemples publiés de conditions géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques similaires. À mesure de la progression du projet et que les données d'observation deviennent disponibles, le MGG évolue mais le modèle conceptuel demeure le cadre pour évaluer l'interprétation de ces données.

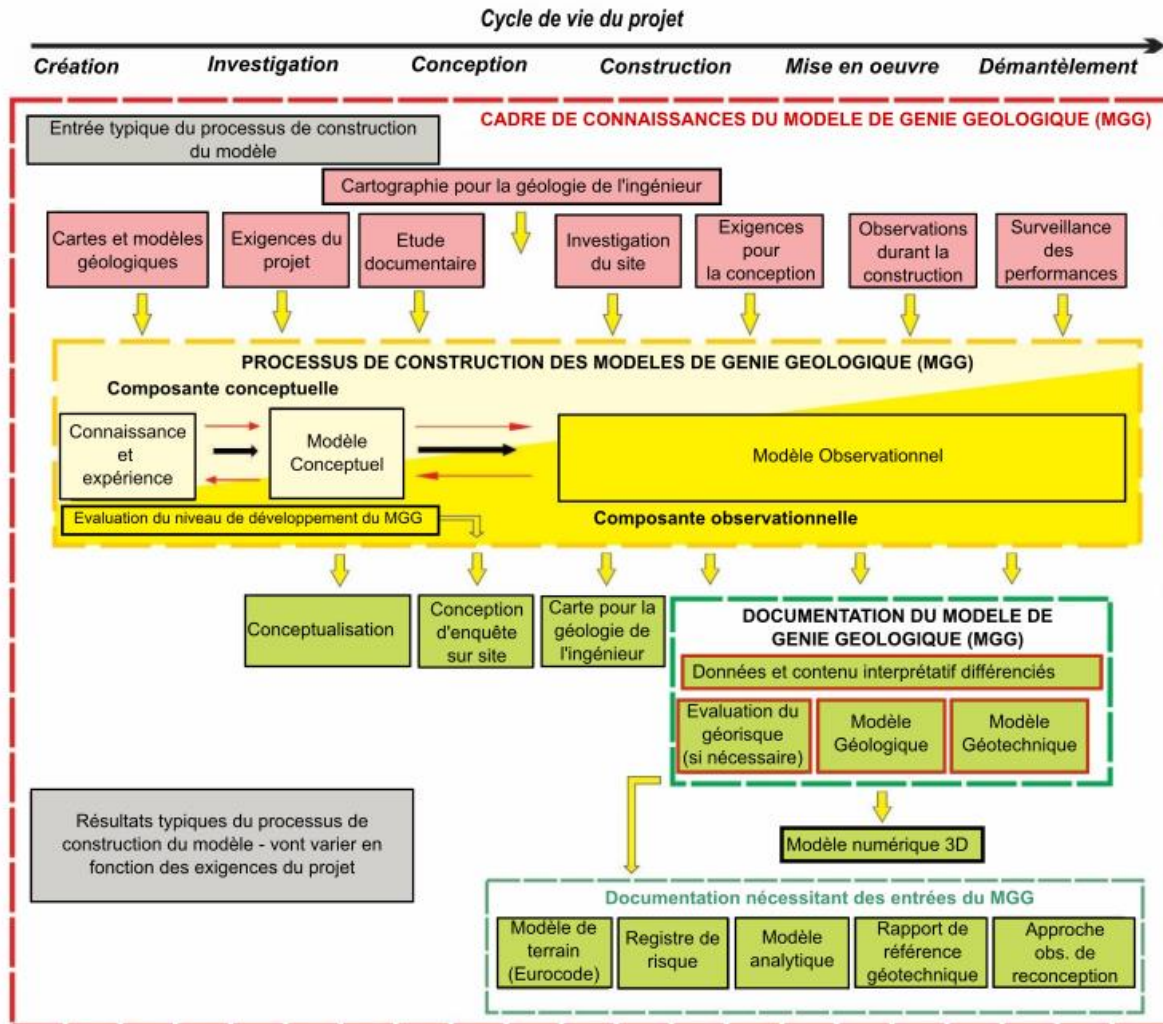


Figure I-1 Visualisation schématique de la construction d'un MGG tout au long du cycle de vie d'un projet.

Les techniques utilisées pour développer des modèles conceptuels et des modèles d'investigations sont différentes. La première implique une conceptualisation tandis que la seconde implique une évaluation des données et la collecte d'informations. Cependant, leur utilisation pour la conception des MGG est si étroitement liée qu'elles constituent en réalité deux outils distincts, mais essentiels et complémentaires, qui doivent être combinés à toutes les étapes du projet pour générer un MGG approprié.

À chaque étape de l'analyse technique du projet, il convient de procéder avec prudence jusqu'à ce que les idées conceptuelles et les données d'investigations soient réconciliées et que toute divergence résiduelle puisse être gérée comme un risque de projet accepté par toutes les parties concernées (Figure I-2).



I.1.2.4 Un MGG pertinent tout au long du cycle de vie du projet

L'élaboration d'un MGG doit commencer dès le lancement du projet et doit être révisée tout au long de son cycle de vie, passant potentiellement entre les mains de plusieurs maîtres d'ouvrage et consultants. Cela fournit un cadre transparent et logique pour l'élaboration des livrables liés au terrain (Figure I-1). Le cadre de connaissances du MGG doit également faire partie intégrante du système de gestion du projet, car le MGG documente les connaissances du terrain et, par conséquent, doit faire partie de la documentation contractuelle (selon le mécanisme d'exécution du contrat) et servir de base à la conception.

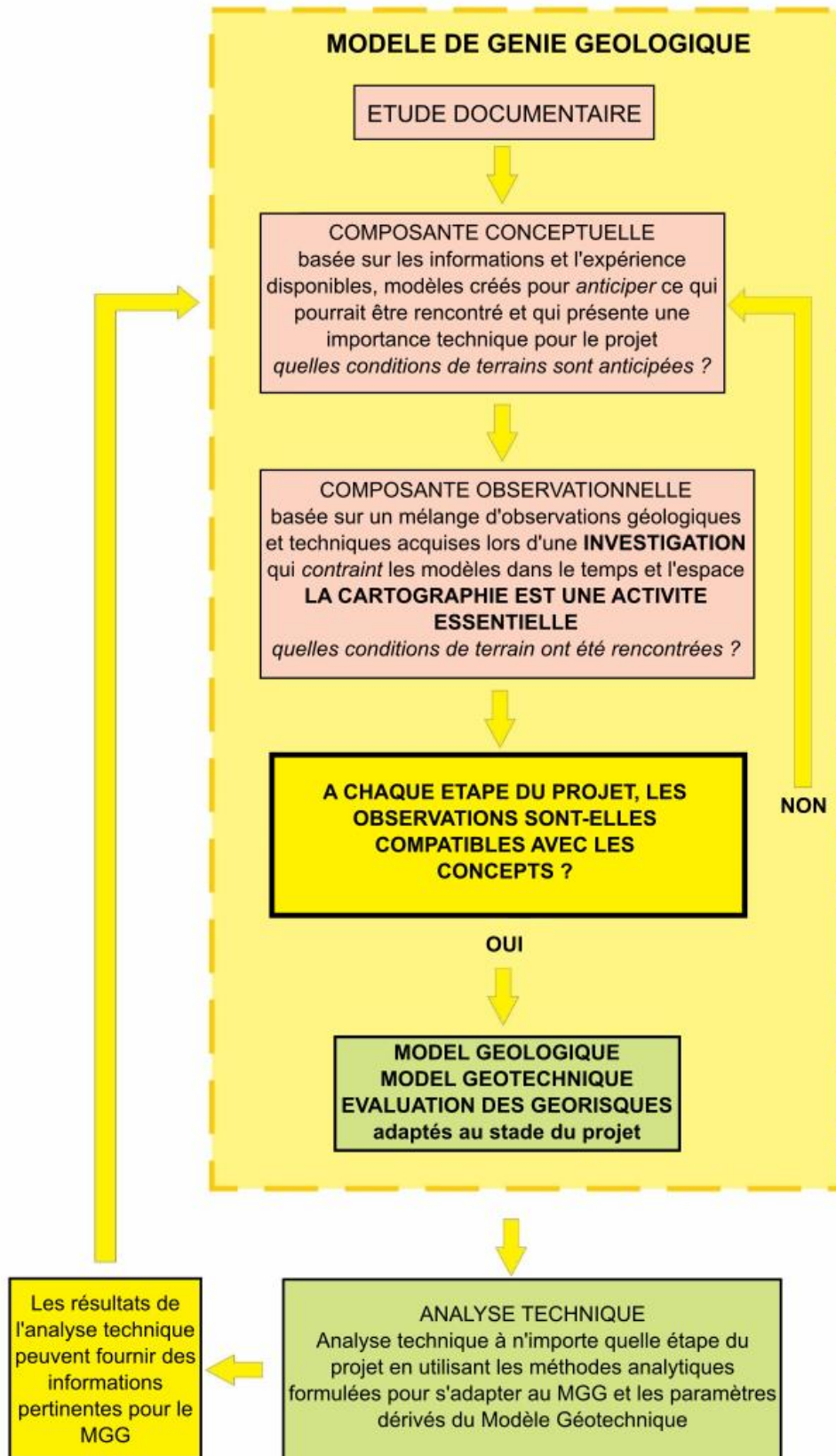


Figure I-2 L'analyse technique soit être poursuivie lorsque les observations sont compatibles avec les concepts.



I.1.2.5 Un MGG doit être développé pour chaque projet

Un MGG doit être élaboré pour tous les projets en interaction avec le terrain. Il est applicable aussi bien aux projets de très grande envergure qu'aux projets de très petite envergure et à diverses échelles géographiques. Il est à noter que pour les projets simples, de très petite envergure, le MGG peut être présenté dans un seul et court rapport d'interprétation.

I.1.2.6 Des connaissances en géologie et en ingénierie sont nécessaires pour développer un MGG

Des connaissances et une expérience à la fois en géologie et en ingénierie sont nécessaires pour élaborer un MGG pertinent. L'accent doit être cependant mis sur la géologie. Ces connaissances doivent s'appuyer sur une formation, idéalement comprenant au moins un diplôme de premier cycle en géologie, ou un diplôme avec une spécialisation en géologie et une formation post-universitaire en géologie de l'ingénieur ou génie géologique, ou une période significative de mentorat sous la supervision d'un ingénieur-géologue expérimenté. Dans certaines circonstances et pour des projets simples, un ingénieur géotechnicien compétent possédant des connaissances approfondies en géologie et/ou une expérience pratique valide du contexte géologique du projet pourrait être en mesure de construire un MGG fiable.

1.2 PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT D'UN MGG

1.2.1 Aperçu du processus de développement

1.2.1.1 Processus de développement

Le processus de développement d'un MGG comprend les étapes essentielles répertoriées dans le Tableau I-1, généralement avec des itérations répétées de la plupart des étapes :

Tableau I-1 Étapes essentielles du processus de développement d'un MGG

1. Constituer une équipe, définir les périmètre et l'objectif. Établir le niveau de développement probable du MGG.
2. Rassembler les informations techniques et géologiques pertinentes pour le projet dans une étude documentaire. Si possible, faire réaliser une première cartographie de reconnaissance par un ingénieur géologue compétent.
3. *Conceptualiser* les conditions géologiques probables en se basant sur les connaissances, l'expérience et l'étude documentaire réalisée au début du projet, puis les ré-évaluer à l'aide des nouvelles informations disponibles au fur et à mesure de l'avancement du projet. Confirmer le niveau de développement du MGG.
4. Identifier et documenter les principaux aléas et incertitudes dans un registre initial des risques. Ce registre est utilisé tout au long du cycle de vie du projet et doit être mis à jour régulièrement.
5. Acquérir des observations par le biais d'investigations (celles-ci peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, la télédétection, la cartographie, la géophysique, les forages d'exploration, l'échantillonnage et les essais) ; on ne saurait trop insister sur l'importance de la cartographie géologique dans ces investigations.
6. Combiner les observations et les concepts pour développer une *interprétation* des conditions du site ; définir des unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur, interpréter leur distribution et générer un Modèle Géologique. Si nécessaire, réévaluer le modèle conceptuel.
7. Caractériser les unités homogènes géotechniques, les conditions hydrogéologiques et les processus géologiques à l'aide de paramètres géotechniques développés à partir de l'étude documentaire, des investigations et de l'expérience, puis générer un Modèle Géotechnique et, si nécessaire, une Évaluation des aléas.
8. Identifier tous les autres aléas, incertitudes, lacunes et divergences importants dans le cadre des connaissances ; ils représentent des risques potentiels pour le projet et doivent être ajoutés au registre des risques.
9. Évaluer les risques et, si nécessaire, entreprendre des investigations supplémentaires pour améliorer le cadre de connaissances, minimiser les inconnues et réduire les risques, ou considérer des options techniques alternatives pour réduire le risque à un niveau acceptable.
10. Documenter tout ce qui précède dans une série de rapports systématiques avec un contenu graphique significatif.

1.2.1.2 Étapes initiales

Les questions clés suivantes doivent être posées au début du projet :

- Où est situé le projet (géographie/géologie/géomorphologie/environnement) ?
- Quel est le type et l'envergure du projet, comment va-t-il interagir avec le sol, quelles sont les dimensions clés et les exigences de conception, y compris la durée de vie prévue, et quelles sont les principales contraintes géotechniques, préoccupations ou conséquences d'une défaillance pour un projet de ce type ?



- Quelles informations existantes concernant les conditions possibles du terrain sont disponibles ?
- Quelle est l'histoire géologique/géomorphologique/anthropique de la région/site qui pourrait avoir une importance technique pour le projet ?
- Quels aléas peuvent être présents ?
- Quelles sont les conditions des eaux souterraines et de surface et comment pourraient-elles impacter le projet ?
- Quel est l'état actuel du projet, par exemple est-il en attente, y a-t-il recherche d'un soutien financier, est-il en construction, etc ?

Répondre à ces questions clés reste important tout au long du projet.

1.2.2 Choix du niveau de développement du MGG

Le niveau de développement du MGG à adopter dépend de la complexité géotechnique prise en compte dans le contexte du projet et des conséquences d'une défaillance ; des indications sur le choix du niveau de développement sont fournies dans les Tableaux I-2 et I-3. Le niveau de développement doit être révisé si l'investigation indique que la complexité géotechnique est supérieure aux prévisions.

Tableau I-2 Niveaux de développement d'un MGG en lien avec le projet et la complexité géotechnique. **

	Complexité géotechnique du terrain qui peut influencer le projet – comme indiqué par le modèle conceptuel développé en accord avec ces Recommandations		
Complexité du projet ^{##}	SIMPLE/UNIFORME : Strates légèrement inclinées ou horizontales, terrains uniformes, pas d'aléas, peu de contraintes géotechniques	MODEREE/VARIABLE : Plis et/ou failles variables, sols variables, discordances, peu d'aléas, quelques contraintes géotechniques potentielles	COMPLEXE/HAZARDEUSE : Plis et/ou failles très variables, terrains profonds irréguliers, discordances, complexité géotechnique considérable, aléas importants tels que des glissements de terrain majeurs et complexes, présence de failles actives, de karst, ou bien fort potentiel pour les aléas d'être augmentés/amplifiés par le projet
Projet technique mineur, faible encombrement, faible conséquence en cas de défaillance	Niveau 1	Niveau 1	Niveau 2
Projet technique de taille moyenne, avec des conséquences moyennes en cas de défaillance	Niveau 2	Niveau 2	Niveau 3
Grande infrastructure, grands projets linéaires, études régionales, lourdes conséquences en cas d'échec	Niveau 3	Niveau 3	Niveau 3

** Lors de l'évaluation du niveau de développement approprié pour un MGG, il convient de demander conseil à un ingénieur géologue compétent.

La complexité d'un projet est subjective ; les conséquences faibles et moyennes en cas de défaillance se limiteraient plutôt à des impacts financiers ; les conséquences élevées d'une défaillance seraient associées à des pertes de vies humaines ; il y a défaillance lorsque le projet ne fonctionne pas conformément à la conception/aux performances spécifiées.

Table I-3 Orientation sur les exigences de portée pour les niveaux de développement d'un MGG.

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Études spécialisées	Aucune	Aucune	Commander des études d'aléas distinctes (le cas échéant). Possibilité d'études géologiques spécialisées. Possibilité d'études d'interaction sol/structure
Cartographie	Au minimum : visite du site, cartographie de reconnaissance, croquis géologique technique/coupe transversale du site	Cartographie de géologie de l'ingénieur incluant des coupes transversales du site et de ses environs	Cartographie pour la géologie de l'ingénieur comprenant des coupes transversales du site du projet et de ses environs, à différentes échelles
Investigations de la subsurface	Investigations souterraines mineures en une seule étape, par exemple : puits d'essai, forages	Investigations souterraines selon les besoins à l'aide de forages, de essais au pénétromètre à cône, de moyens géophysiques, etc. Instrumentation	Investigations souterraines en plusieurs étapes, par des méthodes comme les forages, essais in-situ, géophysique, etc., instrumentation et surveillance à long terme le cas échéant. Collecte de données de référence
Essais en laboratoire	Essais en laboratoire limités ou non nécessaires	Essais en laboratoire si besoin	Essais en laboratoire complets et éventuellement spécialisés si nécessaire
Documentation	Documentation du MGG dans un simple rapport combiné de données et d'interprétation	Documentation du MGG dans des rapports contenant les Données et les Interprétations	Documentation du MGG dans des rapports contenant les Données et les Interprétations. Envisager la visualisation numérique 3D
Équipe	Éventuellement une seule personne responsable des travaux	Petite équipe de ingénieurs géologues et ingénieurs-géotechniciens responsables des travaux	Grand groupe multidisciplinaire responsable des travaux
Révision	Révision en interne**	Révision par des pairs en interne/externe**	Révision en externe/panel d'experts**

** Des exigences d'évaluation spécifiques à l'entreprise peuvent exister.

1.2.3 Détail du processus de développement

1.2.3.1 Constituer une équipe, définir sa portée et son but

La composition de l'équipe va dépendre à la fois de la complexité du projet et du terrain. Cela peut aller d'une seule personne possédant les connaissances géologiques et techniques nécessaires dans le cas d'un petit projet, à un groupe multidisciplinaire avec un comité d'experts pour la révision dans le cas d'un projet d'envergure. Les rôles et responsabilités de l'équipe, du ou des évaluateurs et approubateurs doivent être documentés. L'équipe doit commencer par définir le périmètre et l'objectif du MGG et prendre en compte tout changement de propriété du MGG, comme par exemple lorsque le MGG est développé par une agence gouvernementale puis transféré à l'adjudicataire du contrat. Si l'équipe rejoint le projet ultérieurement, ou si le projet est transféré entre des parties contractuellement distinctes, la documentation existante du projet doit être examinée afin d'identifier toute lacune ou insuffisance.

1.2.3.2 Rassembler les informations techniques et géologiques pertinentes dans une étude documentaire

Une étude documentaire est un exercice de collecte d'informations visant à rassembler des données pertinentes afin de tirer profit au maximum des sources disponibles avant d'investir du temps et de l'argent dans la collecte de nouvelles informations. Les informations primaires seront probablement des cartes et de rapports géologiques, des cartes topographiques, des données existantes d'investigation de site tels que des forages, des données de télédétection, des données sur les aléas, etc. Les données historiques ne doivent pas être ignorées sous prétexte qu'il existe des ensembles de données plus récents, ou qu'elles ont été enregistrées dans un style non conforme aux normes en vigueur.

Dans le cadre de l'étude documentaire, une cartographie de reconnaissance doit être réalisée lorsque cela est possible. Cela permet d'évaluer les données de l'étude documentaire et facilite la conceptualisation.

1.2.3.3 Conceptualiser un MGG

La conceptualisation est le processus par lequel toutes les informations disponibles sont prises en compte et qu'une compréhension des conditions probables du terrain sur le site, ainsi que de leur évolution au fil du temps, est entreprise. Cette étape doit être réalisée initialement après l'étude documentaire, puis périodiquement à mesure que des informations complémentaires sont acquises. La conceptualisation permet d'évaluer les conditions et les variations du terrain en présence, ainsi que les processus géologiques et géomorphologiques qui en sont à l'origine et qui pourraient avoir une incidence technique sur le projet. Il est parfois utile de développer un modèle conceptuel temporel pour illustrer l'évolution des conditions du terrain sur la période récente et au cours des temps géologiques.

Durant la conceptualisation, les aspects suivants du site doivent être pris en compte :

1.2.3.3.1 Le cadre du projet

Les points suivants doivent être considérés :

- Le contexte tectonique global et la géologie régionale de l'emplacement du projet.
- Les paramètres climatiques actuels, passés et potentiellement futurs du lieu du projet.
- La nécessité de regarder au-delà de la zone immédiate du site, par exemple pour l'évaluation des risques de glissement de terrain dont l'origine peut se situer en dehors du site.

1.2.3.3.2 La stratigraphie – les types de roches et de sols et leurs relations

Cet aspect nécessite une compréhension des processus de formation et d'évolution des roches, ainsi que des processus de formation, transport et dépôt des sols à l'origine des types de roches et de sols présents sur le site du projet. Cela permet de prendre en compte le massif rocheux, les propriétés des roches et des sols, les caractéristiques probables des unités homogènes géotechniques, y compris les conditions aux limites de ces unités, ainsi que leur géométrie probable, leur distribution et leurs relations, tant entre elles qu'avec le projet.

Il est essentiel de comprendre l'âge stratigraphique des matériaux et la séquence des événements géologiques auxquels les matériaux ont été soumis depuis leur formation. Cela favorise l'approche par modèle géologique total (*total geological model approach*) dans laquelle toutes les caractéristiques techniques du sol sont interprétées comme résultant de l'histoire géologique et géomorphologique de la région.

1.2.3.3.3 Les structures géologiques

Il est essentiel de comprendre les structures géologiques, notamment la présence de structures d'origine tectonique à toutes les échelles, la nature des limites des unités homogènes du point de vue de la géologie de l'ingénieur, et les discontinuités qu'elles contiennent, leur origine, géométrie, espacement, extension, traits caractéristiques et leur importance technique. Cette compréhension doit également inclure la chronologie et la séquence des événements de formation des roches et des sols, les phases de déformation, l'évolution du relief et les effets de la relaxation des contraintes.

1.2.3.3.4 Les processus de surface et de subsurface

Il est nécessaire d'identifier les aléas actifs ou qui pourraient être réactivés et de procéder à une évaluation initiale de leurs probables variations en termes de magnitude et de fréquence au cours du temps. Il est nécessaire d'évaluer également l'état des eaux de surface et de subsurface et son évolution potentielle au cours du temps.

1.2.3.3.5 La caractérisation géologique initiale

Il peut être possible d'attribuer des paramètres géotechniques à des parties du modèle conceptuel, sur la base de données ou de connaissances existantes, dans la mesure où cela est raisonnable, compte tenu des données disponibles. Par exemple : la résistance du sol et des roches, la raideur, la perméabilité, les processus géomorphologiques, etc. L'évaluation des risques géotechniques potentiels (et des opportunités de projets possibles) peut être utilisée pour implémenter un registre des risques initial.

1.2.3.3.6 Le Modèle Géologique initial

La conceptualisation va générer un **Modèle Géologique** initial qui peut être utilisé pour planifier les investigations du site. Le Modèle Géologique initial sera ensuite affiné grâce à l'acquisition de ces données d'investigations.

1.2.3.4 Acquérir des observations de la zone du projet par le biais d'investigations

Les informations acquises durant l'étude documentaire représentent le point de départ de l'élaboration des modèles conceptuel et d'investigation. Cependant, la plupart des observations sont acquises lors des phases d'investigations du site du projet. D'autres observations doivent être ajoutées pendant la construction et l'exploitation.

Une interprétation géologique de l'environnement de dépôt et/ou de l'âge stratigraphique doit accompagner toutes les descriptions de matériaux dans les logs de forage, les puits d'essai, affleurements, etc.

Les études de site qui se limitent uniquement à des observations et des interprétations sans avoir recours à un cadre conceptuel sont susceptibles d'être fondamentalement erronées et ne doivent pas être acceptées.

Après la conceptualisation, il convient de bien comprendre les caractéristiques possibles et la répartition des unités homogènes géotechniques sur le site, la nature de tous les aléas et les éventuelles lacunes dans le cadre des connaissances. Cette compréhension doit ensuite se concentrer sur les caractéristiques des terrains essentielles pour la conception et doit servir à identifier les cibles d'investigation mais aussi à planifier les investigations qui amélioreront la compréhension et réduiront l'incertitude dans ces zones critiques.

L'importance d'une cartographie systématique dans l'investigation de tout projet est soulignée. La cartographie doit inclure des observations précises et pertinentes sur l'ensemble de la zone du projet ainsi que des interprétations raisonnées et fondées de ces observations. Tous les projets doivent avoir

une carte géologique d'ingénierie établie et détenue par l'équipe en charge des investigations. Ces cartes doivent essentiellement être élaborées sur le terrain, même si, de plus en plus, la composante terrain inclut la vérification sur le terrain de cartes préparées au bureau en combinant des observations dérivées de divers jeux de données dans un environnement numérique 2D ou 3D, ou de l'interprétation d'images de télédétection. Il est essentiel que toute cartographie pour la géologie de l'ingénieur capture également les structures géologiques (par exemple, les linéations, les schémas structuraux, les types de discontinuités et les traces de contact, etc.) ainsi que la géomorphologie.

Pour les projets de plus grande envergure, les sites plus complexes ou les structures critiques, l'étude du site est habituellement réalisée en plusieurs étapes, les données d'observation acquises étant comparées au modèle conceptuel pour déterminer quelles zones d'incertitude et quels risques restent à être évalués dans les prochaines étapes de l'étude.

Les investigations vont permettre d'acquérir des données d'observation qui comprennent généralement :

- Des relevés topographiques et, de plus en plus, des MNT (Modèles Numériques de Terrain) générés à partir de données LiDAR (*Light Detection And Ranging*).
- Une cartographie géologique à des échelles variées, allant des études régionales, aux études de zones de projet, en passant par les études à composantes géotechniques et les études de fondations individuelles. Les cartographies doivent être intégrées de manière transparente dans un ensemble de données unique, consultable à plusieurs échelles.
- Les informations issues des investigations comme les forages, sondages, puits, etc.
- Les diagraphies de forage (imagerie, données géophysique et autres outils).
- L'instrumentation installée et les résultats du monitoring.
- Les résultats d'essais en laboratoire et in situ.
- Les mesures des eaux souterraines et de surface.
- Les résultats des mesures géophysiques.
- Les descriptions et classifications (par exemple les types de roches, et les classes de résistance des roches, en utilisant des systèmes et une terminologie reconnus).
- Les mesures comme les profondeurs d'intersection des unités homogènes géotechniques dans les forages, les orientations et les pendages des strates et les discontinuités.
- Les techniques de télédétection comme l'InSAR (radar interférométrique à synthèse d'ouverture).
- Toute autre donnée d'observation, notamment les modèles d'observation temporels (par exemple, les séries chronologiques de sismicité, précipitations, glissements de terrain, etc) qui sont essentielles pour prédire la fréquence des futurs aléas.

1.2.3.4.1 Vérification des données d'entrée

Avant toute interprétation des données d'investigation, il convient de procéder à une revue et à une compilation des données, afin de vérifier, pour chaque ensemble de données, les questions clés portant sur l'exactitude, l'utilité et la représentativité. Toute préoccupation concernant l'exactitude et la représentativité de l'ensemble de données doit être documentée et accompagnée de toutes les explications possibles.

1.2.3.5 Combiner les idées conceptuelles et les données d'investigation

La combinaison des composantes conceptuelles et d'investigation implique une *interprétation*.

Ce processus itératif qui consiste à combiner les composantes conceptuelles et d'investigation d'un MGG dans une interprétation doit être traçable, documenté et structuré. Les jugements subjectifs des

responsables de l'élaboration d'un MGG doivent être évités et remplacés par des sources objectives et évaluables (par exemple, modèles et études de cas issus de la littérature, cartographies, investigations et suivis géotechniques, etc.) en accompagnement du raisonnement qui a conduit à les intégrer dans l'interprétation.

1.2.3.6 Définition et caractérisation des unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur

L'un des produits clé de tout MGG est la définition des unités homogènes géotechniques. Celles-ci sont fondées sur la compréhension de leurs caractéristiques géologiques et de leur comportement géotechnique en les adaptant au projet. La définition de ces unités contribue à l'élaboration du Modèle Géologique.

Une approche courante consiste à adopter des unités homogènes géotechniques en fonction des divisions litho-stratigraphiques distinctes identifiées sur le site (c'est-à-dire les unités de sol et de roches différenciables), qui sont en général des subdivisions des unités chronostratigraphiques (unités basées sur l'âge) fournies sur la carte géologique. Cependant, les unités litho-stratigraphiques peuvent ne pas correspondre aux unités homogènes géotechniques (c'est-à-dire qu'elles peuvent ne pas prendre en compte les processus géomorphologiques, le comportement géotechnique, les caractéristiques hydrogéologiques, etc.) De plus, la résolution des unités stratigraphiques peut ne pas convenir à l'objectif du modèle.

Néanmoins, les unités homogènes géotechniques ne doivent pas mélanger les faciès litho-stratigraphiques. Les unités litho-stratigraphiques présentent une histoire géologique distincte et des histoires géologiques différentes ne doivent pas être combinées dans une même unité homogène géotechnique, même si leurs caractéristiques géotechniques sont similaires. Les zones de faille, qui peuvent nécessiter une analyse séparée et qui, par définition, recoupent les limites litho-stratigraphiques, constituent une exception. Il est à noter que ces limites sont dépendantes de l'échelle considérée – les limites pour un modèle régional peuvent être différentes de celles du modèle à l'échelle du site.

Les unités homogènes géotechniques doivent refléter ces conditions, qui sont d'importance pour le projet, et peuvent inclure les facteurs géologiques comme l'érosion, l'altération et la fracturation. La figure 1-3 décrit les opérations nécessaires à l'établissement des unités homogènes géotechniques et donc au développement du Modèle Géologique. Comme pour les autres aspects du MGG, la résolution et l'échelle de ces unités doivent être clairement liées à la portée et à l'objectif du MGG. Les unités homogènes géotechniques doivent être revues à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles.

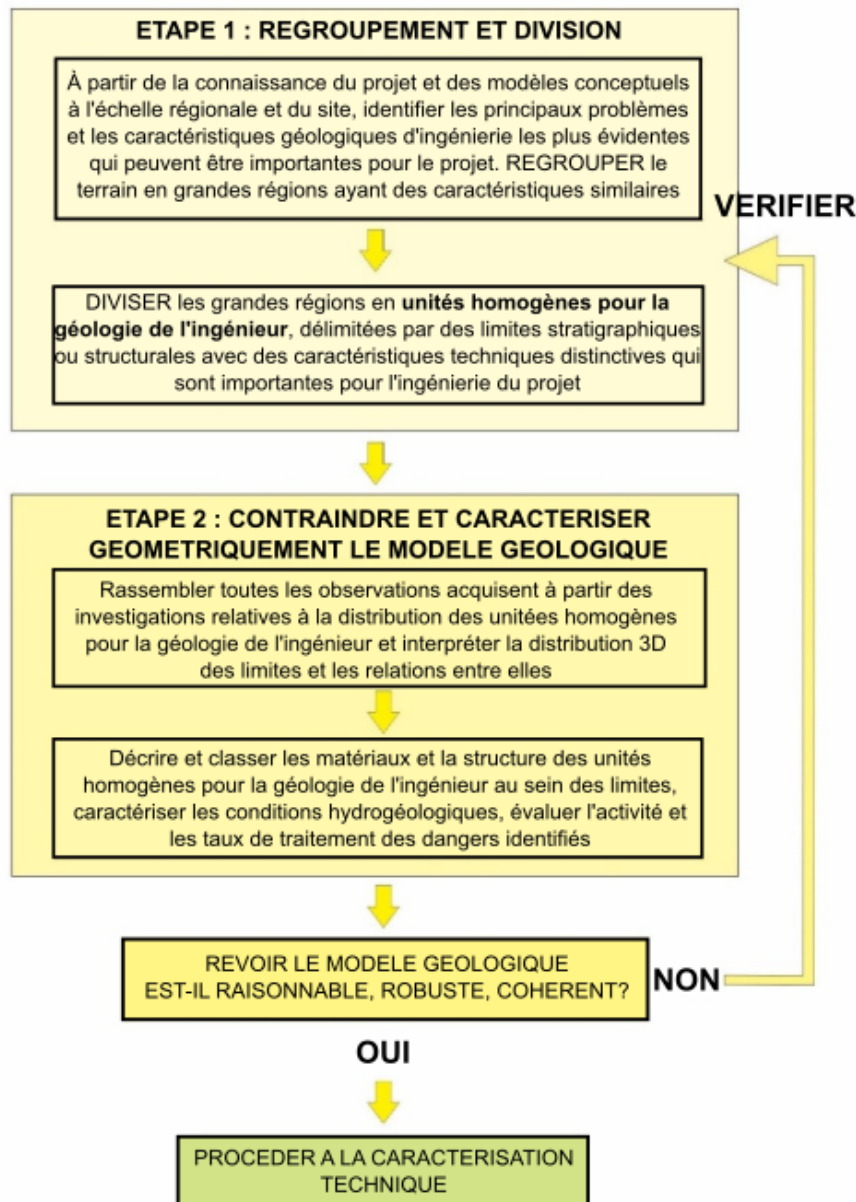


Figure I-3 Établissement des unités homogènes géotechniques et des bases du Modèle Géologique.

I.2.3.6.1 Complexité géotechnique

Dans les zones complexes du point de vue géotechnique, les propriétés géotechniques peuvent varier rapidement, potentiellement sur une large gamme, sur le site du projet. Cette complexité géotechnique doit, dans la mesure du possible, être reflétée dans le Modèle Géologique sous la forme d'unités homogènes géotechniques, avec des distributions et interconnexions appropriées. Lorsque ce n'est pas possible, une simplification peut s'avérer nécessaire. La documentation du MGG doit alors décrire les processus et l'histoire géologiques à l'origine de la complexité géotechnique, la nature des hypothèses simplificatrices utilisées pour générer les unités homogènes géotechniques, et illustrer la complexité potentielle à l'aide d'une visualisation du modèle conceptuel.

I.2.3.7 Caractérisation technique

La caractérisation technique implique l'évaluation et l'attribution des paramètres géotechniques pertinents pour le projet d'ingénierie à chaque unité homogène géotechnique dans le Modèle Géologique, ce qui constituera ensuite un Modèle Géotechnique.

Le processus débute dès la conceptualisation, même si les paramètres assignés à ce stade sont probablement empreints d'une incertitude considérable. L'étude du site comprend des essais *in situ* et en laboratoire pour faciliter l'évaluation des paramètres géotechniques pertinents qui varieront en fonction des conditions du terrain et du type de projet. Les résultats de ces études amélioreront ainsi la caractérisation des unités homogènes géotechniques et réduiront les incertitudes, tout en constituant probablement une amélioration de ce qui était envisagé dans le modèle conceptuel.

Le Modèle Géotechnique peut impliquer une simplification des détails du Modèle Géologique. Par exemple, une zone de faille complexe peut se réduire aux surfaces limite et à certaines hypothèses simplificatrices sur la résistance, la raideur et la perméabilité de l'ensemble de la zone de faille. Cependant, cette simplification ne doit pas éliminer les unités homogènes géotechniques les plus importantes, qui doivent être considérées de manière individuelle en raison de leur singularité géotechnique.

L'approche suivante devrait être adoptée :

- L'accent doit être mis sur les caractéristiques techniques pertinentes pour le projet.
- Regrouper les résultats des essais en laboratoire et *in situ* pour chaque unité homogène géotechnique identifiée.
- Les propriétés des matériaux et les paramètres géotechniques doivent être déterminés principalement à partir des études spécifiques au site. Cependant, ils peuvent être complétés par des valeurs issues de l'expérience, de la théorie, de corrélations ou d'une réflexion empirique, à condition que la méthode de détermination soit expliquée, justifiée et référencée.
- Tenir compte des biais résultant des difficultés d'échantillonnage et des essais, ainsi que du nombre d'essais réalisés pour chaque unité, et déterminer la gamme de valeurs représentatives pour l'unité homogène géotechnique. Il convient d'éviter de moyenniser les propriétés des matériaux, ce qui masquerait la présence de zones de faiblesse significatives. L'entièreté des résultats doit être considérée pour identifier la probabilité que des valeurs soient supérieures ou inférieures aux valeurs représentatives.
- Comparer les valeurs représentatives avec l'expérience et les valeurs publiées pour des unités similaires.
- Examiner et expliquer tout résultat anormal ou extrême. Ceux-ci peuvent indiquer que les unités homogènes géotechniques doivent être affinées.
- Mettre en évidence les éventuelles limites des données ou de l'analyse.

Il convient de noter que le choix, réalisé par le concepteur, des paramètres techniques à utiliser dans l'analyse doit être basé sur les informations données ci-dessus, idéalement représentées graphiquement, couplées à des considérations sur les objectifs techniques du projet, les risques et éventuellement les exigences de code éventuellement en vigueur.

1.2.3.7.1 Zonage

Une fois les unités homogènes géotechniques définies et les caractéristiques géotechniques évaluées, il peut être utile de définir des zones ou des domaines possédant les mêmes caractéristiques

géotechniques. Ces zones peuvent être définies par leur comportement géomécanique, leur vitesse sismique, les classifications des massifs rocheux, etc. mais peuvent être également basées sur tout attribut d'importance technique pour le projet, comme par exemple, le potentiel acide lié à la présence de sulfates, la susceptibilité aux glissements de terrain, ou la géochimie des eaux souterraines. Le MGG peut ainsi être utilisé pour une variété d'études d'ingénierie : évaluation du risque, études de constructibilité, etc. Le choix du zonage approprié doit être pris en accord avec les concepteurs et l'équipe d'ingénierie.

L'échelle à laquelle est réalisée le zonage doit refléter la nature des données et l'utilisation prévue des résultats. Le zonage ne doit être ni plus ni moins détaillé que ce que le permettent les données.

Une erreur fréquente consiste à zoner le terrain, à l'échelle d'un forage, puis à essayer de relier les forages entre eux. Il est quasiment impossible de prendre en compte le contexte géologique global et l'histoire géologique dans son ensemble en utilisant cette méthode. Pour que le MGG contribue efficacement à l'analyse technique et à la conception, la sensibilité des analyses à certaines zones critiques définies par le modèle doit influencer la résolution et l'échelle du zonage.

1.2.3.8 Incertitudes, lacunes et divergences dans le MGG

Au cours de l'élaboration du MGG, des évaluations périodiques du degré de concordance entre les idées conceptuelles en évolution et les données acquises progressivement doivent être réalisées. Ces évaluations auront généralement lieu à des étapes convenues du projet.

S'il existe un décalage entre les prévisions et les résultats des investigations, il est nécessaire d'en identifier les causes et d'améliorer le MGG. Si, durant la conception, le MGG ne permet pas de prédire de manière réaliste la façon dont le terrain va réagir au projet avec le niveau voulu de certitude, alors des informations complémentaires sont nécessaires pour l'améliorer. L'amélioration du MGG afin d'atténuer les risques identifiés peut prendre la forme d'investigations complémentaires ou de stratégies de conception, telles qu'un conservatisme accru ou l'adoption de la méthode observationnelle pendant la construction.

Lorsqu'un projet entre en phase de construction, les conditions des terrains mis à jour doivent être évaluées et comparées aux conditions prévues par le MGG. Il convient ensuite d'évaluer si ces variations pourraient avoir un impact sur les méthodologies de conception ou de construction, et si, oui ou non, ces méthodologies doivent être modifiées, ou encore si le registre des risques doit être mis à jour.

Tout au long de l'élaboration du MGG, les incertitudes, les écarts et les divergences entre données peuvent être évalués en termes de risques. Lorsque les risques pour le projet sont jugés importants, ils doivent être consignés dans le registre des risques. La gestion de ces risques doit reposer sur une compréhension du niveau de risque acceptable pour le client et le grand public tel que déterminé par la législation. La tolérance au risque du client doit reposer sur une compréhension éclairée des conditions du terrain connues, qui doivent être communiquées via le registre des risques.

1.2.4 MGG et Eurocode

L'approche décrite dans ces Clauses Consultatives constitue un processus global permettant de développer un cadre de connaissances du MGG pour la prise de décision technique, sur tout type de projet, à n'importe quelle étape de son cycle de vie. L'approche Eurocode a une application plus restreinte à certaines étapes de certains types de projets et présente des différences terminologiques, notamment concernant les composants d'un « modèle de terrain », alors que le concept de Modèle de Génie Géologique développé tout au long du cycle de vie d'un projet n'est pas mentionné.



[Se reporter à la section 2.2 du Commentaire PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT D'UN MGG pour plus d'informations](#)

1.3 ASSEMBLAGE ET COMMUNICATION DU MGG

1.3.1 Introduction

Un MGG doit être documenté dans un format qui peut être utilisé pour communiquer ses différents composants, principalement aux consultants et entrepreneurs, mais également à d'autres publics.

La documentation doit inclure au minimum du texte, des cartes, et des coupes, mais le plus souvent elle sera constituée d'un texte détaillé accompagné de diagrammes, tableaux, logs, photographies, cartes, coupes, ensembles de données, données traitées et modèles numériques qui, tous, devront être essentiellement transparents, explicites et complets, et pouvoir être clairement et facilement compris.

Toutes les données du MGG doivent être traitées et conservées dans un système centralisé, standardisé et intégré de gestion et de présentation. Ces données sont variées, allant de cartes et coupes dessinées à la main, à des modèles 3D (spatiaux), voire parfois des modèles sophistiqués générés par logiciels et des modèles 4D (spatiaux et temporels).

1.3.2 Consignes pour la documentation des éléments d'un MGG

Le tableau I-4 est un exemple de consignes à suivre par les consultants pour documenter les différents éléments d'un MGG. Pour les petits projets, la plupart de ces éléments peuvent être décrits en un seul paragraphe et l'ensemble de la documentation peut être présentée dans un seul rapport succinct.

Dans certains cas, une étude de site peut être définies sur la base d'un MGG, mais une fois l'étude terminée, l'exigence contractuelle peut se limiter à la production d'un Rapport de Données. La documentation du MGG sera alors incomplète, faute de contenu interprétatif, ce qui devra être reconnu et documenté par toutes les parties du contrat.

Pour les grands projets, il peut y avoir plusieurs volumes de rapports différents dans lesquels les éléments du MGG seront inclus.

Dans le cadre de projets d'envergure, lors d'un appel d'offres pour des études géotechniques, la fourniture de tous les éléments du MGG doit idéalement être indépendante de la fourniture des Rapports de Données et d'Interprétation. Dans ce cas, le dossier d'appel d'offre devrait décrire précisément les attentes en matière de développement du MGG, alors que le processus d'évaluation des offres devrait tenir compte des capacités du promoteur en matière de MGG. Des allocations budgétaires appropriées devraient être prévues dès le lancement du projet.

1.3.3 Conséquences sur la contractualisation des projets

La documentation des éléments du MGG préparée conformément aux présentes Recommandations devrait idéalement être incluse ou référencée dans la documentation du projet. Selon la stratégie d'approvisionnement du Client, le calendrier du projet devrait prévoir des points de conservation identifiables où la documentation des éléments du MGG doit être complétée et conservée afin de garder une trace de l'état des connaissances à ce moment-là. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, la documentation des éléments du MGG peut être révisée pour refléter l'évolution des connaissances. Voici quelques points d'arrêt typiques :

- Pour les petits projets, il y aura un seul point d'arrêt, généralement à la fin de l'étude du site.
- Pour les projets de plus grande envergure, certains ou tous les points d'arrêt suivants peuvent s'appliquer :
 - À l'issue de l'étude documentaire.

- À l'issue de chaque étape de l'investigation.
- À l'issue de chaque étape de la Conception.
- À la finalisation du contrat pour les Travaux Principaux.
- Au moment de l'accord sur les Conditions de Base, le cas échéant.
- Aux étapes convenues pendant la construction, en lien avec l'achèvement de divers éléments du projet, par exemple les fondations d'un barrage, les tunnels, etc.

Lors de l'appel d'offres pour les travaux principaux, la documentation contractuelle doit garantir que le MGG est transféré aux soumissionnaires, lorsque les dispositions contractuelles le permettent.

Tableau I-4 Consignes pour la documentation des éléments d'un MGG.

1. La documentation des éléments du MGG doit suivre les Recommandations de l'AIGI pour le développement et l'application des modèles de génie géologique lors de projets.
2. Le Niveau de Développement d'un MGG convenu avec le client (cadre de l'étude) doit être indiquée.
3. Un Rapport de Données doit être présenté. Il fournit les résultats de toutes les investigations, observations et tests réalisés en laboratoire, y compris les informations de toutes les études précédentes.
4. Un Rapport d'Interprétation doit être présenté (éventuellement sous forme de rapports séparés). Il doit comprendre :
 - (i) Les résultats de l'étude documentaire.
 - (ii) Le Modèle Conceptuel et les principaux risques initiaux identifiés.
 - (iii) La justification de l'élaboration de l'étude du site, en prenant en compte le modèle conceptuel et les principaux risques liés au terrain.
 - (iv) Les unités homogènes éotechniques identifiées, c'est-à-dire les volumes de terrain présentant une histoire géologique et un comportement géotechnique similaires dans le contexte de l'ingénierie du projet.
 - (v) Un Modèle Géologique documentant la répartition en 3D des unités homogènes géotechniques, les conditions hydrogéologiques et les processus géologiques, ainsi que leur évolution potentielle au cours du temps.
 - (vi) Un Modèle Géotechnique présentant les caractéristiques techniques et les paramètres géotechniques pertinents de chaque aspect du Modèle Géologique. Pour chaque unité homogène géotechnique identifiée, une description technique et les paramètres géotechniques doivent être fournis.
 - (vii) Des cartes, des plans et des coupes à une échelle appropriée doivent être fournis pour illustrer les Modèles Géologique et Géotechniques interprétés et pour éclairer l'évaluation technique de tous les éléments géotechniques du projet. La combinaison des informations géologiques, géotechniques et d'ingénierie du projet dans un seul schéma ou ensemble de schémas est souvent utile.
 - (viii) Une évaluation des aléas, si nécessaire.
 - (ix) Si un modèle numérique 3D fait partie de la documentation, un Rapport de Modèle Numérique 3D doit être fourni.

1.3.4 Établir les rapports du MGG

Lors de l'établissement des rapports il convient de bien différencier ce qui suit :

- Les informations sur les données et les investigations.
- Les interprétations, y compris les conceptualisations.
- Les opinions.

Les exigences recommandées pour l'établissement des types de rapport suivants sont décrites ci-dessous.

1.3.4.1 Rapport de Données

Un Rapport de Données doit inclure les informations suivantes, sans toutefois s'y limiter :

- Objectifs et portée convenus.
- Localisation et description du site du projet.
- Description de la géologie régionale et locale ainsi que toute modification anthropogénique du site du projet, basée sur des données préexistantes.
- Détails de toute étude antérieure sur le site ou à proximité.
- Un plan indiquant les emplacements des études existantes et actuelles.
- Méthodes d'investigation employées.
- Résultats des études et informations acquises.
- Tests en laboratoire et *in situ* menés et synthèse des résultats.

Toute interprétation entreprise dans le cadre du Rapport de Données, par exemple l'attribution d'unités lithologiques ou stratigraphiques, ou encore une interprétation géophysique, doit être clairement consignée comme telle et l'incertitude associée, y compris les interprétations alternatives, doivent être documentées. Une "déclaration de limitation" relative à tout aspect interprétatif du contenu principal du rapport de Données doit être incluse.

1.3.4.2 Rapport Interprétatif

Le Rapport Interprétatif doit inclure les éléments suivants, sans toutefois s'y limiter :

- Référence aux données sur lesquelles l'interprétation est basée (les données ou le Rapport de Données).
- Résultats de l'étude documentaire.
- Modèle conceptuel et principaux risques identifiés.
- Justification de la conception de l'étude du site, prenant en compte le modèle conceptuel et les principaux risques et incertitudes.
- Sur la base des résultats des investigations, des informations suffisamment détaillées et documentées concernant les aspects suivants du projet sont requises :
 - Stratigraphie, lithologie, âge, érosion et altération.
 - Traits structuraux, caractéristiques des défauts ou des discontinuités.

- Géomorphologie et processus de surface et subsurface pertinents.
- Conditions des eaux de surface et souterraines.
- Histoire Géologique Totale pertinente pour les conditions probables du terrain.
- Détails de toute modification d'origine anthropique sur le site du projet.
- Les Unités Homogènes géotechniques identifiées, et les fondements de leur adoption.
- Un Modèle Géologique documentant la distribution en 3D des unités homogènes géotechniques, les conditions hydrogéologiques et les processus géologiques, ainsi que leur évolution au cours du temps, leurs contrôles et conditions aux limites, toute observation ou interprétation concernant les eaux souterraines, les processus géomorphologiques et les aléas sur le site ou ses abords. Le Modèle Géologique doit caractériser les unités de terrain présentant des propriétés d'ingénierie similaires et décrire les limites où des changements de conditions peuvent se produire. Le contexte régional du Modèle Géologique doit être discuté. Les incertitudes du Modèle Géologique doivent être caractérisées. Selon le projet et les exigences pour l'établissement du rapport, le Modèle Géologique présenté peut être axé sur un projet spécifique et être mieux décrit comme, par exemple, par un modèle hydrogéologique ou un modèle de massif rocheux.
- Un Modèle Géotechnique présentant les caractéristiques techniques et les paramètres géotechniques de chaque aspect pertinent du Modèle Géologique, compte tenu du projet. Pour chaque unité homogène géotechnique identifiée, une description technique et des paramètres géotechniques doivent être fournis. La gamme des propriétés des matériaux doit être décrite et la gamme typique de paramètres doit être fournie. L'incertitude du Modèle Géotechnique doit être caractérisée. Le choix des paramètres techniques à utiliser dans l'analyse doit se baser sur les informations mentionnées ci-dessus.
- Tout zonage utilisé ou domaine défini, ainsi que les fondements de leur délimitation.
- Une Évaluation des aléas, si nécessaire.
- Une interprétation technique des implications des conditions du terrain pour le projet.
- Des cartes et des coupes à une échelle appropriée couvrant le site et les environs doivent être fournies pour illustrer et interpréter les Modèles Géologiques et Géotechniques et pour éclairer l'évaluation technique de tout élément géotechnique du projet. Selon le projet, la combinaison des informations relatives au Modèle Géologique et au Modèle Géotechnique dans un seul schéma peut être utile et servir de base à des présentations destinées aux clients, aux actionnaires, aux assureurs ou au grand public.
- Si un modèle numérique 3D fait partie de la documentation, un Rapport de Modèle Numérique 3D doit être fourni, indiquant les incertitudes du modèle numérique et sa fiabilité. Tous les fichiers de données pertinents, incluant les données interprétées et les fichiers de données 3D (par exemple les fichiers de maillage des surfaces limites pour la géologie de l'ingénieur) doivent être inclus.
- Recommandations pour des travaux ultérieurs, si pertinent ou nécessaire.
- Incertitudes subsistantes.

- Une « déclaration de limitations » concernant tous les aspects du rapport, si cela est jugé nécessaire.

1.3.4.3 Rapport Géotechnique de Référence

Pour certains projets de grande envergure, notamment pour les travaux souterrains, le maître d'ouvrage et ses ingénieurs peuvent choisir d'établir un Rapport Géotechnique de Référence afin de répartir les risques liés au terrain entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur. Le cadre de connaissance du MGG permet l'élaboration de « rapports de référence numériques », de « valeurs caractéristiques » et de « conditions de référence du terrain ». Ces éléments du Rapport Géotechnique de Référence sont liés aux clauses contractuelles.

1.3.4.4 Cartes et coupes géologiques

Les cartes et coupes géologiques constituent un élément fondamental du cadre de connaissances d'un MGG et doivent être préparées conformément aux présentes Recommandations.

1.3.5 Créer et visualiser un modèle numérique 3D

On observe une évolution récente mais fondamentale à l'utilisation de logiciels pour la création de modèles numériques 3D, notamment pour les projets de moyenne à grande envergure ou lorsqu'une complexité d'ordre géologique est rencontrée. En retour, cela a permis une amélioration significative de l'interopérabilité du cadre de connaissance des MGG avec d'autres disciplines. Un processus typique de développement d'un modèle numérique 3D est montré en figure 1-4, ci-dessous.

1.3.5.1 Logiciel de modélisation

Il existe une large gamme de logiciels permettant de produire des modèles numériques 3D et 2D.

1.3.5.2 Sources et gestion des données

Il est essentiel de conserver des enregistrements clairs et accessibles de la façon dont ces bases de données ont été créés/modifiées/interprétées/stockées, tout comme des vérifications et autres étapes du processus de développement. Pour faciliter le processus de vérification/révision/approbation, il est important de conserver des enregistrements clairs et accessibles (métadonnées) de la façon dont ces bases de données ont été créées/modifiées/interprétées/stockées. Les liens entre les bases de données d'origine et les bases de données du modèle modifié sont utiles pour garantir la cohérence, préciser la responsabilité et fournir une vision claire de l'incertitude du modèle.

1.3.5.3 Documentation du modèle numérique 3D

Chaque version présentant un intérêt notable d'un modèle numérique 3D doit être accompagnée par un Rapport de Modèle Numérique 3D.

Le rapport de Modèle Numérique 3D doit contenir :

- Le projet, le but et la portée du modèle.
- Une synthèse des éléments de géologie de l'ingénieur pour le site.
- L'étendue géographique, l'échelle et l'applicabilité du modèle, ainsi que le système de coordonnées utilisé.
- Les valeurs d'entrée dans le modèle, y compris les données de subsurface, les données cartographiques, les données ponctuelles de surface et de subsurface ainsi que les surfaces et maillages qui ont été utilisés pour construire le modèle numérique, une évaluation de la qualité et

de la fiabilité des différentes bases de données et les manipulations/transformations qui ont été entreprises pour qu'elles soient incorporées dans le modèle.

- Les unités et les surfaces de délimitation correspondantes représentées dans le modèle numérique, qui peuvent être de nature géologique, d'ingénierie géologique, géomorphologique, hydrogéologique ou géochimique, selon l'objectif du modèle.
- Les données qui n'ont pas été utilisées et pourquoi elles ont été omises.
- La fiabilité et l'état du modèle, ainsi qu'un aperçu de toutes les autres hypothèses et incertitudes du modèle, y compris la fiabilité du modèle et les risques associés.
- Les preuves de vérifications.
- Une synthèse des résultats produits par le modèle, y compris les éventuelles limitations.
- Le Registre de Révision du Modèle et une liste de la gestion des données/du développement des versions du modèle numérique 3D, y compris :
 - La date de la révision.
 - Le détail de la révision.
 - La justification de la révision.
 - Les commentaires de vérification de la révision.

Le Rapport de Modèle Numérique 3D doit être mis à jour à chaque nouvelle itération du modèle numérique 3D. Pour les projets de grande envergure, où les investigations sont menées sur plusieurs fronts, le modèle peut être mis à jour quotidiennement, car il est directement lié aux bases de données. Les nouvelles données y sont donc automatiquement intégrées. Un ingénieur-géologue compétent doit vérifier les nouvelles données lors de leur importation afin de confirmer la pertinence de l'interprétation réalisée et d'effectuer les modifications manuelles nécessaires à l'intégration du nouveau jeu de données.

1.3.5.4 Révision des modèles numériques 3D

L'examen des modèles numériques 3D doit démontrer leur fiabilité, en mettant l'accent sur la qualité du processus de construction, la clarté de la compréhension et la transparence quant aux incertitudes. Avant tout, la révision doit démontrer la concordance entre les résultats du modèle numérique et la réalité des conditions géologiques d'ingénierie observées et interprétées.

Dès qu'un modèle numérique 3D est développé, il est recommandé de générer également des plans et coupes 2D illustratifs pour s'assurer de la transparence du lien avec le MGG sous-jacent et permettre son exploration même sans posséder de logiciel de visualisation. L'élaboration de plans et coupes illustratifs est également souvent une façon utile de détecter d'éventuelles « irrégularités » d'ingénierie géologiques dans le modèle.

La liste de contrôle dans le Tableau 1-5 ci-dessous fournit des éléments spécifiques à prendre en compte durant la révision et la vérification lorsqu'un modèle numérique 3D a été développé.

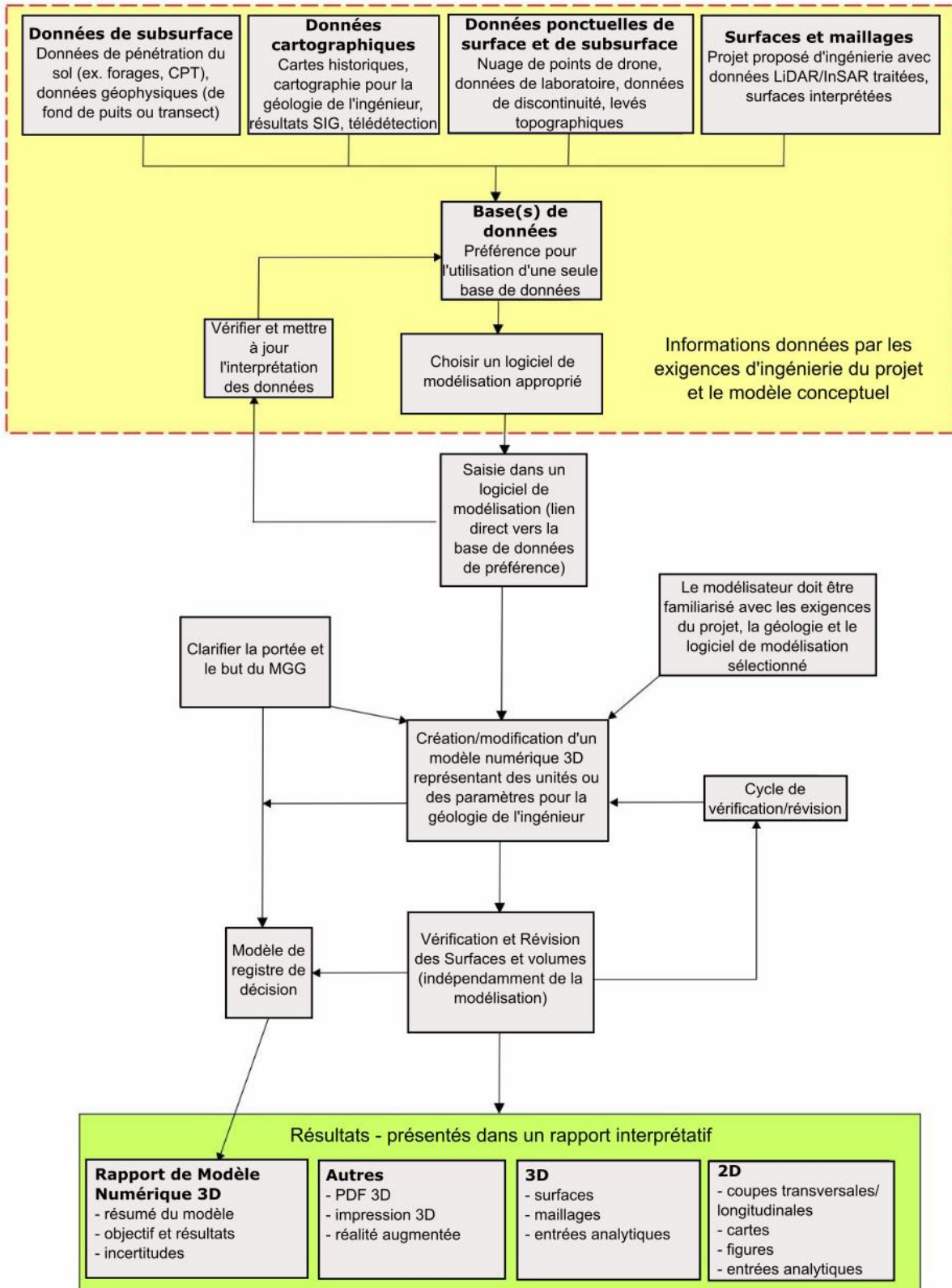


Figure I-4 Procédé de développement typique d'un modèle numérique 3D.

Tableau I-5 Liste de contrôle pour l'examen des modèles numériques 3D.

Activités clé	État
L'objectif du modèle a-t-il été clairement défini ?	
L'étendue du modèle couvre-t-elle la zone d'intérêt du projet et les effets possibles du projet, si le modèle doit être utilisé pour évaluer ses effets ?	
Les sources de données utilisées pour formuler le modèle ont-elles été clairement identifiées ?	
La qualité des données disponibles est-elle suffisante pour l'objectif du modèle ?	
D'autres sources de données potentiellement utiles doivent-elles être intégrées au modèle ?	
Les données qui ont été spécifiquement omises dans le modèle peuvent-elles être raisonnablement ignorées et des raisons ont-elles été données pour lesquelles ces sources n'ont pas été considérées comme applicables ?	
Existe-t-il un nombre suffisant de points de données et une répartition raisonnable des points sur la zone du modèle pour permettre une interprétation représentative raisonnable ?	
La manipulation des données qui ont été utilisées est-elle appropriée et géologiquement raisonnable ?	
Le modèle a-t-il été examiné conformément au niveau de développement du MGG ?	
L'examineur a-t-il été « guidé » à travers le modèle par le modélisateur ?	
Des cartes illustratives et des coupes transversales ont-elles été fournies ?	
Un Rapport de Modèle Numérique 3D, comprenant un Registre de Révisions du Modèle, a-t-il été préparé, les incertitudes et les risques associés ont-ils été identifiés ainsi que des recommandations pour améliorer la fiabilité ?	

I.3.5.5 Résultats des modèles numériques 3D

Une fois le modèle numérique 3D et les résultats vérifiés et prêts à être publiés, le modèle numérique lui-même et les résultats spécifiés peuvent être livrés. La nature des résultats influencera la présentation des informations. Il peut s'agir de résultats 3D ou 2D (ou les deux) selon les exigences du projet. Toutefois, il ne doit pas être nécessaire d'avoir recours à un logiciel de visualisation, car ce n'est pas la méthode de communication la plus efficace. Cartes, graphiques, dessins animés, présentations, etc. peuvent être plus appropriés. La forme de la présentation des résultats et le niveau de détail doivent être adaptés au public ciblé.

[Se référer à la section 2.3 des Commentaires ASSEMBLAGE ET COMMUNICATION DU MGG pour plus d'informations](#)

1.4 GERER LES INCERTITUDES DU MGG

1.4.1 Introduction

L'incertitude au sein du MGG peut réduire la fiabilité du projet technique et accroître les risques potentiels. Il convient d'évaluer cette incertitude ainsi que les risques associés et d'élaborer des stratégies pour les réduire à des niveaux convenus.

1.4.2 Sources d'incertitude

La manière dont les connaissances sont accumulées au sein du MGG reflète la relation dynamique entre la composante conceptuelle et la composante observationnelle. Ces deux composantes fondamentales du MGG sont caractérisées par différentes sources d'incertitude : l'incertitude conceptuelle et l'incertitude observationnelle.

- L'incertitude survenant lors du processus de conceptualisation est due à un manque de connaissances ou à un biais. On parle alors d'incertitude épistémique, mais, par souci de commodité, les présentes Recommandations ont adopté le terme « incertitude conceptuelle ». L'incertitude conceptuelle reflète principalement la pertinence des concepts sous-jacents au MGG, lesquels dépendent fortement des connaissances et de l'expérience des personnes impliquées.
- L'incertitude des données du modèle d'observation est due à la variabilité et au caractère aléatoire des propriétés intrinsèques du terrain, ainsi qu'à la précision des mesures des appareils. On parle alors d'incertitude aléatoire, mais pour plus de clarté, les présentes Recommandations ont adopté le terme « incertitude observationnelle ». Les zones où les observations directes sont moins nombreuses sont susceptibles d'être plus incertaines que celles où elles sont fréquentes. Il est à noter que toute interprétation des données du modèle d'observation sera associée à une incertitude conceptuelle.

1.4.3 Évaluation holistique de la fiabilité d'un MGG par revue critique

La revue critique du projet doit évaluer la fiabilité des composantes observationnelles et conceptuelles du MGG de manière globale, plutôt que de les séparer. Le Niveau de Développement du projet fournit des indications sur le type de revue critique (section 1.2.2 – Tableaux 1-2 et 1-3).

- Pour les projets de niveau 1, une revue critique interne permettra de vérifier la fiabilité du MGG. Un autre ingénieur-géologue de l'équipe responsable du MGG devra vérifier le développement et le perfectionnement du modèle. La fiabilité de la composante conceptuelle devra être comparée à des analogues conceptuels appropriés issues de l'expérience et de la littérature, ainsi qu'à la compatibilité de la composante observationnelle avec la composante conceptuelle évaluée.
- Pour les projets de niveau 2, l'évaluation sera identique à celle du niveau 1, mais sera réalisée par des examinateurs externes. Ceux-ci peuvent être externes à l'équipe du projet ou à l'organisation elle-même.
- Pour les projets de niveau 3, un comité d'experts reconnus devrait idéalement être chargé d'évaluer la fiabilité du MGG en examinant et en commentant de manière indépendante le contenu, l'exhaustivité et la fiabilité de la documentation du projet. Ces experts devraient être désignés par le client comme spécialistes indépendants.

1.4.4 Autres méthodes pour évaluer l'incertitude et la fiabilité d'un MGG

Toutes les informations contribuant au MGG doivent être évaluées afin d'en estimer à la fois l'incertitude et la fiabilité. Pour la composante observationnelle du MGG, ces vérifications sont

relativement simples et peuvent être réalisées de manière quantitative ou qualitative. Cependant, les méthodes quantitatives ne peuvent pas réellement contribuer à réduire les erreurs de fiabilité résultant d'inexactitudes dans la compréhension conceptuelle. Seule la vérification de la véracité des concepts par des approches qualitatives permet d'évaluer cette composante du MGG et, ainsi, de confirmer son niveau de fiabilité.

1.4.4.1 Évaluer la fiabilité de la composante conceptuelle

La figure 1-5 illustre une approche d'évaluation de la composante conceptuelle du MGG. Cette approche doit être adoptée à toutes les étapes du projet par les membres de l'équipe, les pairs évaluateurs et les comités d'experts. Cependant, des vérifications qualitatives de base de la fiabilité conceptuelle du MGG doivent également être effectuées par les personnes impliquées dans son élaboration. Chaque fois qu'un autocontrôle ou qu'un contrôle en interne est effectué, les résultats doivent être documentés.

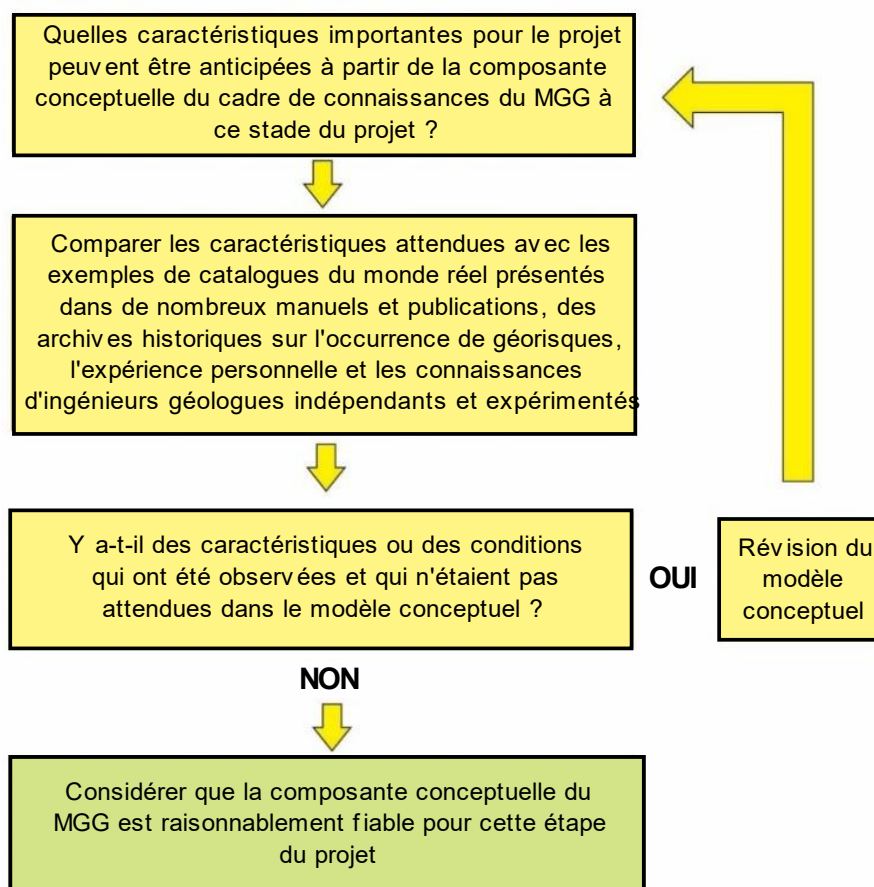


Figure 1-5 Approche pour l'évaluation de la fiabilité de la composante conceptuelle d'un MGG.

1.4.4.2 Évaluer la fiabilité de la composante observationnelle – les approches qualitatives

La fiabilité de la composante observationnelle du MGG peut être communiquée qualitativement à l'aide de méthodes telles que les cartes thématiques et la classification de la fiabilité des jeux de données.

1.4.4.3 Évaluer la fiabilité de la composante observationnelle – les approches semi-quantitatives



Différentes méthodes permettent de classer les composantes du MGG et de combiner les différents scores pour fournir une évaluation numérique ordinaire de la fiabilité.

1.4.4.4 Évaluer la fiabilité de la composante observationnelle – les approches quantitatives

Les évaluations quantitatives se limitent à l'évaluation des composantes observationnelles du MGG. Trois familles d'outils peuvent être utilisées :

- Simulations de Champs Aléatoires et Méthode des Éléments Finis Aléatoires (MEFA, qui implique l'utilisation d'un terrain virtuel aléatoire combiné à une analyse par éléments finis dans une simulation de Monte Carlo).
- Méthodes géostatistiques (stationnaires et non stationnaires, telles que les méthodes de krigeage).
- Simulations stochastiques.

[Se référer à la Section 2.4 du Commentaire, GERER LES INCERTITUDES DU MGG pour plus d'information](#)

I.5 GARANTIR LA QUALITE DU MGG

I.5.1 Vérification de la qualité du processus de développement du MGG

La mise en œuvre de ces Recommandations devrait permettre d'obtenir un MGG de qualité appropriée. Une liste de contrôle AQ/CQ (assurance qualité/contrôle qualité) pour le respect de ces Recommandations est présentée dans le tableau I-6.

Table I-6 Liste de contrôle AQ/CQ pour un MGG

Activité Clé	État
Une équipe efficace et compétente, comprenant un examinateur, a-t-elle été constituée ?	
La portée et l'objectif du MGG ont-ils été clairement définis ?	
Le MGG est-il conforme aux documents/spécifications de l'appel d'offres ?	
Les informations techniques et géologiques pertinentes pour le projet ont-elles été rassemblées dans une étude documentaire ?	
Une étendue et une échelle géographiques appropriées ont-elles été définies pour présenter le MGG ?	
Un modèle conceptuel approprié a-t-il été documenté et est-il raisonnable sur la base de l'étude documentaire ?	
L'étude de terrain a-t-elle été conçue pour réduire les incertitudes identifiées dans le modèle conceptuel ?	
Des observations ont-elles été acquises au moyen d'investigations et documentées sous forme de données ?	
Les sources de données utilisées pour formuler le MGG sont-elles clairement identifiées ?	
La qualité des données disponibles est-elle suffisante pour répondre aux objectifs du MGG ?	
Existe-t-il d'autres sources de données potentiellement utiles ?	
Des données ont-elles été spécifiquement omises du MGG et est-ce raisonnable ?	
Les observations ont-elles été liées aux concepts et une gamme de conditions géologiques d'ingénierie ont-elles été conceptualisées et interprétées ?	
Les unités homogènes géotechniques et leurs caractéristiques techniques ont-elles été définies ?	
Un Modèle Géologique a-t-il été présenté ?	
Un Modèle Géotechnique a-t-il été présenté ?	
Une Évaluation des aléas a-t-elle été présentée ?	
Des risques, des lacunes et des divergences importants dans le cadre des connaissances ont-ils été identifiés ?	
Des informations à utiliser dans l'analyse technique ont-elles été fournies ?	
L'ensemble du cadre de connaissances du MGG a-t-il été documenté ?	
Des cartes et des coupes ont-elles été fournies pour illustrer les conditions géologiques et techniques qui sont importantes pour le projet ?	
Des connaissances supplémentaires nécessaires pour améliorer le MGG, réduire les risques, faciliter la mise à niveau de la conception ou traiter les réclamations ont-elles été demandées ?	
Si un modèle numérique 3D a été développé, la liste de contrôle du tableau I-5 a-t-elle été appliquée ?	



Le MGG a-t-il été examiné par un ingénieur-géologue qualifié et expérimenté, adapté au niveau de complexité de la géologie et du projet ?	
---	--

[Se référer à la Section 2.5 du Commentaire GARANTIR LA QUALITE DU MGG pour plus d'informations](#)



Recommandations pour le développement et l'application de modèles de génie géologique lors de projets

2 COMMENTAIRES SUR LES RECOMMANDATIONS



2.1 PRINCIPES DE CONSTRUCTION DES MGG

2.1.1 Définitions

Pas de commentaire.

2.1.2 Principes fondamentaux

Pas de commentaire.

2.2 PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT DES MGG

2.2.1 Aperçu du processus de développement

Un aperçu du processus de développement d'un MGG est fourni en Figure 2-1.

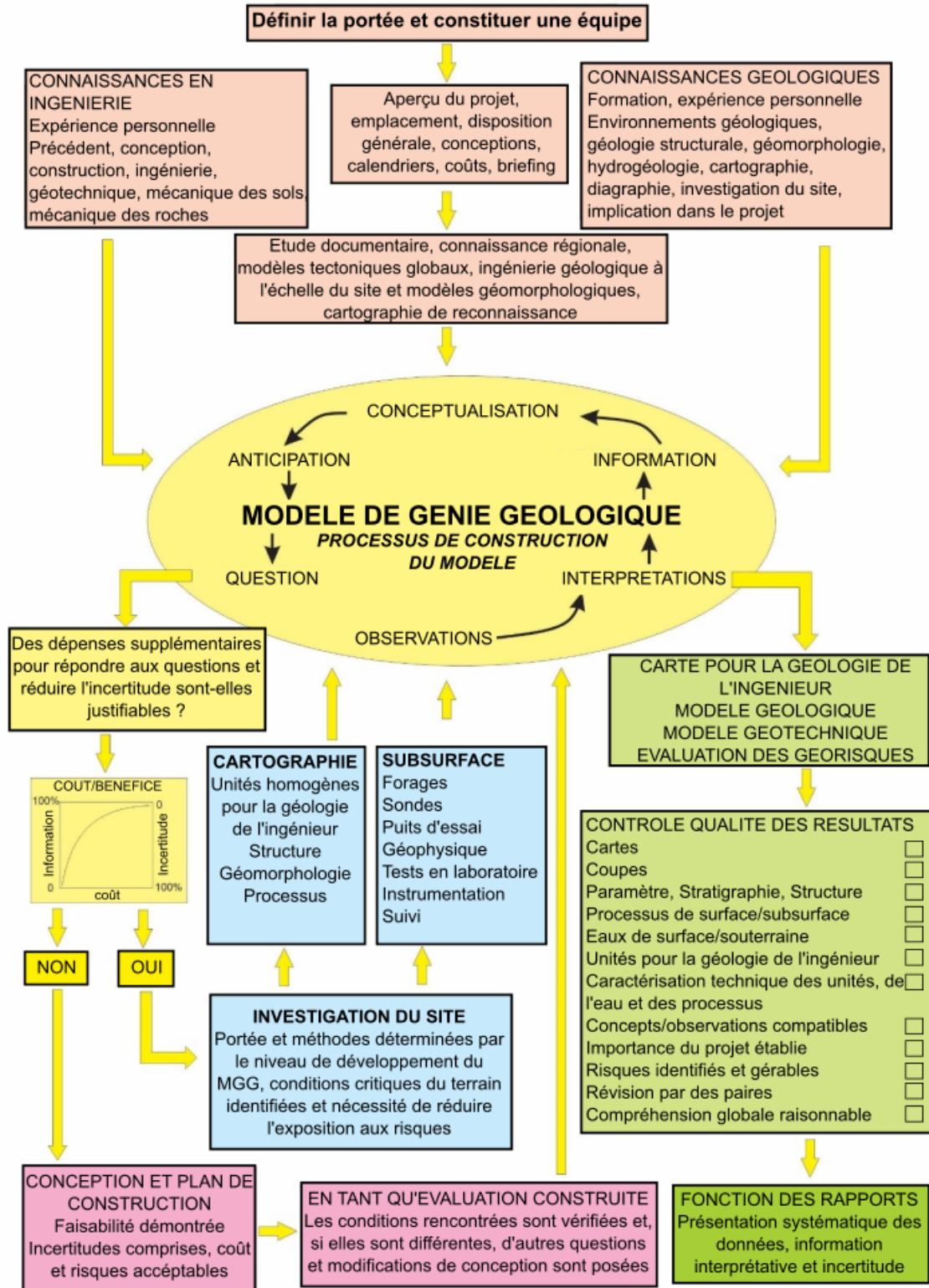


Figure 2-1 Processus de développement d'un MGG.

Une vue du processus de développement d'un MGG pour l'ingénierie des pentes rocheuses est fournie dans la Figure 2-2.

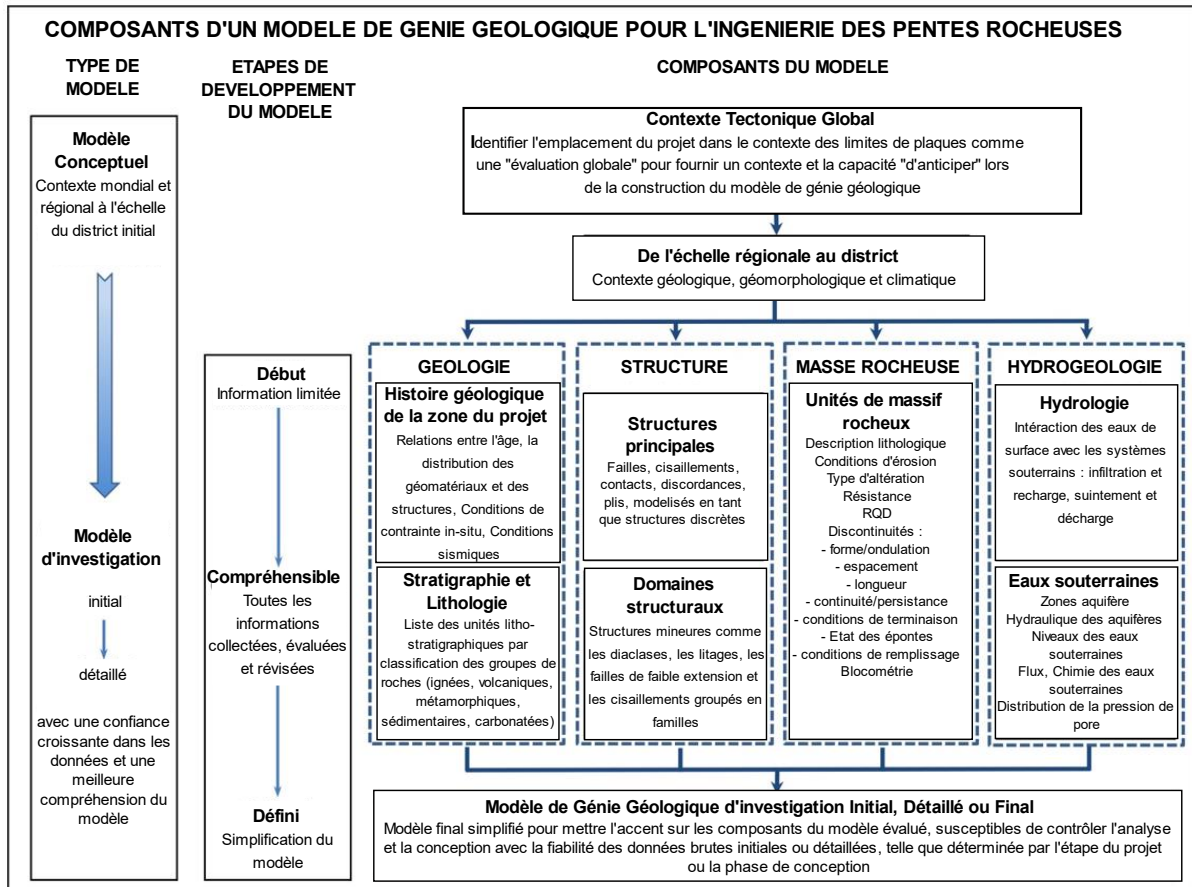


Figure 2-2 Processus de développement d'un MGG pour l'ingénierie des pentes rocheuses (de Eggers, M., MGG pour les projets d'ingénierie des roches, dans Baynes & Parry 2022).

Une vue du processus de développement d'un MGG pour l'ingénierie offshore est fournie dans la Figure 2-3.

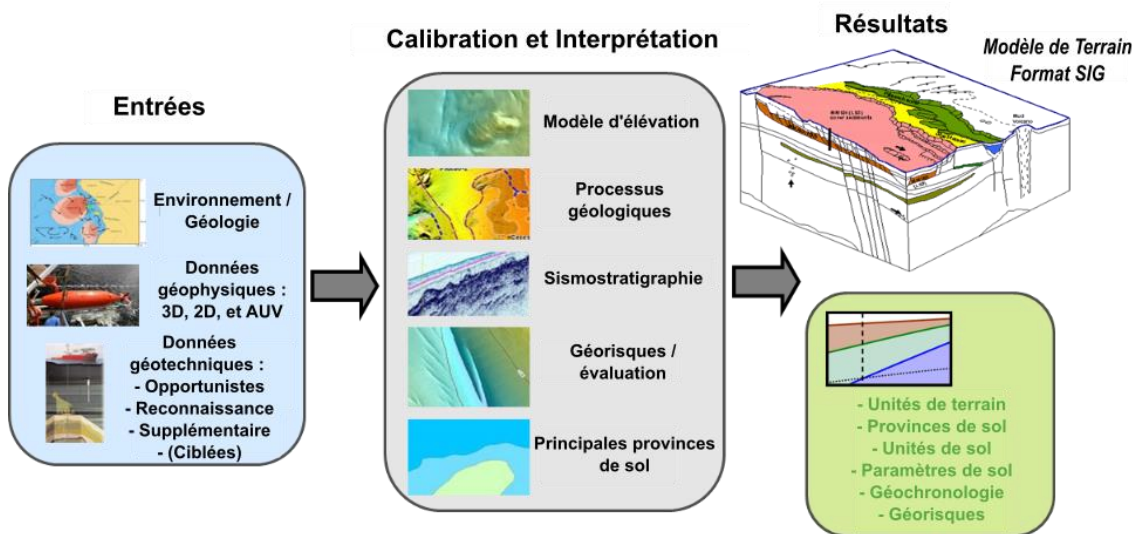


Figure 2-3 Processus de développement d'un MGG pour les études offshore (de Waring, D., MGG pour les études offshore, dans Baynes & Parry 2022).

Une vue du processus de développement d'un MGG pour l'ingénierie des sols est fournie en Figure 2-4.

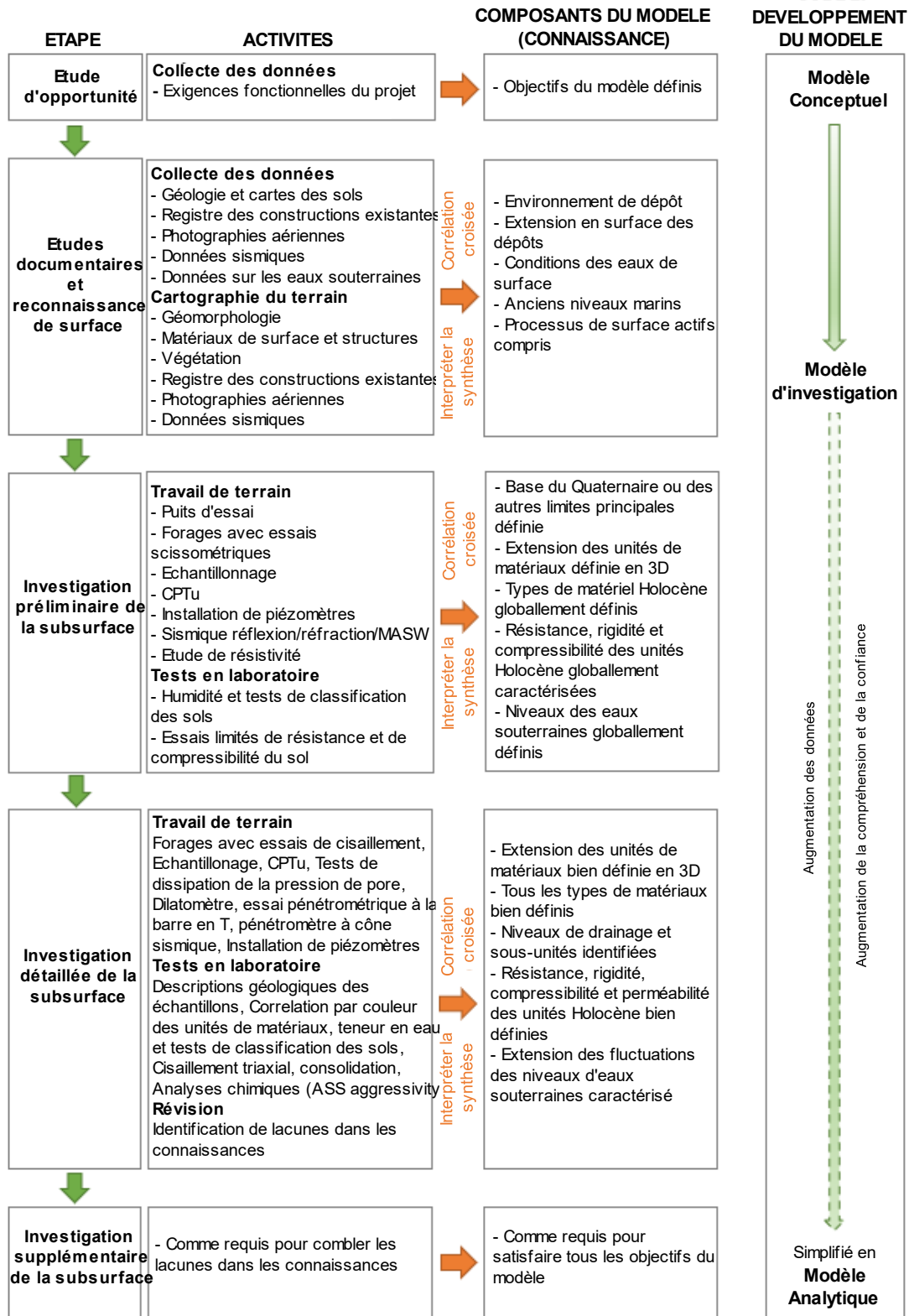


Figure 2-4 Processus de développement d'un MGG pour l'ingénierie des sols (de Shipway, I., MGG pour les études d'ingénierie des sols, dans Baynes & Parry 2022).

Une vue du processus de développement d'un MGG pour les petits projets est fournie en Figure 2-5.

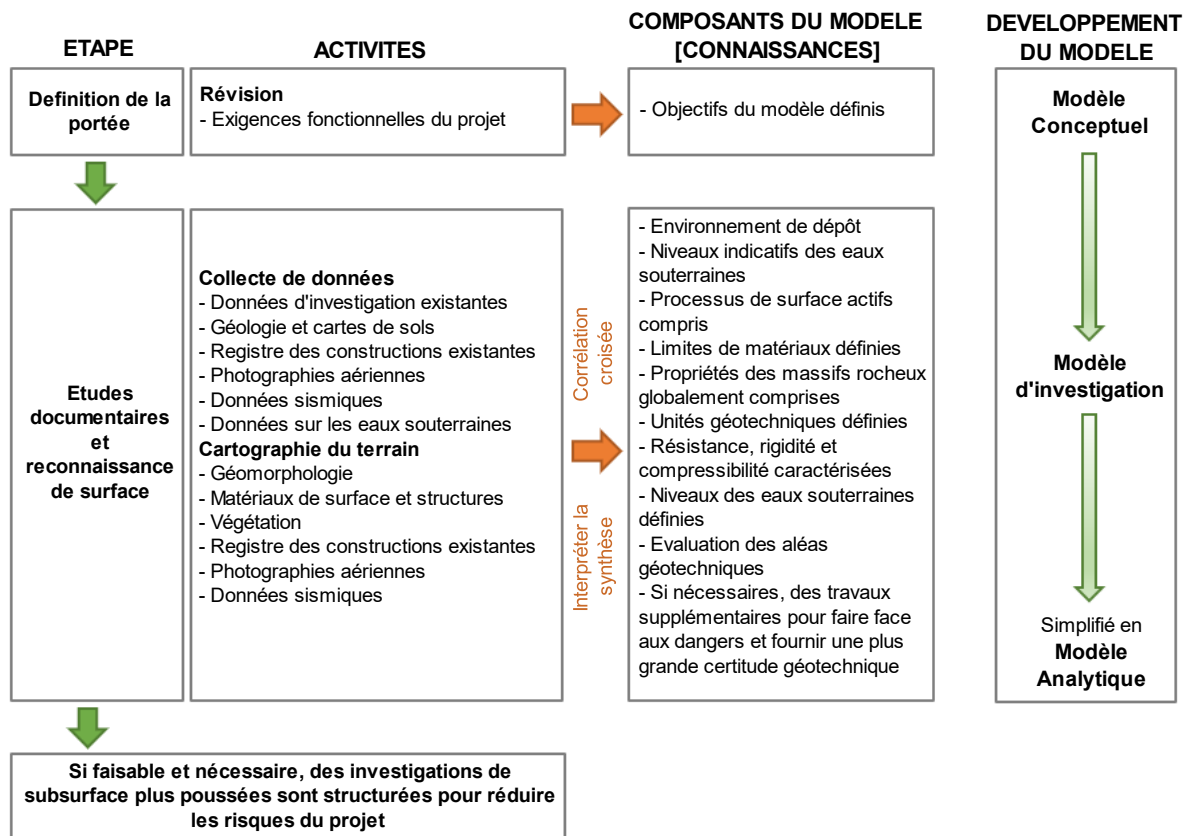


Figure 2-5 Processus de développement d'un MGG pour les petits projets (de Shipway, I., MGG pour les petits projets, dans Baynes & Parry 2022).

2.2.1.1 Processus de développement

Pas de commentaire.

2.2.1.2 Étapes initiales

Pas de commentaire.

2.2.1.3 Techniques utiles pour le développement d'un MGG

Les techniques utiles devant être considérées lors du développement d'un MGG incluent :

- Remettre continuellement en question les concepts, les observations et les interprétations au fur et à mesure de l'élaboration des modèles. Être flexible et rester prêt à changer d'avis.
- Une vue d'ensemble est essentielle : pour développer les travaux sur un MGG, du champ lointain au champ proche, il faut prendre en compte des concepts éloignés comme le contexte tectonique passé et présent ainsi que l'histoire géologique et géomorphologique à long terme, puis utiliser ces connaissances pour évaluer les conditions à l'échelle du site, mais aussi de la zone au-delà du site. Il peut être nécessaire de développer des modèles à grande échelle à partir d'informations initiales à petite échelle.
- Les projets de très grande envergure ou les modèles très complexes impliquant de grandes quantités d'informations peuvent s'avérer difficiles à réaliser. Le MGG doit saisir l'essentiel des

enjeux de la conception ou du projet, tout en étant suffisamment robuste pour évaluer la variabilité géologique inhérente, ainsi que toute modification du projet pouvant intervenir.

- Le MGG doit également prendre en compte la dimension temporelle – par exemple, la vitesse à laquelle les processus géomorphologiques se produisent, et tout impact potentiel sur la structure tout au long de la conception.
- Lorsqu'il est connu, le projet d'aménagement (dessiné à l'échelle) doit être superposé à tous les plans, coupes et visualisations 3D. Cela doit inclure toute modification apportée au projet, comme les ajouts, les déplacements ou les suppressions d'installations, au fur et à mesure de son avancement.

Erreurs courantes commises lors de l'élaboration d'un MGG :

- Omettre des données ou des faits qui ne correspondent pas ou contredisent un modèle préconçu. Les données ne doivent pas être omises, sauf s'il peut être démontré qu'elles sont fondamentalement erronées ; dans ce cas, une réinterprétation doit être tentée avant toute omission. Il est à noter que des informations contradictoires peuvent souvent indiquer une complexité géotechnique non prise en compte lors de l'élaboration du modèle conceptuel.
- Développer des idées conceptuelles incorrectes et inadéquates et/ou des idées conceptuelles qui ne sont pas pertinentes pour le projet.
- Ignorer des données ou informations historiques pertinentes simplement parce qu'elles ne sont pas enregistrées selon les normes actuelles ou ont été acquises au cours d'étapes antérieures du projet.
- Utiliser uniquement des données de subsurface et omettre la cartographie géologique technique et géomorphologique de surface.
- Ne pas effectuer systématiquement de cartographie pour la géologie de l'ingénieur du site et de ses environs ou effectuer uniquement une cartographie dans des zones sélectionnées facilement accessibles.
- Travailler à rebours à partir de la cause, du résultat ou de la solution.
- Utiliser des échelles déformées ou inappropriées. Collecter des données à une échelle inadaptée au projet. Utiliser des échelles exagérées sur les coupes géologiques transversales et longitudinales (si leur utilisation s'avère nécessaire, fournir également une coupe à l'échelle 1 pour 1).
- Essayer d'inclure chaque détail sans interprétation sur son importance.
- Ne pas regarder au-delà du site ou du problème considéré. Par exemple, en termes géomorphologiques, un projet doit être replacé dans le contexte de sa « situation topographique ».
- Inclure des données ou des informations sans référence à leur degré de confiance.
- Interpréter plus en détail que ce que les données ne le permettent.
- Ne pas prendre en compte ni communiquer d'interprétations alternatives.

2.2.1.4 Compétences requises pour le développement du MGG

Les connaissances et compétences requises pour créer de bons MGG comprennent :

- La connaissance des processus géologiques, des environnements de formation des roches et des sols, mais aussi des environnements de modification des roches et des sols tels que l'érosion, la formation des pentes et la relaxation des contraintes (c'est-à-dire une connaissance géologique).
- Réfléchir en 4D (c'est-à-dire prendre en compte les 3 dimensions spatiales et la dimension temporelle).
- Une compréhension de la géomorphologie, en particulier des processus géomorphologiques, de leurs fréquences (dans le temps) et de leurs ampleurs (volume, étendue spatiale, vitesse d'apparition et de propagation).
- Une compréhension de la réponse du sol aux modifications naturelles ou anthropiques (c'est-à-dire des connaissances en ingénierie), en termes de mécanique des sols, de mécanique des roches et d'hydrogéologie.
- La capacité à examiner les détails et à les placer dans le contexte général, à évaluer de manière critique les informations et à surmonter les préjugés inhérents et inconscients.
- Une compréhension du raisonnement géologique et de la méthode scientifique. L'utilisation du raisonnement inductif (processus consistant à formuler des observations simples et à les appliquer par généralisation à un problème différent pour prendre une décision) et du raisonnement déductif (tirer des conclusions fondées sur des règles logiques appliquées à un ensemble d'affirmations).
- Une expérience préalable de création de MGG réalistes et réussis.
- Comprendre quand un soutien technique supplémentaire, souvent spécialisé, est nécessaire. Ce soutien peut inclure la sollicitation de contributions de professionnels spécialisés dans des disciplines telles que l'hydrogéologie, les sciences géoenvironnementales, la géomorphologie, la géophysique, la géologie structurale, les aléas, la pédologie, ainsi que dans des disciplines d'ingénierie pertinentes comme la géotechnique ou l'ingénierie des barrages.

2.2.2 Choix du niveau de développement du MGG

Pas de commentaire.

2.2.3 Détails du processus de développement

2.2.3.1 Constituer une équipe, définir sa portée et son but

Différents projets au même endroit nécessitent le développement de différents modèles en raison de la variabilité de l'interaction potentielle entre la géologie et le projet.

La figure 2-6 illustre l'importance des différents aspects d'un même contexte géologique selon la nature du projet (A – bâtiment de plain-pied, B – pont routier, C – tunnel). Le bâtiment est supposé exercer une faible contrainte verticale sur la surface du sol. Les piles du pont sont supposées exercer des contraintes verticales et latérales plus importantes sur le sol en profondeur, et le tunnel est supposé drainer et modifier le régime d'écoulement des eaux souterraines en profondeur (d'après Parry et al., 2014).

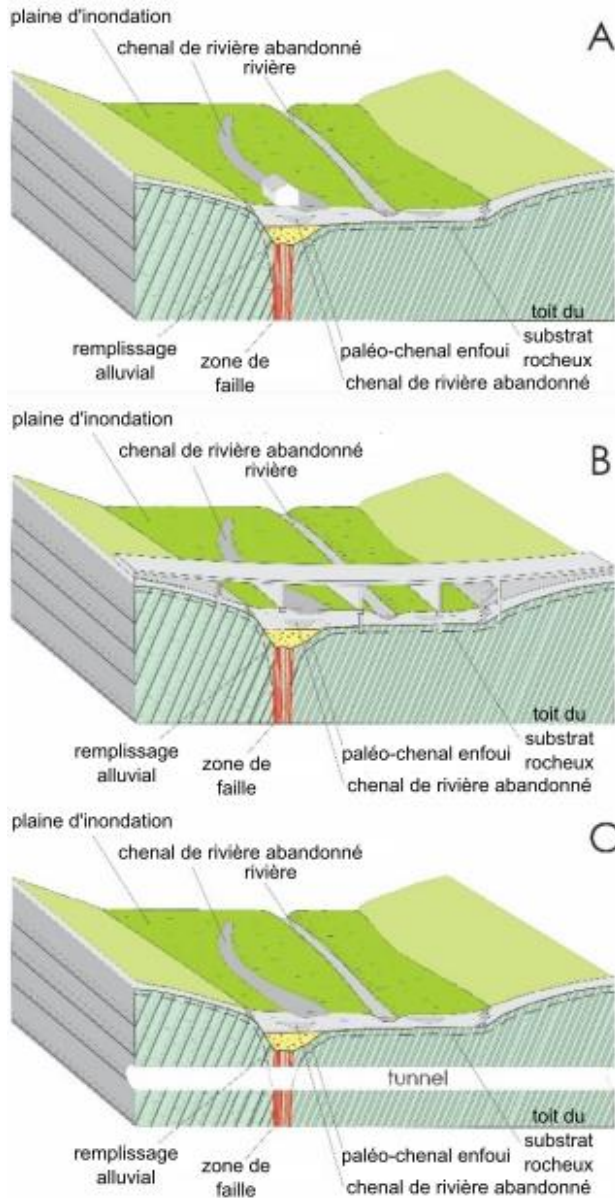


Figure 2-6 Influence du type de projet sur le MGG. Reproduit avec l'autorisation de Springer Nature. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Parry et al. 2014, Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25

2.2.3.2 Rassembler les informations techniques et géologiques pertinentes dans une étude documentaire

Les sources d'information typiques auxquelles il convient d'accéder (lorsqu'elles sont disponibles) au cours d'une étude documentaire sont présentées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 Ressources pour une étude documentaire (de Shilston *et al.* 2012).

<i>Sujet</i>	<i>Exemples de sources d'information</i>
Topographie	Cartes, photographies aériennes, images satellite et aériennes, MNT ou MNT dérivés de relevés LiDAR, données InSAR
Géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géologie de l'ingénieur	Cartes, mémoires et rapports, photographies aériennes, images satellite et aériennes (y compris le relief ombré du LiDAR), articles et livres publiés, registres de mines et de carrières, bases de données thématiques, enquêtes antérieures sur le terrain/site, registres d'utilisation des eaux souterraines, données régionales sur les aléas, par exemple les risques sismiques
Environnement et aménagement du territoire	Cartes de planification, photographies aériennes, images satellite et aériennes, Google Earth, rapports et cartes de géologie urbaine, archives de sites archéologiques et de bâtiments historiques, études de sols, archives de terrains contaminés, études d'impact environnemental, archives climatiques, informations fluviales et côtières
État du site, utilisation du sol et histoire	Cartes historiques, documents historiques, photographies aériennes, images satellite et numériques aériennes (y compris les sources LiDAR), cartes d'utilisation et d'aménagement du territoire, rapports d'enquête sur les sites, propriétés géotechniques et aléas, bases de données, données InSAR, cartographie des constructions antérieures
Visite initiale du site/visite à pied	- Inspection avec un « œil expert » du site et de ses environs - Reconnaissance de terrain - Visites de localités spécifiques
Connaissance locale	Sociétés d'histoire locale et de géologie, utilisation antérieure du site, registres de construction, bureaux de contrôle des bâtiments, journaux, études géologiques régionales et nationales, enquêtes sur les sites adjacents
Précédent	Études de cas, dossiers de construction
Codes, normes, règlements et directives	Organismes et instituts professionnels, ministères, organismes de recherche et universités

Toute recherche documentaire doit distinguer les faits de la fiction. Il existe une multitude de sites web contenant des informations potentiellement pertinentes. Cependant, tous ne sont pas fiables. Il est essentiel de consulter des sites fiables, et les plus adaptés sont ceux des ministères et agences gouvernementales nationales, régionales et locales, des musées, des universités, des organismes savants et professionnels, des organismes de normalisation, etc. (Griffiths 2019). Les sites web des entreprises, des archives de journaux nationaux et régionaux ainsi que les témoignages anecdotiques doivent être traités avec précaution.

De nombreux grands projets devront intégrer dans l'étude documentaire des cartes et des coupes existantes documentées sur papier. Certaines règles de base s'appliquent donc :

- S'assurer, dans la mesure du possible, que toutes les sources de données et tous les documents archivés sont localisés ; cela peut demander des efforts considérables, car les archives sont souvent incomplètes et chaotiques. Des questions de confidentialité et de droits d'auteur peuvent être à prendre en compte.
- S'assurer que la projection et la donnée de tous les anciens enregistrements sont comprises et liées à celles utilisées dans le MGG et correctement documentées. Le SIG est précieux pour permettre l'évaluation spatiale de tous les enregistrements de l'étude documentaire et pour rechercher des tendances dans les données.

2.2.3.3 Conceptualisation

Une stratégie fondamentale pour l'élaboration du cadre conceptuel repose sur la compréhension de *l'histoire géologique globale* du site (Fookes et al., 2000). Cette stratégie repose sur le principe que les caractéristiques techniques du terrain résultent de l'histoire géologique globale de la zone du projet, y compris des modifications anthropiques ultérieures.

La conceptualisation permet également d'approfondir la compréhension des influences géologiques possibles sur un projet, en s'appuyant sur la connaissance et l'expérience de contextes géologiques, de matériaux ou de processus similaires, et de types ou de niveaux de complexité de projets similaires. Ce processus est essentiel à l'élaboration du MGG et se déroule tout au long du projet. L'approche conceptuelle génère des modèles hypothétiques, lesquels comportent potentiellement un degré d'incertitude relativement élevé, directement lié au type et à la quantité de données existantes, ainsi qu'aux connaissances et à l'expérience des acteurs impliqués.

Les modèles conceptuels peuvent être :

- Spécifiques au site, fournissant un cadre pour l'interprétation des données d'observation et permettant d'anticiper les conditions du sol qui peuvent être présentes sur le site spécifiquement étudié.
- Des modèles conceptuels génériques, qui sont indépendants d'un emplacement spécifique et fournissent, par exemple, des informations sur les contextes climatiques ou de géologie structurale.
- Un modèle conceptuel temporel (parfois appelé modèle évolutif) qui illustre comment les conditions du terrain ont évolué au cours des temps géologiques.

Les jeux de données répertoriés dans le tableau 2-1 peuvent être utilisés pour interpréter les informations pertinentes pour le MGG, des façons suivantes :

Cartes topographiques :

- Situation géographique ; par conséquent, climat actuel et occupation des sols.
- Cartographie géomorphologique initiale.
- Identification des linéations structurales.
- Identification des principaux cours d'eau et autres systèmes hydrologiques.
- Modifications anthropiques – carrières cartographiées, décharges, entrées de mine, remblais, déblais, etc.
- Dépôts superficiels possibles présentant des reliefs distinctifs tels que des plaines d'inondation, des dépôts glaciaires, des loëss, des glissements de terrain, etc.

Cartes Géologiques, rapports, mémoires, publications

- Les cartes géologiques présentent généralement la distribution des unités chrono- et lithostratigraphiques – c'est pourquoi les cartes géologiques standard nécessitent une interprétation considérable avant de constituer la base d'une carte pour la géologie de l'ingénieur.
- Lithologie. Ces unités constituent la base du MGG, et la prise en compte de leur environnement de formation peut éclairer les variations lithologiques possibles, présentes mais non cartographiées. La connaissance de la lithologie indiquera également le type, l'orientation et l'espacement des discontinuités susceptibles d'être présentes, ainsi que le type et la géométrie des limites externes (c'est-à-dire les contacts géologiques) de l'unité géologique et des sous-unités internes.

- Stratigraphie (Âge) – cela permet une évaluation de la relation entre les unités géologiques et les processus ultérieurs de modification des roches/sols, comme par exemple les changements diagenétiques, les modifications tectoniques, l'altération, le développement de croûtes dures à la surface, etc.
- Cartographie des structures géologiques, comme par exemple les plis et les failles. Leurs effets possibles sur le massif rocheux peuvent être évalués (développement de diaclases associé au plissement, ou encore zone d'influence des failles qui elle-même influence la profondeur de l'altération).
- Dépôts quaternaires. Il est à noter que ceux-ci peuvent ne pas être cartographiés, ou ne l'être que lorsqu'ils dépassent une certaine épaisseur. Par exemple, au Royaume-Uni les dépôts superficiels de moins d'un mètre d'épaisseur ne sont généralement pas cartographiés. Lorsqu'ils le sont, ils sont souvent considérablement simplifiés.
- Limites géologiques, souvent avec des degrés d'incertitude indiqués (par exemple : observés, déduits, interprétés).
- Modifications anthropiques – travaux associés à la minéralisation, terrains artificiels, décharges, puits ou galeries.
- Bien qu'il soit conseillé d'utiliser les cartes géologiques les plus récentes à l'échelle appropriée, il peut être nécessaire de consulter des cartes plus anciennes, car elles peuvent révéler des caractéristiques importantes, comme par exemple des mines abandonnées ou des structures non représentées sur les cartes plus récentes. La géologie cartographiée peut évoluer à chaque génération de carte, à mesure que les paradigmes géologiques sont révisés, et il peut être utile d'en comprendre les raisons.

Photographies aériennes, images de télédétection

La cartographie à l'aide de photographies aériennes, de scanners multispectraux aéroportés ou d'images satellites contribue grandement au développement d'idées conceptuelles. Si l'imagerie spécifique peut être limitée, les images de Google Earth couvrent la quasi-totalité du globe. La cartographie doit inclure, sans s'y limiter, les éléments suivants :

- Le contexte géomorphologique.
- Les processus géomorphologiques passés et présents (et leurs vitesses de changement probables). Par exemple : reliques de processus périglaciaires et incision fluviale actuelle.
- Les structures géologiques spécifiques et structures géologiques globales.
- Le régolithe, lors de l'utilisation de données multispectrales d'interprétation de la lithologie et de la minéralogie des argiles.
- Les affleurements et, dans certains cas, notamment lors de l'utilisation de données multispectrales, une interprétation provisoire de la lithologie de surface.
- Les modifications anthropiques.

LiDAR

Dans certains pays, un vaste réseau LiDAR public est disponible, mais de nombreux projets utilisent des LiDAR spécifiques à un site. Grâce aux modèles numériques de terrain, il est possible de générer des images de relief ombré, interprétables pour fournir des informations sur :

- La géomorphologie – par exemple, glissements de terrain, canaux fluviaux abandonnés, etc.

- Les délimitations des affleurements.
- La cartographie superficielle.
- Les principales caractéristiques de géologie structurale.
- Les activités anthropiques et/ou pour des recherches archéologiques.

Données d'études de terrain existantes

De nombreux projets s'appuient sur des données d'investigation existantes. Selon l'ancienneté des archives, les données peuvent comporter divers degrés d'incertitude. Par conséquent, il peut être nécessaire de les interpréter avant leur conceptualisation.

Lors de la collecte de toutes les informations pertinentes, le processus de conceptualisation doit être développé systématiquement dans les rubriques suivantes :

2.2.3.3.1 Cadre du projet

Les synthèses mondiales/régionales des conditions géologiques et géomorphologiques, des contextes tectoniques, des climats présents et passés et des processus de formation des terrains associés, des contraintes in situ, etc. fournissent un contexte général pour la conceptualisation.

2.2.3.3.2 Stratigraphie – types de roches et de sols et interactions

Les types de sols et de roches présents, ainsi que les relations stratigraphiques entre ces unités, peuvent être déduits des cartes géologiques et sont souvent représentés sur la carte sous la forme d'un « diagramme de relations entre les roches ». Les connaissances issues des cartes géologiques soutiennent l'élaboration d'un modèle conceptuel prévoyant la présence de certaines unités et caractéristiques géologiques, la nature de leurs limites et les relations spatiales entre elles, etc. Autrement dit, la carte géologique et les mémoires ou rapports qui l'accompagnent peuvent être utilisés pour déduire *l'histoire géologique complète*. Cette partie de la conceptualisation repose sur les connaissances géologiques fondamentales des différents types de roches et sur l'importance leurs caractéristiques les aspects techniques du projet. D'un point de vue géologique, il existe de nombreux types de roches différents, mais à des fins techniques, les classifications simplifiées contenues dans la plupart des normes descriptives sont généralement suffisantes. Dans un premier temps, ce type d'évaluation s'appuiera sur l'expérience et la littérature pertinente relative notamment aux modèles génériques et aux compilations de caractéristiques techniques. Pour des visualisations de différents modèles conceptuels génériques, voir Fookes et al. (2015) et Fell et al. (2015). Par exemple, la figure 2-7 montre les conditions qui peuvent être attendues dans un terrain granitique qui a été soumis à une altération chimique profonde.

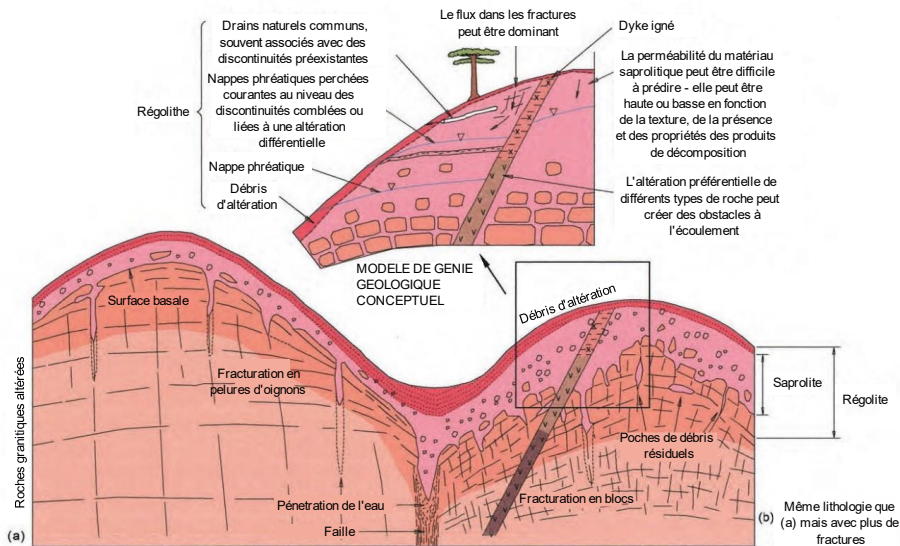


Figure 2.4 Models of tropical weathering: granitic weathering.

62

Figure 2-7 Caractéristiques typiques du granite. Reproduction à partir de Fookes et al., 2015. Geomodels in engineering geology – an introduction. © Whittles Publishing 2015.

2.2.3.3.3 Structures géologiques

Les structures géologiques probables peuvent être extrapolées à partir de la carte géologique ou de la connaissance et de l'expérience de contextes géologiques similaires. La meilleure façon d'appréhender ce qui peut être anticipé est, là encore, d'examiner des modèles conceptuels génériques pertinents. Voir la figure 2-8 pour exemple.

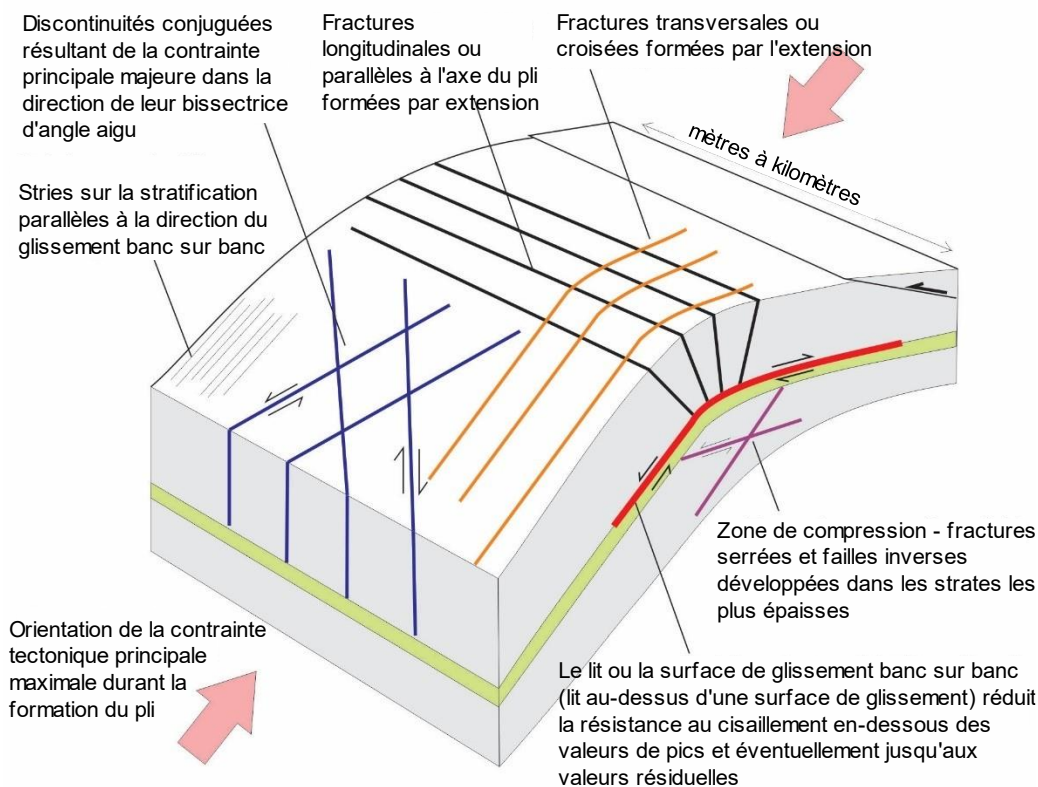


Figure 2-8 Structures associées avec un pli ouvert -(d'après Price et Cosgrove, 1990).

2.2.3.3.4 Processus de surface et de subsurface

Évaluer les processus passés, ainsi que ceux qui sont actifs ou susceptibles d'être réactivés par le projet nécessite des connaissances et une expérience en géologie et en géomorphologie. Par exemple : présence éventuelle d'effets de contraintes liées au relief dans les vallées, susceptibles d'affecter la stabilité des pentes, la perméabilité des massifs rocheux, le contrôle des eaux souterraines et les débits d'infiltration dans les tunnels.

En général, cela implique la classification du processus et le développement d'informations sur sa vitesse d'évolution. La figure 2-9 illustre comment le cadre de connaissances développé pour les glissements de terrain affectant le site du projet peut être présenté sous une forme adaptée à une évaluation des risques.

Le concept de palimpseste (littéralement la surimpression de différentes époques d'écriture) devrait être pris en compte dans toute étude du paysage. La plupart des paysages sont une combinaison de composantes anciennes et actives et de processus produits dans des conditions environnementales variées.

En conséquence, le paysage peut contenir une combinaison :

- Des surfaces topographiques anciennes que les processus contemporains n'affectent pas.
- Des surfaces topographiques anciennes qui sont affectés par des processus contemporains ou qui pourraient être réactivés si des changements de conditions se produisent.
- Des surfaces topographiques actives.

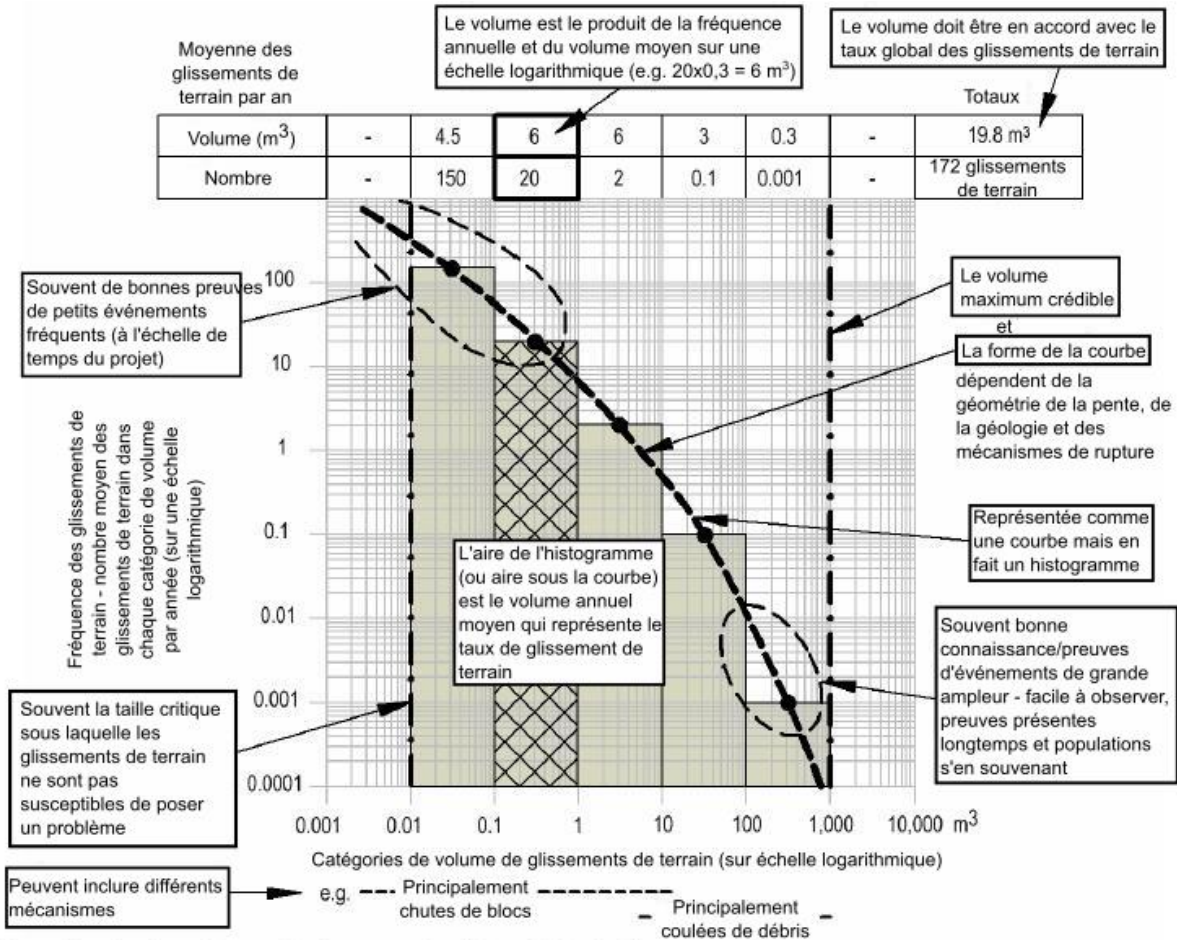


Figure 2-9 Modèle générique de fréquence et d'amplitude des glissements de terrain (Moon et al., 2005). Reproduit avec l'autorisation des auteurs.

Le modèle conceptuel doit expliquer l'évolution du paysage actuel et prévoir la façon dont le projet peut affecter le paysage ou comment le paysage peut impacter le projet. Pour comprendre les processus géomorphologiques possibles, il est utile de développer un modèle conceptuel générique des surfaces topographiques morphogénétiques qui caractérisent la zone – il s'agit d'assemblages identifiables de topographies résultant de l'action de différents types de climats sur une période donnée. Les modèles conceptuels génériques peuvent faciliter la création de modèles conceptuels spécifiques à chaque site. Ils fournissent également une liste de contrôle des caractéristiques et des aléas susceptibles d'être rencontrés dans ces zones. Pour des visualisations de différents modèles conceptuels génériques de relief, voir Fookes et al. (2015).

2.2.3.3.5 Caractérisation technique initiale

Sur la base des connaissances et de l'expérience, les caractéristiques techniques possibles des différents composants du modèle conceptuel peuvent être documentées. De nombreuses publications synthétisent les caractéristiques techniques typiques de différents matériaux géologiques. Par exemple, les propriétés des massifs rocheux composés de différentes qualités de granite et de gneiss altérés ont été résumées par Dearman et al. (1978). Lorsque les connaissances et l'expérience existantes sont considérables, il peut être possible d'élaborer des estimations initiales de caractéristiques, telles que la résistance et la raideur, à partir des descriptions des massifs rocheux, en utilisant diverses méthodes, comme par exemple l'approche GSI (Hoek et Brown 2019). Cependant, les incertitudes associées à une telle approche doivent être pleinement documentées.

En plus des registres de risques initiaux, le modèle conceptuel peut être utilisé pour générer des « conditions de référence » initiales qui définissent contractuellement les conditions que les projets peuvent rencontrer (Baynes et al. 2005).

2.2.3.3.6 Modèle géologique initial

Selon le projet, le Modèle Géologique initial peut inclure une quantité importante de données d'observation existantes ou reposer presque entièrement sur une conceptualisation, ce qui peut entraîner des variations importantes de l'incertitude du modèle. Cependant, à mesure que le Modèle Géologique est développé, il fournit un cadre logique pour la conception de l'étude du site, ce qui devrait viser à réduire l'incertitude du modèle.

2.2.3.3.7 Exemple de conceptualisation

Un exemple de visualisation d'un modèle conceptuel est fourni dans la figure 2-10.

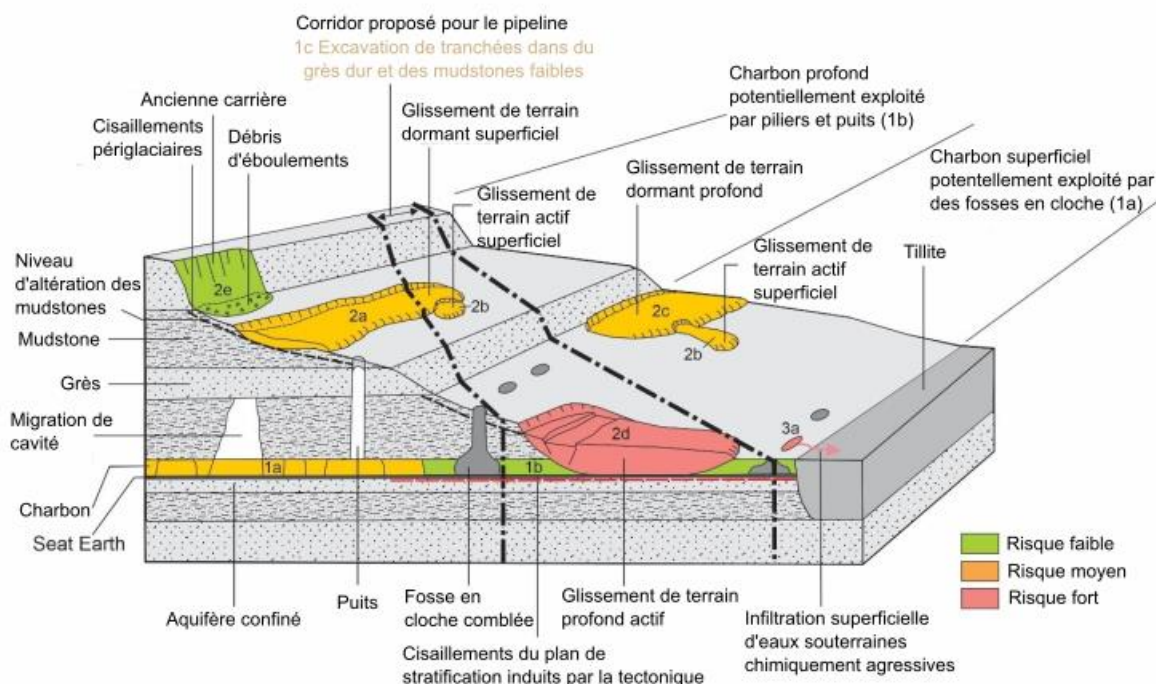


Figure 2-10 Schéma construit à la suite d'une étude documentaire présentant la composante conceptuelle d'un MGG pour un pipeline traversant un sol instable affecté par une exploitation minière et des glissements de terrain (d'après Baynes et al. 2021).

2.2.3.4 Acquérir des observations de la zone du projet par le biais d'investigations

Les registres de données de terrain sont produits par la collecte de relevés conformément aux normes nationales ou aux directives internationales. Cependant, ces relevés peuvent entraîner des limitations et une perte de données d'observation s'ils s'appuient sur des normes minimales. Il est nécessaire de faire preuve de flexibilité dans la réalisation des relevés afin de concentrer la collecte de données sur les facteurs clés qui, selon le modèle conceptuel ou le modèle d'observation initial, détermineront probablement la conception.

Une interprétation géologique de l'environnement de dépôt et/ou l'âge stratigraphique doit accompagner toutes les descriptions de matériaux dans les relevés de forages, les puits d'essai, les affleurements, etc. (conformément à la norme australienne AS1726 2017), car elle indique quand et comment les matériaux géologiques se sont formés, ce qui se reflètera dans leurs caractéristiques

techniques. Cependant, cela nécessite que celui qui interprète les données connaisse le MGG. Une interprétation erronée est possible ; il est donc essentiel d'indiquer la fiabilité de l'interprétation.

Les observateurs doivent interpréter leurs observations et décider, en fonction de ces interprétations, quelles autres mesures et observations doivent être réalisées et où. Les personnes plus expérimentées ont clairement un avantage. Si l'observateur dispose du MGG avant toute observation ultérieure, la probabilité d'une interprétation correcte augmente considérablement. De plus, les valeurs aberrantes et les anomalies sont plus faciles à identifier, à documenter et à évaluer.

Il faut noter que l'interprétation sur le terrain peut évoluer avec l'acquisition de données ou de connaissances/expériences supplémentaires, et qu'à mesure que le MGG se développe, il peut être nécessaire de réévaluer les relevés de terrain antérieurs ; lorsque des modifications sont apportées à l'interprétation, cela doit être documenté.

Certaines données ne se prêtent pas facilement à la saisie numérique, par exemple, les relevés sur des terrains complexes et les interactions complexes qu'il en découle. Dans ce cas, les relevés originaux accompagnés de croquis papier doivent également être fournis.

Une cartographie détaillée peut être entreprise à l'aide de diverses techniques, allant de simples relevés à l'aide de mètres-rubans à partir de points de contrôle, à la localisation des observations sur un MNT haute résolution (si disponible) ou sur des orthophotos.

2.2.3.5 Combinaison de modèles conceptuels et de modèles observationnels dans le MGG

L'interprétation a traditionnellement impliqué la création de cartes, de coupes, de croquis et de textes sur papier, mais elle est désormais de plus en plus réalisée dans un environnement de modélisation numérique. Cela implique une « interprétation de la surface » lors de l'élaboration d'un modèle numérique 3D, dans lequel les cartes géologiques, les cartes géomorphologiques, le LiDAR, la topographie, la cartographie de terrain et les observations, etc., sont rassemblées et utilisées pour interpréter les conditions du terrain. Il est essentiel que cette interprétation de surface soit vérifiée sur le terrain.

La cartographie géologique de terrain et cartographie géomorphologique est rarement entreprise systématiquement dans le cadre de projets. Il s'agit d'une technique qui nécessite à la fois une observation sur le terrain et une interprétation conceptuelle à réaliser simultanément. Ce faisant, elle génère la visualisation 2D par excellence du MGG sous la forme d'une carte.

2.2.3.6 Définition et caractérisation des unités homogènes géotechniques

Pas de commentaire.

2.2.3.6.1 Complexité géotechnique

Pas de commentaire.

2.2.3.7 Caractérisation technique

Pas de commentaire.

2.2.3.7.1 Zonage

Pas de commentaire.

2.2.3.8 Incertitude, lacunes et divergences dans le MGG

Pas de commentaire.



2.2.4 MGG et Eurocode

La dernière version de l'Eurocode 7, partie 2 (EN 1997-2:2024) décrit une approche pour l'étude et la conception des composantes géotechniques d'un projet. Norbury (2020) a souligné l'existence de deux types de modèles distincts dans l'Eurocode 7.

- (1) Le Modèle de Terrain (dans la norme EN 1997-2:2007) qui comprend la géologie, la présentation et l'évaluation des résultats des tests.
- (2) Le Modèle Géotechnique (dans la norme EN 1997-1:2007) qui couvre la conception de la structure et comprend donc la sélection des paramètres de conception géotechnique.

Bien que la terminologie soit différente, l'approche Eurocode s'inscrit dans l'approche globale MGG pour les projets de génie civil. Cependant, elle est moins adaptée aux prises de décisions d'ingénierie géotechnique plus larges, qui interviennent souvent en dehors de la conception du génie civil, comme par exemple les études d'aléas offshore, l'évaluation des ressources de carrières, la préparation des rapports géotechniques de base, etc., où l'approche globale MGG est plus efficace.

[Retour à la Section 1.2 PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT D'UN MGG](#)

2.3 ASSEMBLAGE ET COMMUNICATION DU MGG

2.3.1 Introduction

Pas de commentaire.

2.3.2 Consignes pour la préparation des composantes d'un MGG

Pas de commentaire.

2.3.3 Conséquences sur l'approvisionnement du projet

Pas de commentaire.

2.3.4 Établir les rapports de MGG

Le MGG est principalement documenté par des rapports de projet. Dans les régions du monde où les litiges sont souvent associés à une passation de marchés de grands projets, deux principaux types de rapports sont traditionnellement produits, souvent par obligation contractuelle, à la suite des investigations sur site : un rapport de données et un rapport d'interprétation. Les « rapports de données » sont généralement considérés comme des « données fiables », tandis que les « rapports d'interprétation », qui ont souvent un contenu interprétatif limité, sont généralement « à titre d'information uniquement » et ont une valeur contractuelle moindre. Dans ces circonstances, un cadre de connaissances du MGG efficace peut ne pas être présenté et ne pas être pleinement utilisé tout au long du cycle de vie du projet.

2.3.4.1 Rapport de Données

Dans certains cas, les maîtres d'ouvrage choisissent de ne communiquer que des informations de type « données » (par exemple, des diagraphies de sondage, des résultats d'essais en laboratoire, etc.), estimant que fournir des « interprétations » augmenterait leur exposition au risque géotechnique. Il s'agit d'une pratique courante, mais ne pas communiquer ces interprétations aux concepteurs ou entrepreneurs ultérieurs ne peut que réduire leur capacité à anticiper raisonnablement les conditions de terrain qu'ils pourraient rencontrer ; ils doivent donc fixer leurs offres en conséquence.

2.3.4.2 Rapport Interprétatif

Les rapports d'interprétation documentent rarement les composantes conceptuelles du MGG et présentent généralement un « modèle de terrain » unique, sans expliquer comment il a été obtenu, ni les éventuelles incertitudes associées. Ces problèmes sont aggravés par le fait que les prestataires effectuant les observations sur site lors des investigations sont souvent responsables de la communication des données, tandis que les consultants, qui ne se sont peut-être jamais rendus sur place, sont responsables de la composante interprétative. Ce cloisonnement de l'investigation peut conduire à une interprétation erronée et trompeuse du terrain.

2.3.4.3 Rapports Géotechniques de Référence

Les Rapports d'Interprétation sont de plus en plus utilisés pour générer des Rapports Géotechniques de Référence (RGR) afin d'établir un partage des risques plus clair en fournissant une *interprétation contractuelle* des conditions du terrain (Davis, 2017). La Fédération internationale des ingénieurs-conseils (FIDIC) dispose d'un cahier des contrats (Emerald Book) spécialement conçu pour l'utilisation des Rapports Géotechniques de Référence (FIDIC, 2019).

Un Rapport Géotechnique de Référence (RGR) définit les limites de risque entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur, en incluant des énoncés (« énoncés de base ») qui définissent les conditions géologiques ou géotechniques auxquelles l'entrepreneur peut s'attendre pendant la construction, ainsi

que celles qui sont considérées comme prises en compte lors de l'appel d'offres. Les RGR peuvent également fournir une interprétation équilibrée des conditions du terrain à partir des données disponibles, ou être présentées avec des conditions plus ou moins favorables selon le profil de risque et l'appétence au risque du client. Les différences entre les conditions réelles du terrain rencontrées sur le chantier et leurs impacts sur les contrats sont généralement arbitrées par un « tiers indépendant » pendant les travaux de construction. Le RGR peut comprendre plusieurs rapports progressivement élaborés au cours des négociations contractuelles.

Dans sa forme la plus simple, le RGR est utilisé par tous les soumissionnaires comme base commune pour la tarification du risque géotechnique, parallèlement à la tarification des travaux définis dans les plans et spécifications de l'appel d'offres. Lors de l'attribution du marché, l'entrepreneur retenu est considéré comme ayant pris en compte l'éventail des conditions de terrain définies dans les énoncés de référence du RGR. Ces énoncés de référence établissent les « prévisions » et fournissent un cadre contractuel pour ce qui pourrait être qualifié « d'imprévu » par rapport aux conditions de terrain rencontrées pendant la construction. Après l'attribution du marché, le RGR est ensuite utilisé pour juger de la validité de toute demande d'indemnisation basée sur le terrain pour les points couverts par le RGR. Le cadre de connaissances du MGG soutient l'élaboration de « lignes de conduites numériques », de « valeurs caractéristiques » et de « conditions de terrain de référence », autant de composantes des RGR liées aux clauses contractuelles.

2.3.4.4 Cartes et coupes pour la géologie de l'ingénieur

Les cartes et coupes géologiques constituent un élément fondamental du cadre de connaissances du MGG. Toutes les cartes et coupes doivent comporter une échelle, une légende et une flèche indiquant le nord, et différencier les observations des interprétations selon des conventions de tracé, comme illustré à la figure 2-11. Lors de l'élaboration de cartes numériques, les limites observées, projetées et interprétées doivent être différenciées de la même manière.

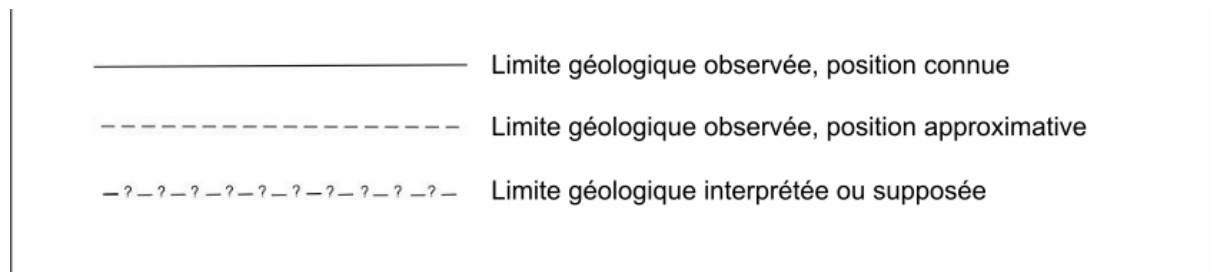


Figure 2-11 Tracés géologiques conventionnels.

Une grande partie des connaissances en géologie de l'ingénieur est antérieure au développement des techniques informatiques et de la visualisation géologique numérique. Il s'agit des produits « statiques » traditionnels, comprenant dessins, diagrammes et graphiques, photographies, cartes, coupes transversales et modèles physiques. Cependant, dans de nombreux projets, ces techniques traditionnelles contribuent encore à la conceptualisation et à la vérification de la validité du modèle numérique 3D et, notamment pour les projets de petite envergure, peuvent constituer les principaux résultats du MGG.

Dans la plupart des grands projets, les grandes quantités de données impliquées et les méthodes modernes d'acquisition de ces données par voie électronique impliquent que le traitement des données par ordinateur sera le moyen le plus efficace et probablement le seul moyen pratique de rassembler les données.

Il semble possible que l'apprentissage automatique (*machine learning*) devienne de plus en plus important et nécessaire pour interpréter et traiter les données massives (*big data*) acquises lors des études de site en utilisant la télédétection multiscapteurs (LiDAR, photogrammétrie, thermique,

hyperspectrale), l'instrumentation et la surveillance des forages (par exemple, RADAR, InSAR, MS/AE). Cette perspective soulève des inquiétudes quant à la capacité de l'apprentissage automatique à conceptualiser et générer une interprétation géologiquement raisonnable.

2.3.4.4.1 Cartographie des données 2D

La visualisation 2D des données géologiques est généralement traitée dans un SIG (Système d'Information Géographique), parfaitement adapté à la collecte des différents types de données géospatiales, les données étant présentées en couches distinctes. Il est possible de produire des cartes et des coupes géologiques simples à l'aide de systèmes de CAO (Dessin Assisté par Ordinateur), mais ceux-ci sont plus adaptés à la conception technique et ne disposent généralement pas des fonctionnalités nécessaires à la réalisation de dessins géologiques de qualité.

L'architecture des couches SIG doit refléter les différentes sources de données et, si possible, distinguer les couches d'observations des couches d'interprétation. Les couches SIG typiques d'un MGG sont illustrées à la figure 2-12.

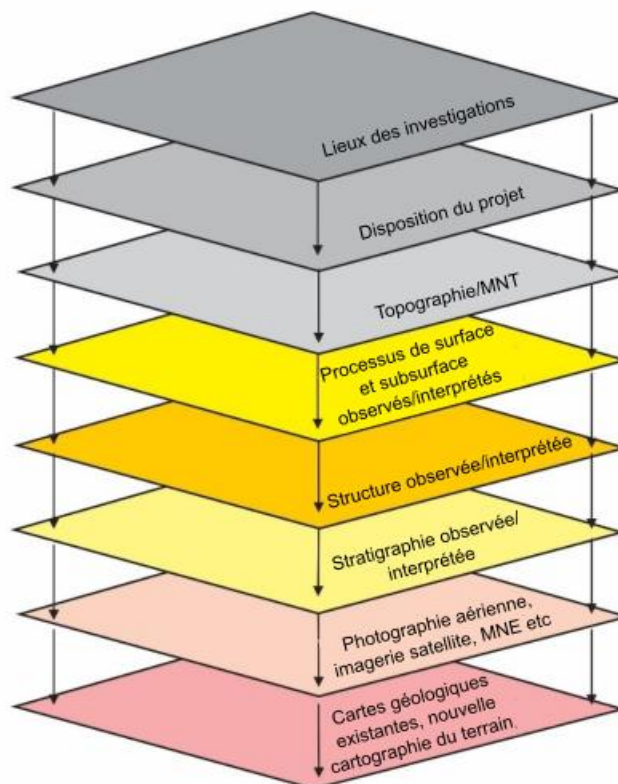


Figure 2-12 Architecture SIG pour un MGG.

2.3.4.4.2 Coupes 2D

Outre les cartes, des coupes 2D devront être élaborées à partir de l'interprétation des données du MGG. Ces coupes serviront à alimenter des analyses, des conceptions, des constructions ou des outils de visualisation. Les coupes transversales et longitudinales peuvent être dessinées à la main ou développées à l'aide de logiciels 2D ou 3D. Dans un logiciel 2D, les coupes peuvent être dessinées numériquement par l'utilisateur, tandis que les coupes 2D exportées à partir de modèles numériques 3D peuvent être générées automatiquement le long d'une ligne de coupe définie par l'utilisateur. Quel que soit le mode de création des coupes, celles-ci doivent respecter les mêmes principes de base :

- Les coupes doivent être situées là où elles illustrent le mieux la relation entre la composante du projet, les chargements ou les changements qu'il impose au terrain et les données/informations disponibles pour étayer l'interprétation des unités homogènes géotechniques. Les concepteurs peuvent choisir l'emplacement des coupes pour étudier les effets de cas de chargement particuliers.
- Lorsque des données sont projetées sur une coupe, les hypothèses formulées et la méthode de projection doivent être indiquées.
- Les coupes doivent être dessinées perpendiculairement aux contours ou à l'élément d'intérêt, sauf nécessité contraire (par exemple, pour une longue coupe le long d'un alignement ou le long de la direction du déplacement).
- Les coupes doivent être tracées le long de l'axe médian des éléments critiques du projet, là où le meilleur contrôle (c'est-à-dire les données) est requis, et les données sur lesquelles la coupe est basée doivent y être documentées. Lorsque le meilleur contrôle ne se situe pas le long de l'axe médian, il faut faire preuve de discernement pour placer la coupe à l'endroit approprié, ce qui peut nécessiter des lignes de coupe supplémentaires.
- L'échelle verticale d'une coupe doit (sauf si l'échelle ne permet pas la visualisation) être identique à l'échelle horizontale (c'est-à-dire sans exagération verticale). Lorsqu'une échelle exagérée est utilisée, une coupe sans exagération doit également être fournie.
- La symbologie des unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur doit correspondre à celles utilisées dans le modèle et/ou la carte.

Les modèles numériques 3D ne permettent généralement pas d'afficher des limites en pointillés ni d'inclure des points d'interrogation sur les surfaces. Il est donc souvent difficile d'identifier les limites déduites ou approximatives. Une méthode pour identifier ces conditions consiste à représenter des coupes 2D dans de multiples directions ainsi que des cartes dans une représentation 3D.

2.3.4.4.3 Considérations relatives à l'étendue spatiale et à l'échelle

L'étendue spatiale des cartes et plans documentant le cadre de connaissances du MGG doit être fonction de la superficie du terrain susceptible d'être affectée par le projet (par exemple, la zone susceptible de réagir à la charge d'une fondation), ainsi que de la superficie susceptible d'affecter le projet (par exemple, une zone d'où pourrait provenir un glissement de terrain hors site susceptible d'impacter le projet). Par conséquent, cela peut aller de cartes régionales à des plans d'affleurements ou de fondations.

L'échelle de présentation des cartes et des plans doit correspondre à celle à laquelle les données ont été collectées. Si des coupes et des cartes conventionnelles sont préparées, le niveau de détail de chaque dessin doit correspondre à ce qui est visible à l'échelle réelle. Avec les maquettes numériques 3D, l'échelle peut être dynamique ; il est donc impératif de prendre en compte les implications de l'échelle choisie pour présenter les données lors du choix du niveau de détail.

Il convient d'être prudent et de documenter les limites lorsque les jeux de données utilisés pour la compilation du modèle sont présentés à des échelles de résolution plus élevée. Par exemple, la mise à l'échelle de limites présentes sur une carte au 1:100 000 vers le plan d'ingénierie géologique du projet au 1: 5 000 peut conduire à des modèles peu fiables, surtout sans vérification ni correction sur le terrain.

Il faut noter que l'échelle des résultats requis peut changer au cours des différentes étapes d'un projet, mais l'échelle des données d'entrée restera la même et peut limiter la manière dont le MGG est développé.

2.3.4.4 Représentation stéréographique

Cette technique peut être utilisée pour aider à évaluer la configuration des défauts/structures et leur évolution spatiale. Elle constitue donc un outil essentiel pour l'évaluation et la présentation des données structurales, indispensable à tout MGG utilisé lorsque la géométrie des discontinuités est significative (par exemple, fractures, failles, clivages). Ceci est particulièrement important pour l'ingénierie des roches, mais s'applique également aux projets impliquant des sols artificiels présentant des défauts. Il est à noter que les données stéréographiques représentent la géométrie des familles de discontinuités pour une partie d'une unité homogène de géologie de l'ingénieur, d'une zone ou d'un domaine géologique, ou pour un ensemble de défauts spécifique, mais ne représentent pas la géométrie ni les coordonnées spatiales réelles de ces défauts. Une telle représentation est optimisée par l'utilisation de cartes de contours de structure.

2.3.5 Création et visualisation d'un modèle numérique 3D

Les modèles numériques 3D permettent de comprendre et de communiquer les conditions du sous-sol d'une manière auparavant impossible avec une approche « papier-crayon ». Pour les grands ensembles de données, les modèles numériques 3D permettent une vérification et une interprétation approfondies des données et favorisent une meilleure intégration des résultats du MGG avec d'autres disciplines. Les logiciels de modélisation numérique 3D permettent de visualiser un large éventail d'observations (forages, CPT, LiDAR, géophysique, niveaux des eaux souterraines, limites cartographiées, etc.) ainsi que d'interpréter les limites des unités homogènes géotechniques sous forme de surfaces, le tout créé dans un environnement de modélisation numérique unique. À partir de ces surfaces, des volumes 3D peuvent être calculés, reflétant les unités homogènes géotechniques dans l'espace 3D.

Cependant, le développement d'un modèle numérique 3D comporte des risques si les limites du modèle et des méthodes numériques, notamment les hypothèses utilisées dans ces deux éléments, ne sont pas comprises et communiquées. Les modèles numériques 3D peuvent être présentés avec une précision et une certitude apparentes bien supérieures à la réalité, et il est important de communiquer cette incertitude. Un modèle numérique 3D pris isolément ne constitue pas un MGG, car il ne fournit pas de cadre de connaissances. Le développement des modèles numériques 3D doit être réalisé, ou supervisé et vérifié, par des ingénieurs-géologues qualifiés et compétents, en cohérence avec le développement des autres composantes du MGG. Dans le cas contraire, il existe un risque de créer des modèles inexacts, erronés et géologiquement déraisonnables (c'est-à-dire peu fiables).

Un traité approfondi sur la modélisation géologique numérique est fourni par Turner et al. (2021).

2.3.5.1 Logiciel de modélisation

2.3.5.1.1 Sélection du logiciel approprié

La sélection des logiciels doit prendre en compte :

- L'objectif du modèle - qui peut exiger que le logiciel permette la visualisation à la fois des structures techniques et des caractéristiques géotechniques.
- La phase de conception du projet - différentes phases de développement peuvent nécessiter différents outils/niveaux de détail.
- La taille et la complexité probables du modèle – le contexte géologique correspond-il à une stratigraphie simple ou à un système plissé/faillé plus complexe ?

- La taille des ensembles de données - les outils automatisés peuvent être adaptés aux grands ensembles de données alors que l'interprétation manuelle et la manipulation des données qui prennent beaucoup de temps, sont plutôt utilisées pour les petits ensembles de données.
- Flexibilité de la modélisation - la modification manuelle et le contrôle des données et des surfaces permettent au modélisateur, dans la mesure du possible, de créer des caractéristiques géologiquement acceptables et réalistes.
- Exigences de mise à jour du modèle numérique : le modèle nécessitera-t-il des mises à jour fréquentes ? Si oui, de quels outils le logiciel dispose-t-il pour limiter les retouches et les réinterprétations ?
- Incertitude spatiale – le logiciel peut-il être utilisé pour l'analyse statistique et/ou probabiliste de la variabilité et de l'incertitude au sein des ensembles de données et du modèle plus largement ?
- Fonctionnalité et facilité d'utilisation : quelles sont les méthodes d'analyse disponibles ? Quelle est l'interface utilisateur ? Quelles sont les compétences requises ? Quelle est la complexité opérationnelle ? Quelle est la compatibilité avec les logiciels existants ?
- Le logiciel peut-il produire des sorties 2D et 3D pour éclairer les analyses, aider à une intégration transparente avec d'autres disciplines, ainsi que fournir un outil de communication pour aider à l'ingénierie et aux décisions connexes ?
- Le logiciel sera-t-il adapté aux compétences disponibles au sein de l'organisation ? Qui développera, vérifiera et révisera le modèle numérique 3D ? Cette personne possède-t-elle une bonne compréhension du logiciel et de ses fonctionnalités, ainsi que des connaissances et une expérience en géologie de l'ingénieur en lien avec le type de projet et les conditions du terrain ?
- Des modèles 3D spécialisés peuvent être développés en vue d'un résultat analytique spécifique. Ces types de modèles peuvent nécessiter des techniques de modélisation spécifiques à un logiciel, et donc susceptibles de se limiter à fournir des résultats pour un ensemble très limité de méthodes analytiques.
- Le partage des modèles numériques sera-t-il obligatoire ? Qui pourra les modifier ou les visualiser ? Comment cela sera-t-il contrôlé ? Avec quels autres modèles devront-ils interagir ?

2.3.5.1.2 Modélisation en CAO

Les méthodes de conception assistée par ordinateur (CAO) permettent de générer des visualisations 3D des conditions de génie géologique. Cependant, les systèmes de CAO ne disposent pas de fonctionnalités topologiques, ce qui peut entraîner des croisements accidentels de limites de couches, notamment en présence de couches minces ou discontinues. La correction de la représentation du modèle dans le logiciel peut alors s'avérer complexe. De plus, les systèmes de CAO ne sont pas conçus pour saisir et traiter la vaste gamme d'informations de génie géologique disponibles pour un projet. Ils ont tendance à utiliser des limites rectilignes et géologiquement irréalistes, et leur symbologie peut être inadaptée.

La modélisation géologique en CAO n'est pas recommandée, bien qu'elle puisse être utilisée pour modéliser des données de géologie de l'ingénieur simples, généralement limitées à des cartes et des coupes 2D. Cependant, la CAO est l'un des principaux moyens de communication du modèle, car c'est par elle que le Modèle Géologique est intégré aux éléments du projet. Ainsi, même si la modélisation par CAO n'est pas recommandée, elle constitue une plateforme utile pour communiquer le modèle.

2.3.5.1.3 Logiciel de modélisation explicite

Dans la modélisation explicite, le modélisateur définit manuellement la nature et la distribution des surfaces qui contraignent les unités homogènes géotechniques, et les données d'investigation sur lesquelles se base l'interprétation, sont représentées en 3D. La modélisation explicite est considérée comme la méthode manuelle « traditionnelle » de représentation en fil de fer et de numérisation. Le modélisateur interprète les données d'investigation, puis définit les surfaces qui contraignent les unités géologiques techniques.

Un exemple de modèle explicite est fourni dans la Figure 2-13.

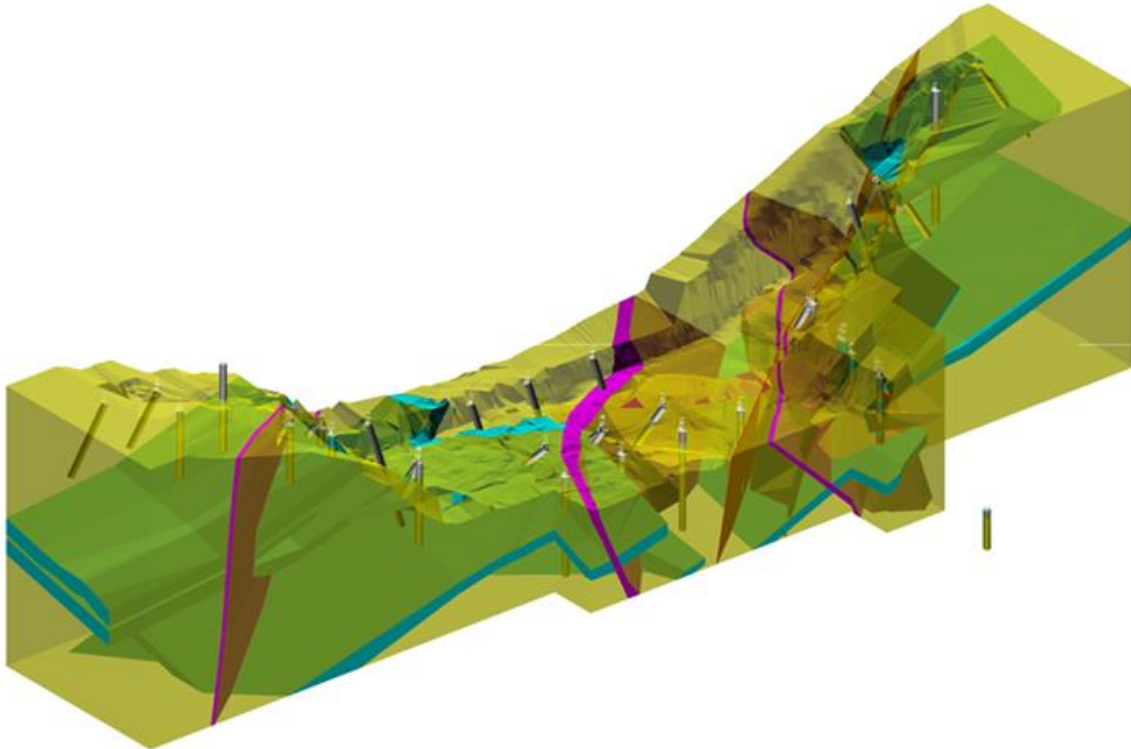


Figure 2-13 Visualisation explicite de la géologie des fondations d'un barrage-poids en béton. On y voit également des andésites à faible pendage et des zones de faille intrudées par des dykes tardifs de felsite (image fournie par Richard Brehauss et reproduite avec sa permission).

2.3.5.1.4 Modélisation logicielle implicite

Dans la modélisation implicite, le logiciel implémente des algorithmes définis par l'utilisateur pour interpoler et extrapoler entre les points de données. Les résultats définissent la distribution des attributs qui caractérisent les unités homogènes géotechniques. Cette distribution peut être continue ou définie par des limites. Cela permet de créer des formes de surface plus complexes que celles généralement observées dans les modèles explicites. Cependant, les résultats doivent être évalués afin de garantir que la modélisation produit des formes géologiquement pertinentes, basées sur le contexte de la géologie de l'ingénieur et respectant les principes géologiques.

Un exemple de modèle implicite est fourni dans la figure 2-14.

Lorsque l'hétérogénéité sous-stratigraphique est pertinente, le modèle de structure peut être « discrétisé » pour former une grille cellulaire 3D (ou « voxels »). Des propriétés matérielles telles que la résistivité électrique, la perméabilité, la porosité, la résistance au cisaillement, etc. peuvent être attribuées à ces voxels grâce à des algorithmes géostatistiques. Ces représentations de voxels

permettent de générer des maillages aux différences finies ou aux éléments finis pour les calculs et la modélisation.

2.3.5.1.5 Comparaison des modèles numériques explicites et implicites

Des méthodes explicites ou implicites peuvent être utilisées pour développer des modèles numériques 3D, et ceux-ci sont souvent intégrables. Les logiciels modernes de modélisation implicite incluent généralement des fonctionnalités de modélisation explicite pour faciliter l'affinement des surfaces. Quelle que soit la méthode de modélisation, des connaissances en géologie de l'ingénieur et l'application de principes géologiques appropriés sont requises. Modélisées correctement, les deux méthodes produiront des modèles robustes aux interprétations similaires. Le tableau 2-2 ci-dessous résume les avantages et les limites de chaque approche.

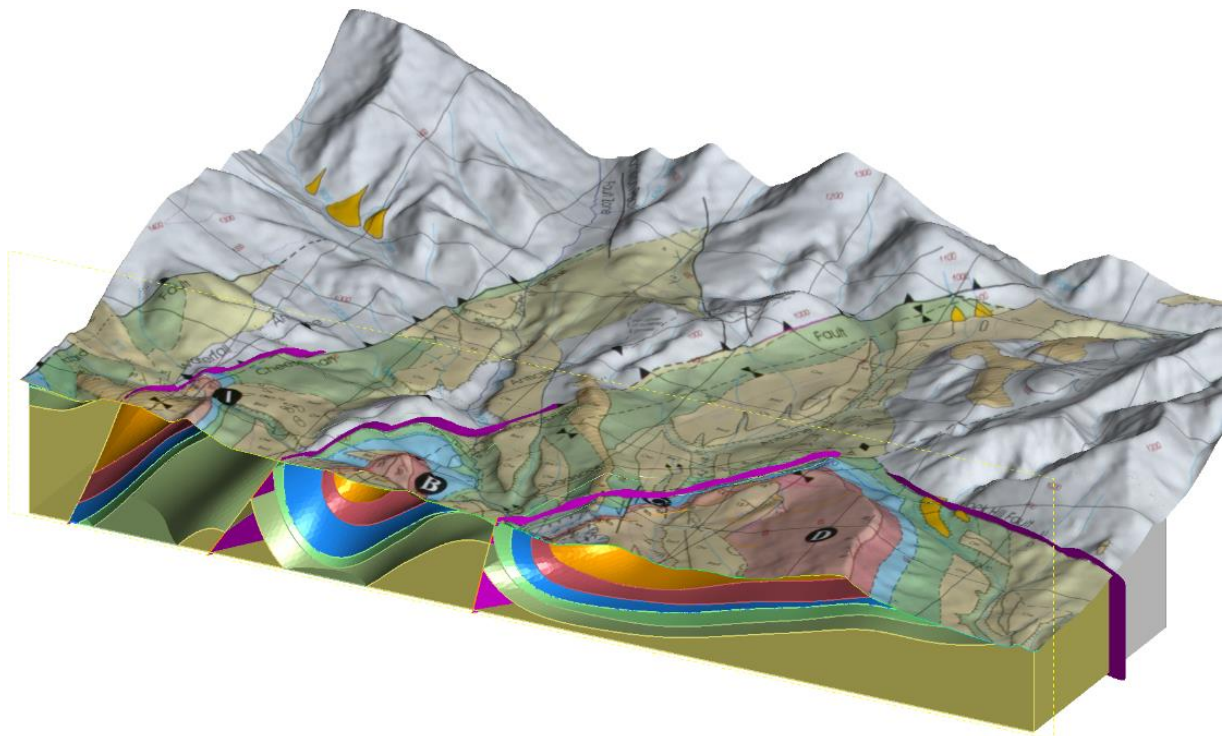


Figure 2-14 Modèle implicite développé à partir d'observations de surface à l'aide d'algorithmes pour projeter les limites du sous-sol (image fournie par Pat McLarin et reproduite avec sa permission).

2.3.5.1.6 Modélisation de la géologie stratifiée à l'aide du SIG

Les environnements géologiques stratifiés, jusqu'à des profondeurs de 100 à 200 m, sont fréquemment rencontrés dans les projets d'ingénierie et d'environnement. Un modèle numérique peut être créé en superposant une série de surfaces. Cette méthode permet d'intégrer des surfaces quadrillées existantes, développées par des procédures SIG ou à partir de relevés numériques de forages et de coupes géologiques interprétées. Elle constitue une procédure de génération de modèles attrayante et efficace pour la modélisation de zones présentant des couches sédimentaires relativement peu déformées. Cependant, la représentation de failles perturbant des surfaces superposées simples peut s'avérer difficile.

2.3.5.1.7 Réseaux de fractures discrets

Un « réseau de fractures discret » (Distinct Fracture Network ou DFN en anglais) est un modèle qui représente explicitement les propriétés géométriques de chaque fracture (par exemple, orientation, taille, position, forme et ouverture) ainsi que les relations topologiques entre les fractures individuelles et les familles de fractures. Un DFN peut être généré à partir de levés de discontinuités, d'une



photogrammétrie appropriée et de son analyse, ou par simulation stochastique. Ces techniques visent toutes à représenter différents types de fractures rocheuses, notamment les diaclases, les failles, les veines et les plans stratigraphiques. Un DFN peut nécessiter une interprétation basée sur les données disponibles ou un modèle informatique du massif rocheux, car il arrive souvent que toutes les discontinuités du massif ne soient pas observables en 3D avec une résolution suffisante à toutes les échelles. Les modèles informatiques d'un massif rocheux fracturé en 3D sont générés à partir d'une population de famille de discontinuités, dont les paramètres sont tirés des distributions de probabilités statistiques issues de levés de terrain et des observations de diagraphie. Le modèle informatique obtenu peut être utilisé pour réaliser des analyses probabilistes de la stabilité des pentes, de la stabilité des tunnels, etc.

Tableau 2-2 Comparaison des modèles explicites et implicites.

	Modèles explicites	Modèles implicites
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être aussi simple ou complexe que le modélisateur le souhaite. • Ne nécessite pas nécessairement de logiciels spécialisés. • Le modélisateur peut définir des structures recoupant la stratification telles que des failles, en les dessinant explicitement sur des coupes régulièrement espacées et en les reliant. • Peut être numérisé manuellement, sous forme d'interprétations de coupes transversales individuelles, sur toute l'étendue du site, puis reliées pour créer des pseudo-coupes transversales. • Le modélisateur peut également utiliser un logiciel spécialisé pour traiter et manipuler les données spatiales, contraindre les unités et relier les limites afin de former un modèle en fil de fer des surfaces. • Le modèle obtenu est donc une fonction de surfaces construites manuellement. • Des points supplémentaires (arbitraires) entre les points de contact observés peuvent être utilisés pour lisser les surfaces et les rendre plus réalistes 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de construire et analyser rapidement des modèles 3D pour visualiser et tester plusieurs scénarios. • Modélisation dynamique possible grâce à des mises à jour rapides dès l'acquisition et la saisie de nouvelles données. • Capacité à traiter des ensembles de données volumineux et variés sur un ordinateur personnel. • Différents points du processus de modélisation peuvent être considérés comme des révisions (à des moments précis), explorant ainsi des hypothèses alternatives. • Capacité à modéliser une isovaleur directement à partir des données de forage, sans recours au domaining, ni à la variographie. • Capacité à créer des modèles multiples et reproductibles, conditionnés aux données elles-mêmes, et non à l'intuition de la modélisation. Il est à noter que cela implique également l'utilisation d'un jugement géologique pour évaluer la vraisemblance des modèles obtenus. • De nombreux logiciels de modélisation implicite permettent l'édition explicite des surfaces
Désavantages et limitations	<ul style="list-style-type: none"> • La numérisation manuelle peut être chronophage. • Le modèle final est le fruit de l'interprétation du modélisateur et peut ne pas être reproductible d'un modélisateur à l'autre. • L'incertitude est difficile à quantifier. • La mise à jour automatique peut ne pas être possible lorsque des informations nouvelles ou différentes sont disponibles. Les modifications peuvent donc être plus longues que pour les modèles implicites. 	<ul style="list-style-type: none"> • Documenter les spécificités du fonctionnement du modèle ou fournir une piste de vérification bien documentée, du modèle jusqu'aux données brutes, peut s'avérer difficile. Il est donc important d'enregistrer rigoureusement les données clés. • L'incertitude des modèles numériques persiste et des efforts doivent être déployés pour quantifier ou clarifier les sources et les impacts de cette incertitude. • Les algorithmes d'interpolation peuvent être difficiles à reproduire et à vérifier indépendamment

2.3.5.1.8 Modèles de flux d'eaux souterraines, de contaminants et de chaleur

Une gamme de modèles numériques peut être utilisée pour prédire les changements dans le temps des éléments suivants :

- Les effets des changements hydrologiques (comme le pompage des eaux souterraines ou les aménagements d'irrigation) sur le comportement d'un aquifère.

- L'écoulement naturel des eaux souterraines dans l'environnement et leur composition chimique. Ces modèles tentent de prédire le devenir et le mouvement des substances chimiques dans des scénarios naturels, urbains ou hypothétiques.
- Le flux de chaleur à travers le sol. Ces modèles tentent de prédire la variation périodique de la température du sol en fonction de la profondeur.

Tous ces modèles sont développés à partir d'un modèle numérique 3D correctement attribué et bien contraint. Les équations différentielles, souvent résolues uniquement par des méthodes approximatives utilisant une analyse numérique, sont ensuite utilisées pour prédire les variations temporelles.

Ces types de modèles doivent être calibrés, ce qui implique d'exécuter le modèle par rapport à des données réelles observées et de modifier le modèle/les paramètres jusqu'à ce qu'un accord étroit soit obtenu.

2.3.5.2 Sources et gestion des données

Les sources d'information pour la caractérisation de type géologie de l'ingénieur peuvent être obtenues à partir d'un large éventail de méthodes et de techniques d'investigation. Ces données peuvent être collectées, enregistrées et affichées sous forme de points, de logs, de plans ou de coupes 2D, de voxels ou de polygones 3D. Cette diversité doit être prise en compte par la mise en place d'une structure de données générique suffisamment flexible.

Pour intégrer des logs ou des enregistrements d'investigations (forages, sondages, etc.) dans un modèle numérique 3D, une base de données relationnelle est nécessaire. Les relations entre les enregistrements/entrées de ce type de base de données sont fournies par deux tableaux liés :

- Un tableau de sources de données (*collar file*) présentant les coordonnées, l'orientation/l'azimut, l'inclinaison, etc. et d'autres informations de position.
- Un tableau d'attributs (*downhole file*) enregistrés en fonction de la profondeur ou par intervalles de profondeur pour chaque source de données.

Ces deux tableaux sont reliés par une clé, généralement un attribut unique ou un groupe d'attributs. La clé est un élément essentiel d'une base de données relationnelle : elle permet d'établir et d'identifier les relations entre les tableaux, ainsi que d'identifier de manière unique chaque enregistrement ou ligne de données d'un tableau.

Du point de vue de la gestion des données, il est recommandé d'utiliser des fichiers de projet universels, lorsque cela est possible, afin de minimiser la dépendance aux fichiers de projet transitoires spécifiques aux logiciels, dont les fonctionnalités inter-logiciels ou inter-versions sont limitées. Les données fixes ou factuelles sont généralement codées de manière standardisée, pouvant être adaptées à une Norme Descriptive Nationale ou Internationale, comme le format de l'Association pour les Spécialistes en Géotechnique et Géo-environnement [AGS, Association of Geotechnical and Geo-environmental Specialists] au Royaume-Uni et le format d'Échange de Données pour les Spécialistes en Géotechnique et Géo-environnement [DIGGS, Data Interchange for Geotechnical and Geo-environmental Specialists] aux États-Unis. Les formats texte sont accessibles sans logiciel de modélisation spécifique, bien que la taille des fichiers puisse être importante.

Il existe des normes de transfert de données qui permettent le transfert de données d'observation géotechnique tout au long du cycle de vie du projet.

Comme pour toutes les données, une vérification rigoureuse est nécessaire pour garantir que les informations géographiques et les attributs observés sont raisonnables et se situent dans des marges d'erreur acceptables (telles que choisies et documentées par le modélisateur). Cette évaluation permet de décider si des jeux de données spécifiques doivent être inclus dans le modèle et du niveau de fiabilité à accorder à chaque jeu de données. L'évaluation et les décisions doivent être documentées par le modélisateur dans le Rapport de Modélisation Numérique 3D.

2.3.5.3 Documentation du modèle numérique 3D

Fournir des résultats « statiques » aux équipes de conception lorsque le MGG est continuellement mis à jour tout au long du projet comporte des risques. Un processus est nécessaire pour garantir que les équipes de conception utilisent les informations du MGG les plus récentes. Il peut être nécessaire de classer les informations comme fixes (par exemple, les données/informations non susceptibles d'être modifiées, comme les enregistrements d'essais en laboratoire) ainsi que les informations interprétatives (par exemple, les limites/surfaces de géologie de l'ingénieur) susceptibles d'évoluer à mesure que de nouvelles données/informations sont obtenues.

Lors des dernières étapes des projets, notamment pendant la construction, le modèle numérique 3D doit être revisité et mis à jour avec de nouvelles informations/données et une réinterprétation des implications techniques associées. Cette responsabilité peut incomber à l'ingénieur du maître d'ouvrage ou à l'entrepreneur, mais elle doit être clairement attribuée.

Une gestion transparente des versions du modèle numérique et de ses composants utilisés dans un cadre d'aide à la décision est importante. L'issue d'une procédure judiciaire peut dépendre de la démonstration que le modèle représentait les meilleures informations à l'époque, et non celles découvertes ultérieurement. L'historique du modèle numérique doit être documenté manuellement, par exemple dans un tableur, ou automatiquement à l'aide d'un logiciel ou d'un outil en ligne.

2.3.5.3.1 Importance d'un workflow efficace pour la gestion des données

Une gestion efficace des données est indispensable à la mise en place d'un workflow performant pour le développement de modèles numériques 3D. Cela présente des avantages économiques majeurs sur le coût global de développement et d'utilisation des modèles. Le workflow suivant est suggéré :

- Plan : description des données qui seront compilées et de la manière dont elles seront collectées, gérées et rendues accessibles tout au long de leur cycle de vie. Cela impliquera probablement le client ou d'autres parties prenantes. Les maîtres d'ouvrage doivent être encouragés à préserver leurs propres données.
- Collecte : saisie et acquisition de données de site et de laboratoire sous forme de fichiers de données standardisés, de Rapports de Données papier, ou de modèles de saisie de données sur tableur/base de données (pro-forma).
- Assurance : la qualité des données enregistrées est assurée dans la mesure du possible par des contrôles via des procédures d'assurance qualité (ISO 9001, UKAS, AGS) utilisant les procédures internes de vérification et de validation appropriées.
- Description : les données sont nettoyées et épurées, décrites avec précision et minutie, et comprises par l'utilisateur final. Lorsque des données doivent être exclues, la justification de cette exclusion doit être clairement documentée.
- Conservation : les données sont soumises à un archivage à long terme appropriée, soit sur un système de cloud indexé, soit dans des dossiers et fichiers de projet.

- Découverte : les données potentiellement utiles sont localisées et obtenues, ainsi que les informations pertinentes sur les données (métadonnées).
- Intégration : les données provenant de sources disparates sont combinées pour former un ensemble homogène et facilement analysable. Il est essentiel que toute limitation des données ou tout problème d'échelle soient clairement identifiés et consignés.
- Analyse : les données sont utilisées pour créer des visualisations (coupes transversales ou modèles numériques 3D) et évaluées à l'aide de feuilles de calcul ou de méthodes plus sophistiquées d'analyse de données.

2.3.5.4 Examen des modèles numériques 3D

Le vérificateur et l'examineur doivent avoir une expérience appropriée des conditions géologiques et d'ingénierie du site, des exigences du projet et de l'ensemble des logiciels utilisés pour créer les modèles numériques 3D.

Avant d'examiner le modèle numérique 3D, il convient de vérifier le système de modélisation. L'ingénieur-géologue vérificateur doit connaître les logiciels et être capable de vérifier les points suivants :

- Les entrées sont à jour et les bonnes colonnes ont été importées depuis la ou les bases de données.
- La résolution de la topographie et du modèle 3D sont adaptées.
- La sélection des surfaces pour chaque unité homogène géotechnique.
- La relation entre chaque surface et les autres unités homogène géotechniques.
- La nature des surfaces en 3D et la manière dont elles respectent le modèle conceptuel de base, les forages et les données d'entrée.
- Toutes coupes ou autres livrables produits.

La vérification des modèles numériques 3D constitue une étape cruciale du processus de modélisation et garantit leur qualité. Le modèle numérique 3D étant un élément du MGG, les processus et principes décrits à la section 1.1, ainsi que les étapes de développement décrites à la section 1.2, doivent être respectés. La vérification des modèles numériques 3D peut s'avérer plus complexe et plus longue que celle des cartes et coupes classiques, car toutes les surfaces et volumes doivent être contrôlés et leur conformité au MGG doit être vérifiée.

Si des coupes 2D et une cartographie sont produites et livrées avec le modèle 3D utilisé comme base pour l'interprétation des données et non fourni comme livrable, les coupes 2D doivent être examinées conformément à la pratique standard (données de forage évaluées, « logique » géologique évaluée, etc).

2.3.5.5 Sorties de modèles numériques 3D

Il est important que l'incertitude du modèle numérique 3D soit documentée et clairement communiquée. Les surfaces et autres éléments du modèle extraits doivent être accompagnés d'une déclaration de métadonnées indiquant l'incertitude.

Bien que la visualisation peut être créée en 3D, tous les projets ne nécessitent pas de résultats 3D du modèle. Pour certains projets, des résultats 2D du modèle numérique 3D peuvent suffire, voire être préférables. De nombreux logiciels de modélisation sont désormais configurés pour permettre l'exportation de résultats 2D dans différents formats, notamment des formats de visualisation (par exemple, Portable Document Format) et des fichiers de dessin numériques (par exemple, *.dwg), directement importables dans d'autres programmes pour analyse.

Les modèles numériques 3D peuvent également être importés dans d'autres logiciels de modélisation et de conception 3D afin d'éclairer directement la conception d'éléments dépendants des conditions du terrain. Dans ces cas, il est important de communiquer clairement les incertitudes à tous les utilisateurs actuels et futurs du modèle numérique 3D.

Il peut être utile d'intégrer des détails 2D dans un résultat 3D. Par exemple, l'inclusion de coupes 2D détaillées, typiques ou spécifiques, dans un modèle numérique 3D. Ces coupes peuvent être annotées. Cela permet d'obtenir un niveau de détail difficile à saisir en 3D et facilite la communication des détails et des incertitudes du MGG.

Un Rapport de Modèle Numérique 3D doit accompagner tous résultats.

D'autres techniques de visualisation incluent les PDF 3D, divers outils spécifiques de visualisation de modèles numériques, des animations et des vidéos, la réalité virtuelle ou la réalité augmentée, l'impression 3D, etc.

2.3.5.5.1 MGG et BIM (Building Information Modelling)

La méthode BIM est un processus impliquant la génération et la gestion de représentations numériques des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment ou d'un lieu. Cela permet de garantir que les informations pertinentes sont créées au bon moment, dans un format adapté, afin de permettre une prise de décisions éclairées tout au long de la conception, de la construction et de l'exploitation des actifs bâtis (Kessler et al., 2015). Combiner une visualisation 3D du sol avec les composants artificiels du projet (parfois appelé modèle fédéré) peut s'avérer très utile, par exemple lors de l'évaluation de la conception.

Il est toutefois important de comprendre les principales différences entre les modèles de structures hors sol/la BIM et le MGG, en termes d'incertitude et de méthode d'élaboration. Des problèmes peuvent survenir lors de l'importation des résultats numériques du MGG dans les systèmes BIM. Ils sont considérés comme exacts et raisonnables lorsqu'une amélioration supplémentaire est nécessaire.

Il est également important de reconnaître ou de rappeler aux utilisateurs/modélisateurs le niveau d'incertitude et son lien avec les échelles correspondantes entre les MGG et le BIM. Dans un modèle BIM, les ouvrages sont généralement visualisés avec une précision millimétrique, tandis que les MGG peuvent avoir une précision de l'ordre de quelques dizaines de mètres, adaptée aux conditions de terrain interprétées. Cela aura un impact sur l'applicabilité de ce type de modèle au sein de la hiérarchie du BIM en termes de Niveau de Développement (Level Of Development en anglais) (Forum BIM 2019).

[**Retour à la Section 1.3 ASSAMBLAGE ET COMMUNICATION D'UN MGG**](#)

2.4 GERER LES INCERTITUDES DU MGG

2.4.1 Introduction

L'incertitude au sein du MGG est due à des aspects mal connus, voire totalement inconnus, du cadre de connaissances. Cette incertitude peut nuire à la fiabilité du MGG, c'est-à-dire le degré avec lequel les conditions géologiques d'ingénierie prévues fournissent une approximation précise et raisonnable des conditions ou performances réelles, car elles influencent le projet. Une fiabilité réduite entraînera une augmentation du risque, c'est-à-dire la probabilité qu'un résultat défavorable survienne. Celle-ci est souvent exprimée comme une combinaison des conséquences d'une série d'événements ou de scénarios, et de la probabilité associée de leur survenance.

L'augmentation de la fiabilité et la réduction des risques résultent de l'accumulation de connaissances conceptuelles et observationnelles au sein du MGG, généralement à travers différentes étapes d'investigations menées au fur et à mesure de l'avancement du projet (Figure 2-15).

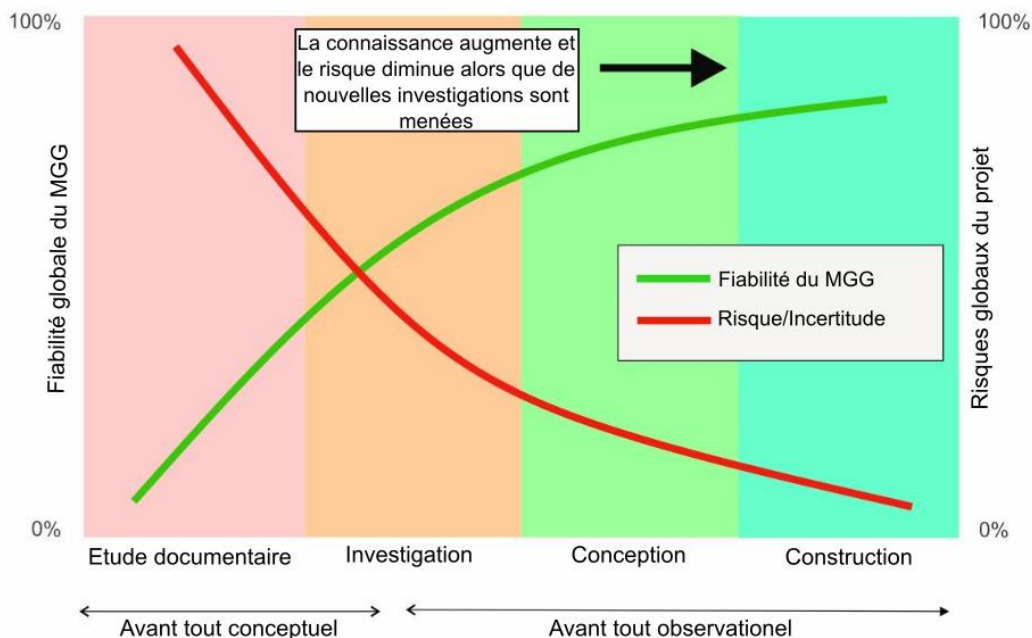


Figure 2-15 Améliorations idéalisées de la fiabilité du MGG à mesure que le projet progresse.

Cependant, l'hypothèse classique selon laquelle la réduction progressive des risques et l'augmentation de la fiabilité associée seront obtenues par des étapes séquentielles d'investigation, de conception et de construction, peut être trompeuse. Une réduction significative des risques et une amélioration de la compréhension nécessitent des boucles de rétroaction à chaque étape du projet (Carter 1992, Carter & Marinos 2020). Il est essentiel qu'à mesure que le projet progresse, le MGG soit révisé, vérifié et, si nécessaire, amélioré ou modifié. L'amélioration de la fiabilité est obtenue par une meilleure compréhension, lorsque les idées conceptuelles et les données d'observation ont été rapprochées grâce à un processus itératif de révision, de comparaison, de modification et de vérification.

La vérification réelle du MGG par rapport à un environnement géologique naturel, réel et complexe est problématique. Cependant, les boucles de rétroaction intégrées au processus de développement du MGG (figure 2-16) permettent de le contraindre à se baser sur les observations issues du projet. Si ces comparaisons démontrent une fiabilité accrue à mesure que le projet avance, la construction peut souvent être réalisée plus efficacement, même si le MGG n'est pas toujours parfaitement précis.

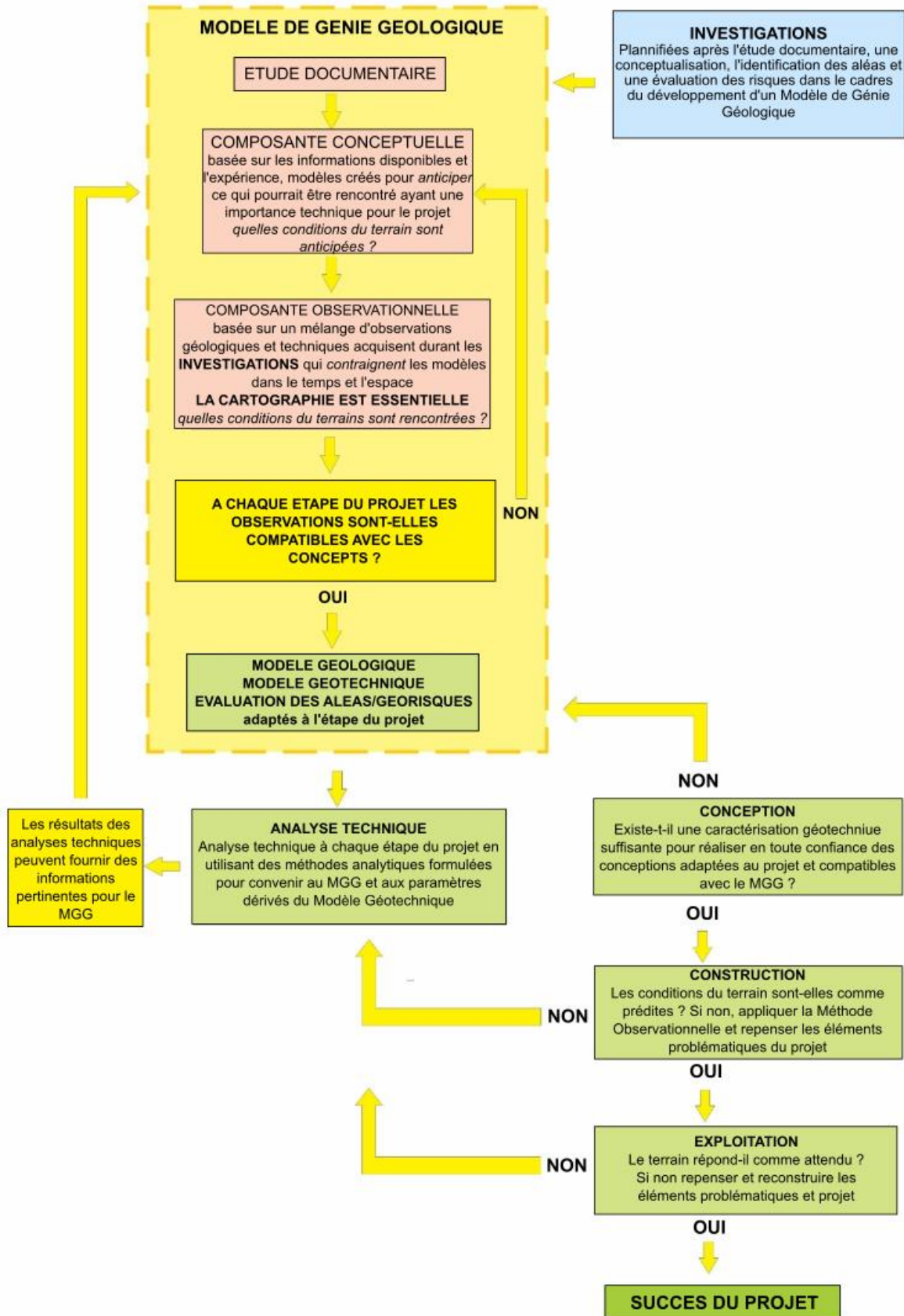


Figure 2-16 Boucles de rétroaction permettant la mise à niveau progressive du MGG au cours du cycle de vie du projet.

Le niveau de risque jugé acceptable pour le projet reflète l'appétence au risque du maître d'ouvrage et varie considérablement selon le secteur de l'ingénierie de terrain et à travers le monde. Ce profil de risque doit être pris en compte dès le début du projet, car il détermine le niveau d'incertitude acceptable dans le cadre de connaissances du MGG et, par conséquent, la nature et l'étendue des investigations nécessaires pour réduire l'incertitude à des niveaux acceptables. Le profil de risque peut être exprimé de diverses manières, allant de la simple affirmation d'un niveau de risque acceptable exprimé qualitativement, à l'utilisation d'une évaluation quantitative sophistiquée des risques et de critères d'acceptation précisément définis.

Tout au long du cycle de vie du projet, l'incertitude inhérente au cadre de connaissances MGG devra également être communiquée aux différentes parties prenantes du projet, dont certaines n'auront aucune connaissance technique, en utilisant des méthodes adaptées à leurs besoins. Des classifications simples et transparentes des niveaux de risque sont à privilégier, comme ci-dessous.

Évaluation du niveau de risque du projet

EXTREME	Menace importante pour le projet ; une action immédiate est requise
FORT	Le risque peut constituer une menace pour le projet ; récupération possible ; attention de la haute direction requise
MODERE	Le risque peut constituer une menace pour le projet ; une récupération presque immédiate est possible ; la responsabilité de la direction doit être spécifiée
FAIBLE	Le risque représente une menace minimale pour le projet ; gérer selon des procédures de routine

2.4.2 Sources d'incertitudes

2.4.2.1 Incertitude dans le modèle conceptuel

Les décisions prises lors du processus de conceptualisation peuvent introduire des biais et de l'incertitude dans le modèle. Bond et al. (2008) ont relevé plusieurs types de biais, les plus importants étant :

- Biais de disponibilité : une interprétation qui vient le plus facilement à l'esprit et qui est familière.
- Biais d'ancrage : accepter l'opinion publiée d'un « expert » ou d'une personne en position dominante.
- Biais de confirmation : rechercher uniquement des opinions ou des faits qui soutiennent sa propre hypothèse, ou de la même manière, interpréter les données pour qu'elles correspondent à l'hypothèse.
- Biais optimiste : interpréter d'une manière qui produit un résultat plus positif pour une étude (comme interpréter une plus grande continuité des structures, ou éviter de placer des failles), ou préférer ignorer les données contradictoires qui peuvent réduire les résultats positifs du projet.

Les facteurs suivants sont également importants :

- La pertinence spatiale des données pour le projet – localisation et échelle.
- La qualité des sources de données disponibles.

- La représentativité et l'adéquation volumétrique (quantité) des données disponibles.
- La complexité géotechnique.

Cependant, la fiabilité globale du modèle conceptuel dépend principalement du niveau d'expérience et de connaissances des personnes impliquées dans son développement.

2.4.2.2 Incertitude dans le modèle d'observation

À condition qu'une quantité adéquate de données d'observation soit prise en compte dans un modèle conceptuel robuste, les incertitudes du modèle d'observation seront dues à :

- La variabilité inhérente : la variabilité spatiale naturelle de l'environnement géologique qui ne peut être réduite.
- Des données limitées : impossibilité de mesurer les propriétés géologiques et géotechniques en chaque point du sol ; l'incertitude peut être réduite en augmentant le nombre et la répartition des mesures.
- L'incertitude des essais : incertitudes liées à la précision des dispositifs d'essai, qui ne peuvent être supprimées sans améliorer la qualité des instruments.

2.4.3 Évaluation holistique de la fiabilité d'un MGG par révision

Un MGG fiable est établi lorsqu'il existe une « compatibilité » ou une « harmonie » suffisante entre le modèle conceptuel en évolution et les données d'observation acquises. C'est le modèle conceptuel qui sert à mesurer cette compatibilité ou cette harmonie, car il incarne la réflexion sur la géologie de l'ingénieur fondamentalement correcte à développer pour un site. Cette comparaison permet également d'évaluer l'adéquation du modèle conceptuel : si les divergences entre le modèle conceptuel et les données d'observation sont trop nombreuses et augmentent avec le nombre d'observations, le modèle conceptuel doit être révisé. Les versions précédentes d'un modèle conceptuel ne doivent pas être qualifiées d'inexactes ou erronées, mais doivent être reconnues comme faisant partie d'un processus itératif et documentées dans le cadre de l'élaboration du MGG.

Bien que l'expertise comprenne l'évaluation des composantes conceptuelles du MGG, elle se déroule généralement sur une durée limitée et ne permet souvent pas d'approfondir suffisamment le modèle pour déceler les problèmes de développement fondamentaux susceptibles d'impacter sa fiabilité finale. Afin de minimiser l'impact de cette limitation inhérente au processus d'expertise, l'approche optimale consiste à lancer l'expertise le plus tôt possible, dès le démarrage du projet, puis à la poursuivre régulièrement jusqu'à son achèvement. Cela ne sera pas possible si l'expertise est commandée en cours de projet, par exemple en réponse à une défaillance majeure.

2.4.4 Autres méthodes d'évaluation de l'incertitude et de la fiabilité du MGG

2.4.4.1 Évaluation de la fiabilité de la composante conceptuelle

Le MGG doit être auto-vérifié à des moments convenus tout au long de son développement et de son affinement, afin de comparer la fiabilité du modèle conceptuel à des analogues conceptuels appropriés présentant les mêmes caractéristiques géologiques que la zone du site modélisée. Ainsi, l'auto-vérification doit viser à comparer le concept envisagé à des exemples concrets du catalogue.

2.4.4.2 Évaluation de la fiabilité de la composante observationnelle – approches qualitatives

Il existe plusieurs façons de communiquer la fiabilité d'un modèle d'observation aux utilisateurs, notamment au moyen de graphiques et de cartes thématiques. La figure 2-17 présente un diagramme de fiabilité sous forme de carte thermique, illustrant la manière de communiquer graphiquement l'incertitude des observations.

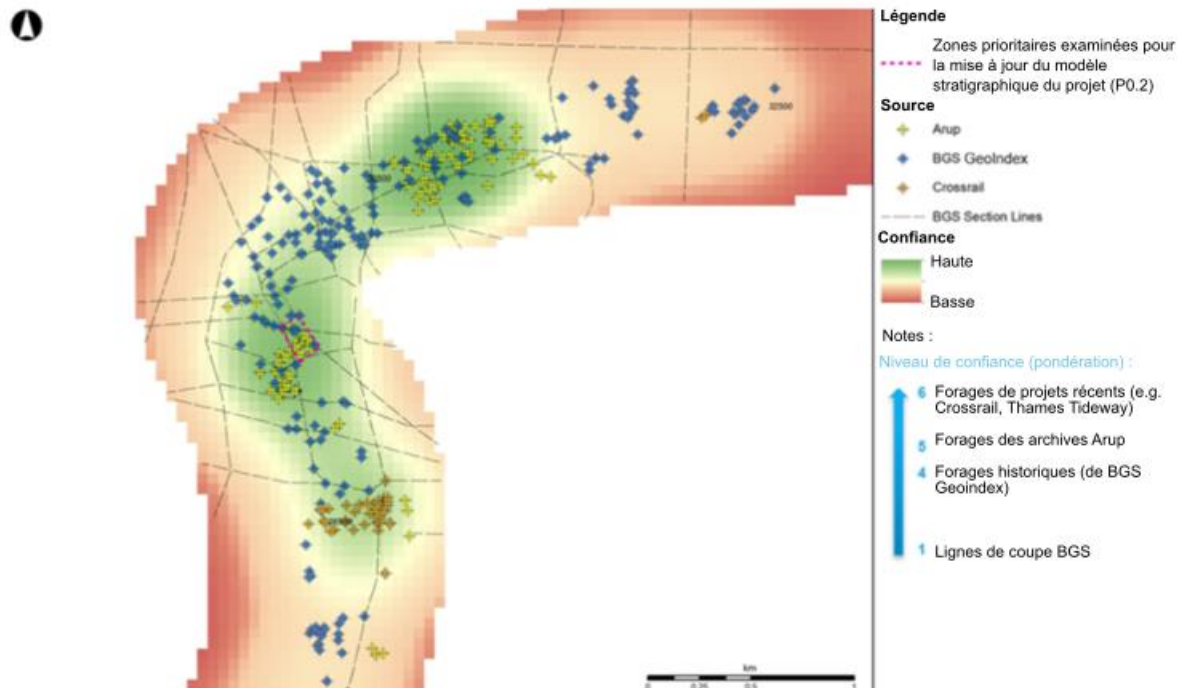


Figure 2-17 Carte thermique de confiance pour les niveaux de strates (d'après Ting et al. 2020).

L'incertitude dans la représentation géométrique des modèles peut également être documentée et visualisée à l'aide de techniques telles que :

- Requête spatiale (la surface et le sous-sol sont ombrés en fonction de la distance par rapport aux points d'investigation).
- Pendage de la surface (cela localise les zones d'intérêt, telles que les failles possibles observées comme des surfaces à fort pendage entre les points d'investigation).
- Contourer la limite du modèle à une distance maximale des points d'investigation afin de ne pas modéliser au-delà de la limite définie.

2.4.4.2.1 Fiabilité relative des observations géotechniques

Une approche qualitative pour évaluer la fiabilité relative des données peut être appliquée aux MGG pour classer la fiabilité des ensembles de données (par ordre de certitude du moins au plus élevé) sous les rubriques « Implicites », « Qualifiées », « Justifiées » et enfin « Vérifiées » (voir tableau 2-3).

2.4.4.3 Évaluation de la fiabilité de la composante observationnelle - approches semi-quantitatives

2.4.4.3.1 L'indice R pour le tunneling

L'indice R est une méthode d'évaluation développée pour estimer la fiabilité des Modèles Géologiques et Géotechniques élaborés pour le creusement de tunnels (Perello et al., 2005 ; Dematteis et Soldo, 2015 ; Venturini et al., 2019). Son application à l'industrie minière a été étendue, notamment pour la

validation des modèles de mines à ciel ouvert (Carter et Barnett, 2021). Cette méthode évalue la qualité des données d'investigation géotechnique et la complexité géologique du site afin de qualifier la fiabilité du modèle.

Tableau 2-3 Incertitude liée aux informations disponibles

Type de données	Exigences (adaptées de Haile 2004) en supposant que le MGG est construit conformément aux Recommandations
Implicites	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune donnée géotechnique spécifique au site n'est nécessaire ou disponible. • Le MGG est principalement conceptuel. • Le MGG présente un faible niveau de fiabilité.
Qualifiées	<ul style="list-style-type: none"> • Les données spécifiques au projet sont globalement représentatives des principales unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur et des domaines géotechniques inférés, bien que la variabilité ou la continuité locale ne puisse être correctement prises en compte. • Les observations sont globalement conformes au modèle conceptuel. Des zones non conformes ont été identifiées. • Le MGG présente un niveau de fiabilité modéré.
Justifiées	<ul style="list-style-type: none"> • Les données spécifiques au projet présentent une distribution spatiale (densité) suffisante pour identifier les unités homogènes géotechnique et démontrer la continuité et la variabilité des propriétés géotechniques au sein de chaque unité. • Haut degré de concordance entre les modèles conceptuel et observationnel. • Le MGG présente un niveau de fiabilité élevé.
Vérifiées	<ul style="list-style-type: none"> • Des données spécifiques au site sont dérivées. Toutes les limites/unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur ont été cartographiées sur le terrain lors de leur exposition pendant la construction. • Degré élevé de concordance entre les modèles conceptuel et d'investigation. • Le MGG intègre la cartographie de l'exposition, par exemple des fondations/tunnels, et l'observation directe des conditions in situ. • Le MGG présente le plus haut niveau de fiabilité.

Dematteis et Soldo (2015) ont fourni des explications détaillées pour l'application de la méthode, dans un contexte de creusement de tunnels, sur la base d'un système de classification développé pour prendre en compte les paramètres suivants :

- Qualité de l'investigation géologique et géotechnique. La méthode fournit des tableaux d'évaluation pour chacun des paramètres, subdivisés en :
 - Cartographie pour la géologie de l'ingénieur, y compris l'interprétation de photographies aériennes et d'images satellites.
 - Investigation géophysique (investigation indirecte).
 - Forages et diagraphies, essais sur site et essais en laboratoire (investigations directes).
- Complexité du site, qui peut être décrite au moyen des trois paramètres géologiques suivants, appelés Paramètres du Système (la méthode fournit un tableau avec les annotations à utiliser pour les conditions géologiques anticipées) :
 - Complexité du contexte litho-stratigraphique (LC).
 - Complexité des structures liées aux déformations ductiles (DC).
 - Complexité des structures liées à la déformation fragile (BC).

Comme de nombreux paramètres impliqués (Paramètres de Qualité et Paramètres Système) peuvent être liés les uns aux autres, l'influence d'un seul paramètre sur tous les autres et vice versa, est considérée au moyen de matrices d'interaction binaires et entièrement couplées.

Le calcul de l'indice R est effectué le long du profil géologique et géotechnique longitudinal du tunnel. Le tracé est divisé en sections homogènes, auxquelles sont attribuées les valeurs des paramètres décrits ci-dessus, ce qui permet de calculer l'indice R pour chaque section. Les valeurs de l'indice R varient de 0 à 10. Son importance pour la fiabilité du modèle a été déduite de l'analyse de plusieurs études de cas et est exprimée en quatre classes (A, B, C, D), comme indiqué dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 Fiabilité des modèles géologiques et géotechniques dans les projets de tunnels utilisant l'indice R (modifié de Dematteis et Soldo 2015).

Indice R		Fiabilité	Description
Classe	Valeur		
A	10 – 7.6	Bonne à très bonne	Les limites et failles signalées dans la coupe seront rencontrées dans un intervalle de \pm 25-50 m ; la marge d'erreur pour l'épaisseur des couches lithologiques peut être comprise entre 10% et 20%
B	7.5 – 5.1	Moyenne à bonne	Les limites et failles signalées dans la section seront rencontrées dans un intervalle de \pm 50-100 m ; la marge d'erreur pour l'épaisseur des couches lithologiques peut être comprise entre 30 et 50 %. Outre celles indiquées, d'autres failles mineures pourraient être présentes.
C	5 – 2.6	Faible à moyenne	Les limites et failles signalées dans la section seront rencontrées dans un intervalle de \pm 100-200 m ; la marge d'erreur pour l'épaisseur des couches lithologiques peut être comprise entre 50 et 100 %. Outre celles indiquées, d'autres failles majeures pourraient être présentes.
D	2.5 – 1	Pas totalement fiables ou peu fiables	Les limites et failles signalées dans la section peuvent être absentes, tandis que d'autres éléments peuvent être présents. L'épaisseur des couches lithologiques n'est pas définie. D'autres éléments géologiques que ceux prévus peuvent être présents.

La méthode comporte un module spécifique visant à intégrer le plan d'investigation géotechnique afin d'améliorer la fiabilité du modèle (Perello et al., 2005 ; Dematteis et Soldo, 2015). Elle permet d'évaluer la qualité de chaque donnée du modèle et l'impact des différents types d'investigation géotechnique sur l'amélioration de la notation, facilitant ainsi le choix du type d'investigation géotechnique le plus adapté pour améliorer la fiabilité du modèle.

2.4.4.3.2 Évaluation de l'incertitude

Une fois l'enquête sur le site terminée, le niveau d'incertitude et de fiabilité des différentes parties du cadre de connaissances du MGG peut être systématiquement évalué pour identifier les implications du projet, par exemple, en utilisant la méthode conçue par Paul (2018).

2.4.4.3.3 Utilisation des déclarations de métadonnées

L'incertitude liée aux fichiers de données électroniques, qui peuvent inclure à la fois des données et une interprétation, peut être documentée sous la forme d'une déclaration de métadonnées indépendante jointe aux fichiers échangés au sein des organisations ou entre différentes disciplines et applications logicielles.

2.4.4.4 Évaluation de la fiabilité de la composante observationnelle - approches quantitatives

Les méthodes suivantes sont également capables de quantifier et de gérer ce type d'incertitude : l'approche par champ aléatoire, le krigeage et la simulation stochastique ; celles-ci sont présentées ci-dessous.

2.4.4.4.1 Approche par champ aléatoire

Cette méthode permet aux utilisateurs d'interpréter l'incertitude de la variabilité spatiale grâce à une fonction de tendance déterministe et à des fluctuations aléatoires. En implémentant les propriétés de fluctuation aléatoire dans une simulation de Monte-Carlo, les utilisateurs peuvent calculer l'écart type spatial lié aux valeurs estimées des paramètres sur l'ensemble du domaine d'intérêt (Vanmarcke 1984).

2.4.4.4.2 Méthodes de krigeage

Les méthodes de krigeage sont un ensemble de techniques univariées et multivariées relevant de la géostatistique. Elles permettent de cartographier la distribution spatiale de données quantitatives géoréférencées, telles que les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols et des roches, ainsi que des fluides qu'ils contiennent. Ces méthodes reposent sur la Théorie des Variables Régionalisées, qui considère les attributs quantitatifs d'un domaine donné (par exemple, une unité homogène géotechnique), mesurés de manière discrète, comme des variables aléatoires et spatialement dépendantes. Autrement dit, les valeurs relatives à des mesures proches sont susceptibles d'être plus similaires que si elles étaient plus éloignées. Ces techniques géostatistiques permettent de quantifier l'incertitude associée aux estimations en termes de variance de krigeage, ce qui permet de fournir une valeur d'écart type (au sein d'une même unité homogène pour la géologie de l'ingénieur) ou les limites de l'intervalle de confiance requis (Vessia et al., 2020). Pour que le krigeage produise des résultats significatifs, il doit être réalisé par unité homogène géotechniques développée avec le MGG.

2.4.4.4.3 Méthodes de simulation stochastique

Les méthodes de Simulation Stochastique permettent de quantifier l'incertitude en fournissant un certain nombre de réalisations, obtenues à partir de fonctions de variabilité spatiale définies par des mesures expérimentales (variogramme ou LMC). Les nombreuses configurations équiprobables de distribution spatiale résultantes, liées au paramètre géotechnique étudié, donnent lieu à une distribution statistique des valeurs à chaque emplacement du domaine considéré, représentant une estimation et une quantification de l'incertitude locale.

2.4.4.4.4 Intégration de l'incertitude des données dans les paramètres de conception

Les commentaires sur ces aspects de la conception ne relèvent pas du champ d'application de ces Recommandations.

[**Retour à la Section 1.4 GERER LES INCERTITUDES DU MGG**](#)

2.5 GARANTIR LA QUALITE DES MGG

2.5.1 Objectifs globaux de qualité du MGG

Le MGG devrait viser à satisfaire un certain nombre d'objectifs et devrait être :

- Conforme aux documents/spécifications de l'appel d'offres du projet.
- Robuste - créé à partir d'une compréhension logique basée sur l'assimilation de toutes les informations disponibles, avec l'apport d'une expérience considérable et suivant la logique géologique.
- Transparent - facilement accessible et compréhensible même pour les personnes non techniques.
- Défendable - de qualité suffisamment élevée pour résister à une critique raisonnable.
- Cohérent - tout doit fonctionner en harmonie et être exempt de défauts majeurs.
- Suffisant - il doit documenter et expliquer toutes les conditions géologiques d'ingénierie importantes sur le site.
- Nécessaire - les parties du MGG qui ne sont pas essentielles doivent être retirées.

2.5.2 Vérification de la qualité du processus de développement du MGG

2.5.2.1 Normalisation des Données d'Entrée du Modèle

La standardisation des données d'entrée des modèles réduira les difficultés de développement des modèles à différentes étapes d'un même projet (qui pourraient être réalisées par différentes organisations ou personnes) et/ou contribuera à la standardisation des formats d'entrée des données pour l'ensemble des portefeuilles d'actifs. Cela permettra aux utilisateurs/clients de diffuser ces modèles en interne, au sein de leur entreprise, afin d'en optimiser l'utilisation et de faciliter leur compréhension par des personnes extérieures aux disciplines de la géologie, de la géotechnique et du génie civil. Le tableau 2-5 ci-dessous ne prétend pas être exhaustif concernant la catégorisation des couches spatiales, mais vise à fournir des indications sur le niveau de détail des informations que les utilisateurs/clients souhaitent obtenir pour les informations « typiques ».

Il faut noter que les informations anciennes ne respectant pas le format « standard » peuvent être classées comme « inexactes ou incomplètes » et omises de la base de données. Cependant, comme ces informations peuvent fournir des informations précieuses sur les conditions du terrain, il est impératif de les intégrer au modèle. Il est important de veiller à ce que les protocoles de normalisation des données d'entrée ne soient pas utilisés pour filtrer et omettre des données non standardisées, mais potentiellement critiques.

Sur certains projets, les entrées de données du modèle peuvent devoir être conformes à un plan de gestion d'ingénierie numérique spécifique au projet.

Table 2-5 Normalisation des entrées

Type de données	Sous-type	Information requise
Topographie		Date d'acquisition, méthode d'acquisition, description de la topographie (par exemple fusionnée à partir des surfaces x et y, etc.), remplacée ou actuelle ? Précision, échelle
Données de forage/excavation	Tête de forage	Identifiant du trou, coordonnées xyz de la tête de forage, projection et système de référence, profondeur, inclinaison, azimuth, norme de diagraphie, type de trou/puits d'essai/tranchée d'exploration, méthode
	Données de fond de puits (ensemble de données de base pour toutes les données dérivées)	Identifiant du trou, type de roche/sol, description de la roche/sol : normalement cela se trouve dans une base de données avec un format de données reconnu, par exemple AGS. La base de données entière est fournie.
Données Structurales (mesures géologiques)		Date d'acquisition, type de défaut, mesure de l'azimut magnétique ou du nord vrai
Données de piézomètre		Identifiant du trou, date de forage, tête de forage, profondeur du trou, type de piézomètre, date de mesure, niveau d'eau, résultat du test de perméabilité in situ
Coupes géologiques		Titre de la coupe et brève description, date, dessin/produit, dessiné par/approuvé par, tolérance de décalage de la coupe, orientation, échelle, méthodes de projection des sondages /des puits
Principales caractéristiques de géologie structurale (failles, dykes, zones de cisaillement, axe anticlinal et axe synclinal)		Identifiant de la faille (le cas échéant), confiance (conceptuelle, déduite/faible, modérée ou élevée), distance d'extrapolation et justification, largeur estimée de la faille/zone (si connue), description des caractéristiques de la faille, norme descriptive (par exemple, comme AS 1726:2017)
Cartes géoréférencées	Imagerie aérienne/téledétection terrestre	Date d'acquisition, type - Lidar, photo aérienne, image satellite, etc., méthode d'acquisition, bandes de fréquences, méthodes de traitement, obsolètes ou actuelles, précision estimée du géoréférencement, échelle
	Dessins (informations à inclure sur le dessin lui-même ou dans la convention de dénomination, selon le cas)	Numéro du dessin, date de création, échelle, légende du dessin (si disponible), données du dessin original, précision estimée du géoréférencement
Géophysique	Lignes de mesures (par exemple, sismique),	Date d'acquisition, méthode d'acquisition, terrestre ou sur l'eau, légende, précision estimée du géoréférencement
	Relevés aériens (par exemple, gravimétriques ou radiométriques)	Date d'acquisition, méthode d'acquisition, légende, précision estimée du géoréférencement, échelle



	Géophysique de fond de trou (relevés structuraux optiques ou soniques)	Type de relevés, date d'acquisition, échelle de mesure (le cas échéant)
--	--	---

[Retour à la Section 1.5 GARANTIR LA QUALITE DES MGG](#)

2.6 MGG ET INGÉNIERIE DE PROJET

2.6.1 Présentation

Le référentiel de connaissances MGG soutient la documentation, la passation des marchés, les investigations, la conception, la construction et la gestion des risques des projets. À ce titre, le MGG est pertinent pour le maître d'ouvrage, l'ingénieur de projet, l'entrepreneur, l'organisme de réglementation et les autres parties prenantes du projet.

2.6.2 Aperçu des étapes du MGG et du projet

Le MGG joue un rôle essentiel dans le déroulement de la modélisation, de l'analyse, de la conception, de la construction et de l'exploitation. Bien que tous les projets ne se déroulent pas de la même manière et que des termes différents soient utilisés pour décrire les étapes d'un projet dans différents secteurs de l'industrie de l'ingénierie du sol, un aperçu de l'évolution du MGG au cours d'un projet est présenté ci-dessous :

Conceptualisation/Pré faisabilité

- Largement basé sur une étude documentaire et des informations existantes.
- Faible fiabilité, en particulier à l'échelle du champ proche (site du projet) ; meilleure fiabilité à l'échelle du champ lointain (régional).
- Principalement conceptuel.
- Modèle Géologique initial et, si nécessaire, évaluation initiale des aléas produits.
- Informe des problèmes et des aléas géotechniques d'importance majeure et des étapes d'investigation ultérieures.
- La visualisation 3D pourrait commencer à ce stade.
- La visualisation peut être relativement simple, par exemple en mettant l'accent sur l'aide à l'interprétation de la géomorphologie, de la stratigraphie ou de la lithologie, ou peut être plus complexe, par exemple si une cartographie de reconnaissance est entreprise.

Faisabilité

- Données d'investigation spécifiques au site disponibles. Conceptualisation revue et modifiée si nécessaire.
- Modèle Géologique réalisé.
- Entreprendre une évaluation qualitative ou quantitative de la fiabilité des MGG. S'interroger sur les principaux contrôles géologiques d'ingénierie sur le comportement du sol et les mécanismes de défaillance critique.
- Concevoir des recherches plus approfondies pour réduire l'incertitude et parvenir à une synergie entre la conceptualisation et l'observation.
- Modèle Géotechnique et évaluation des aléas produits.
- Modèles analytiques initiaux développés pour éclairer des analyses spécifiques.
- Vérifier que la fiabilité du MGG est cohérente avec la phase de conception.

Conception schématique/Conception d'appel d'offres

- Plus de détails dans les Modèles Géologiques et Géotechniques et l'évaluation des aléas grâce à une étude de site supplémentaire.
- Modèles analytiques développés pour éclairer la conception.
- Développer des sous-modèles supplémentaires pour offrir une meilleure fiabilité à plus grande échelle, selon les besoins.

- Veiller à ce que le MGG soit transféré aux soumissionnaires, lorsque les dispositions contractuelles le permettent.

Étape de conception détaillée

- La visualisation peut être un modèle numérique 3D.
- Fiabilité conforme aux objectifs à l'échelle requise.
- Modèles analytiques développés à partir des Modèles Géologiques et Géotechniques et de l'évaluation des aléas en toute confiance.

Les questions clés à cette étape incluent :

- Quels sont les contrôles géologiques d'ingénierie sur la conception tels qu'ils sont donnés par le MGG avant le début de l'analyse ?
- Comment les résultats analytiques éclairent-ils la compréhension des mécanismes et du comportement du sol et sont-ils cohérents avec la compréhension conceptuelle ?
- Comment les connaissances géologiques et analytiques de l'ingénierie éclairent-elles le choix des paramètres de conception ? Quel est l'impact du profil de risque du projet sur les décisions de conception ?

Phase travaux de Construction

- Le MGG est utilisé comme outil prédictif pour les travaux de construction et est mis à jour à plusieurs reprises en réponse aux informations du terrain observées pendant la construction.
- Observations et suivi de la construction, vérification de la conception.
- Sert de registre « tel que construit » des conditions rencontrées.
- Intégration avec le BIM.

2.6.3 Le MGG dans les investigations de site

Après l'élaboration du Modèle Géologique initial et du registre des risques initial, l'investigation du site peut être planifiée pour tester le modèle et étudier les zones d'incertitude. Du point de vue de la géologie de l'ingénieur, l'investigation doit se concentrer sur l'acquisition d'informations relatives aux objectifs clés suivants :

- Confirmation de la compréhension du contexte, de la stratigraphie, de la structure et des processus de surface sur le site et ses alentours. Les données peuvent être acquises à des emplacements spécifiques au projet, comme aux angles d'une structure, mais ces points peuvent évoluer avec le temps, à mesure que le projet est modifié. Les données les plus critiques doivent être acquises aux emplacements optimaux pour la compréhension du Modèle Géologique initial, comme la profondeur des limites des principales unités homogènes géotechniques. Cependant, les budgets étant limités et toutes les parties prenantes devant participer à la planification des investigations, des compromis seront toujours nécessaires lors de la planification des sites d'investigation.
- Évaluation, caractérisation et documentation des unités homogènes pour la géologie de l'ingénieur et des conditions au moyen d'observations et d'essais de surface et de subsurface.
- Investigation et caractérisation de tous les aléas ou dangers liés à la réponse du terrain qui ont été indiqués dans la conceptualisation.
- Évaluation de toutes les conditions géologiques d'ingénierie posant problème, dont l'existence est connue, mais qui sont si complexes, qu'il est impossible de les étudier de manière suffisamment détaillée.
- Rechercher des preuves de conditions géologiques d'ingénierie problématiques qui ont été anticipées par le processus de conceptualisation, mais qui n'ont pas été observées et qui, par conséquent, si elles sont rencontrées de manière inattendue pendant la construction, pourraient



potentiellement être considérées comme des conditions de terrain imprévues qui pourraient constituer la base d'une réclamation.

La figure 2-18 fournit un diagramme de processus générique pour l'utilisation du cadre de connaissances du MGG afin de planifier et de réaliser des investigations sur le site.

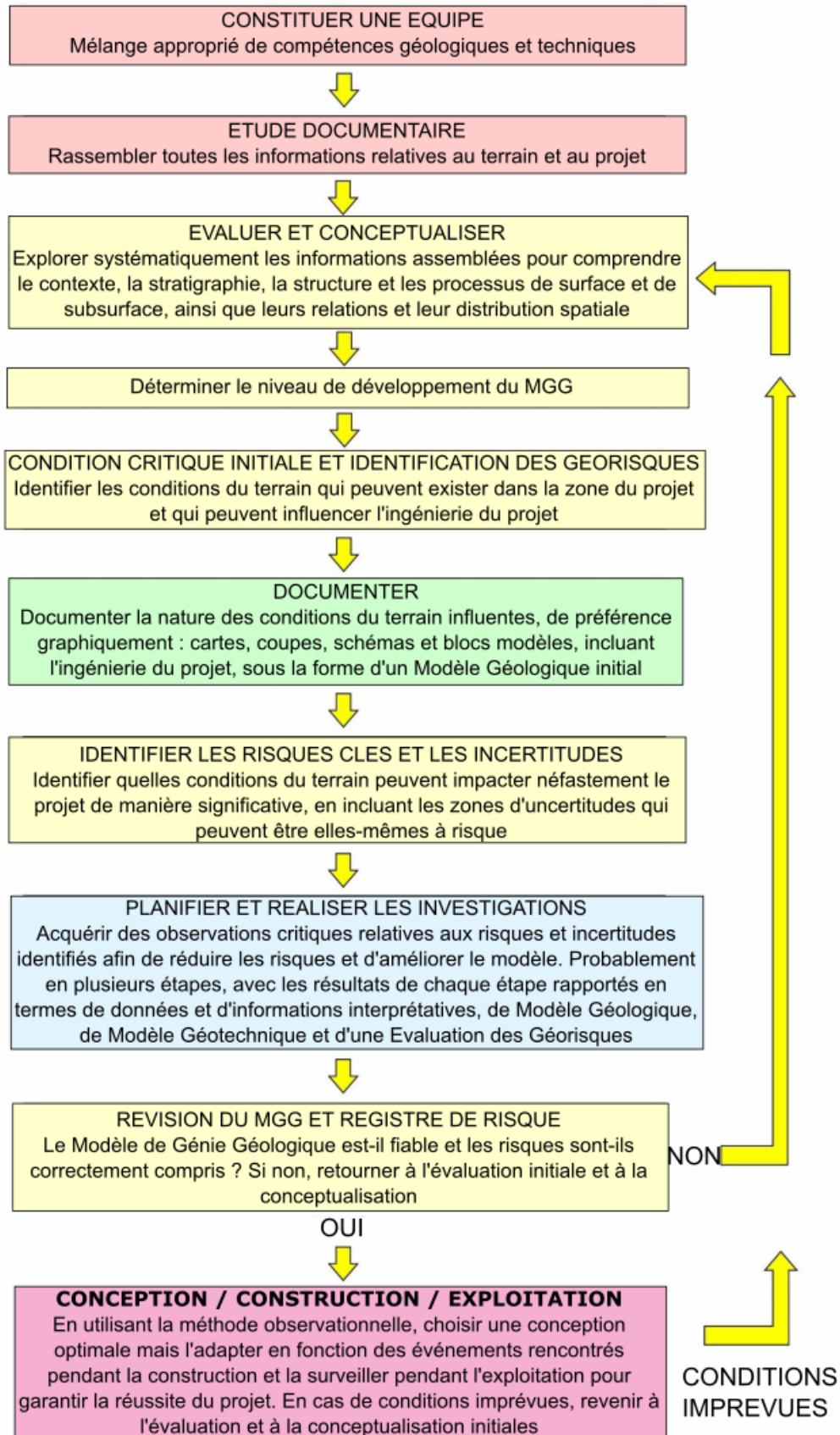


Figure 2-18 Composants du MGG et étude du site (d'après Baynes et al. 2021).

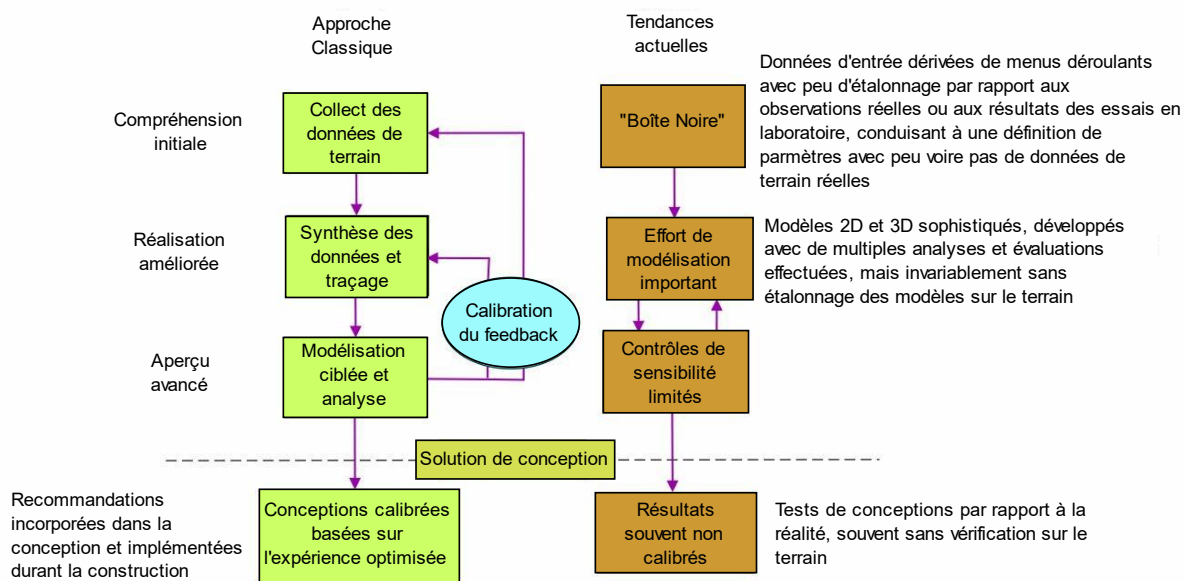


Figure 2-19 Comparaison de l'approche classique et des pratiques de conception actuelles (d'après Carter 2015).

2.6.4 Le MGG dans la gestion de la construction

Lorsqu'un projet entre dans la phase de construction, les conditions du terrain exposé doivent être évaluées par rapport aux variations potentielles anticipées par le MGG. Faire une évaluation savoir si ces variations pourraient ou non avoir un impact potentiel sur la méthodologie de conception ou de construction, et si l'évaluation des risques géotechniques nécessite ou non une mise à jour.

Le MGG joue également un rôle durant la construction, lorsque la Méthode Observationnelle est adoptée. Proposée par Peck (1969), cette Méthode Observationnelle représente une méthodologie de conception et de construction distincte du modèle observationnel et comprend essentiellement les étapes suivantes :

- Tenir compte des implications techniques d'une gamme de conditions géologiques d'ingénierie qui peuvent être raisonnablement anticipées à partir du MGG.
- Concevoir pour les conditions géologiques d'ingénierie les plus probables, mais concevoir des conceptions adaptées à la gamme de conditions géologiques d'ingénierie possibles et s'assurer que le contrat permet de tels changements.
- Pendant la construction, si les conditions géologiques d'ingénierie observées diffèrent de celles prévues, les plans doivent être modifiés en conséquence. Cela nécessite une collaboration étroite entre les équipes de conception, les ingénieurs-géologues sur site et les ingénieurs de construction, afin de garantir que les différences entre les conditions observées et celles prévues par le MGG soient rapidement corrigées.

2.7 REFERENCES

AS1726. 2017. Australian Standard Geotechnical site investigations. Standards Australia, SAI Global, Sydney Australia, 75p.

Baynes, F. J., Fookes, P. G. & Kennedy, J. F. 2005. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 67-94. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0271-4>

Baynes, F. J., Parry, S., & Novotny, J., 2021. Engineering geological models, projects, and geotechnical risk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54. <http://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>.

Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 129 pp.

BIM Forum 2019. Level of Development (LOD) Specification 2019, Part I & Commentary for Building Information Models and Data. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>, Accessed 7 January 2020

Bock, H., Broch, E., Chartres, R., Gambin, M., Maertens, J., Maertens, L., Norbury, D., Pinto, P., Schubert, W. & Stille, H. 2004. The Joint European Working Group of the ISSMGE, ISRM and IAEG for the Definition of Professional Tasks, Responsibilities and Co-operation in Ground Engineering. In: Hack, R., Azzam, R. & Charlier, R. (eds), *Engineering geology for infrastructure planning in Europe*. Lecture Notes in Earth Sciences 104, Springer, Berlin, Heidelberg, 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_1

Bond, C. E., Shipton, A. D., Gibbs, A. D. & Jones, S. 2008. Structural models: Optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6), 65-71. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2008006>

Carter, T. G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessment. In: *Proceedings of the 4th Italian Rock Mechanics Conference*, Torino, 1.1–1.22

Carter, T. G. 2015. On increasing reliance on numerical modelling and synthetic data in rock engineering. In: *Proceedings of the 13th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada. Paper 821, 17p. ISBN: 978-1-926872-25-4

Carter, T. G. & Marinos, V. 2020. Putting geological focus back into rock engineering design. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53(10): 4487–4508. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02177-1>

Carter, T. G. & Barnett, W. P. 2021. Improving reliability of structural domaining for engineering projects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28p. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02544-6>
Print ISSN: 0723-2632 Electronic ISSN: 1434-453X

Dematteis, A. & Soldo, L. 2015. The geological and geotechnical design model in tunnel design: estimation of its reliability through the R-Index. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1104547> .

Davis, J. 2017. Crossrail's experience of Geotechnical Baseline Reports (GBRs). *Crossrail Project: Infrastructure design and construction*, 4, Published Online: August 21, 2017, © Thomas Telford Limited and Crossrail, <https://doi.org/10.1680/cpid.63594.323>

- Dearman, W. R., Baynes, F. J. & Irfan, T. Y. 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, 354-374. <https://doi.org/10.1007/BF02635355>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. 2015. *Geotechnical engineering of dams*. London, CRC Press. ISBN 9781138749344 <https://doi.org/10.1201/b17800>
- FIDIC. 2019. *Conditions of contract for underground works*. Geneva, Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN 9782884320870
- Fookes, P. G. 1997. *Geology for engineers: the geological model, prediction and performance*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30(4): 293–424, <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>,
- Fookes, P. G., Baynes, F. J. & Hutchinson, J. N. 2000. Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. Invited Paper, *Proceedings of GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, 19 – 24 November, Melbourne, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania USA, 370–460.
- Fookes, P. G., Pettifer, G. & Waltham, T. 2015. *Geomodels in engineering geology – an introduction*. Dunbeath, UK, Whittles. 208 pp ISBN978-184995-139-5
- Giles, P. G., Griffiths, J. S., Evans, D. J. A. & Murton, J. B. 2017. Geomorphological framework: glacial and periglacial sediments, structures and landforms. In: Griffiths, J. S. & Martin, C. J. (eds.) *Engineering Geology of Glaciated and Periglaciated Terrains*. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 28, 59-368. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.3>
- Griffiths, J. S., 2019. Advances in engineering geology in the UK 1950-2018. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 52, 401-413. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-171>
- Haile, A. 2004. A reporting framework for geotechnical classification of mining projects. *AussIMM Bulletin*, September/October 2004: 30-37.
- Hoek, E. & Brown, E. T. 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(3), June 2019, 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Kessler, H., Wood, B., Morin, G., Gakis, A., McArdle, G., Dabson, O., Fitzgerald, R. & Dearden, R. 2015. Building Information Modelling (BIM) – a route for geological models to have real world impact. In: MacCormack, K., Thorleifson, H., Berg, R. & Russell, H. (eds). *Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts*. Geological Society of America Annual Meeting, Baltimore, Maryland, October 31, 2015; Alberta Energy Regulator, AER/AGS Special Report 101, 13–18.
- Knill, J. L. 2003. Core values: the First Hans Cloos Lecture. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 1–34, <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0187-9>
- Moon, A. T., Wilson, R. A. & Flentje, P. N. 2005. Developing and using landslide frequency models. In: Hungr, H., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (eds), *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver. A. A. Balkema, Lieden. 681-690.
- Morgenstern, N. R. & Cruden, D. M. 1977. Description and classification of geotechnical complexities: *International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations*. Italian Geotechnical Society, 2, 195–204.

- Norbury, D. 2020. Ground models; a brief overview. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-018>
- Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., Novotny, J. & Paul, D. 2014. Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0576-x>
- Paul, D. R. 2018. A simple method of estimating ground model reliability for linear infrastructure projects. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 – Volume 2, Shakoor, A. & Cato, K. (eds.) https://doi.org/10.1007/978-3-319-93127-2_2
- Peck, R. B. 1969. Ninth Rankine Lecture: advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19, 171 – 187.
- Perello, P., Venturini, G., Dematteis, A., Bianchi, G., Delle Piane, L. & Damiano, A. 2005. Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures the method of the R-Index. *Geoline 2005*. Lyon (FR). 1–8.
- Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990. *Analysis of geological structures*, University Press, Cambridge, UK.
- Shilston, D. T., Teeuw, R. M., West, G. & Engineering Group Working Party. 2012. Desk study, remote sensing, geographical information systems and field evaluation. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication*, 25, 159–200. <https://doi.org/10.1144/EGSP25.06>
- Ting, C., Gilson, G. & Black, M. 2020. Developing the 3D geological model for Crossrail 2, London, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-029>
- Turner, A. K., Kessler, H. & van der Meulen, M. J. (eds). 2021. *Applied multidimensional geological modelling: informing sustainable human interactions with the shallow subsurface*. London, Wiley, 450p, ISBN: 978-1-119-16312-1
- Vanmarcke, E. H. 1984. *Random fields, analysis and synthesis*. Cambridge (USA): MIT Press.
- Venturini, G., Bianchi, G. W. & Diederichs, M. 2019. How to quantify the reliability of a geological and geotechnical reference model in underground projects. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*. 525-537.
- Vessia, G., Di Curzio, D. & Castrignanò, A. 2020. Modeling 3D soil lithotypes variability through geostatistical data fusion of CPT parameters. *Science of The Total Environment*, Volume 6981, Article 134340.
- Zaruba, Q. & Mencl, V. 1954. *Engineering geology*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 428p. (in Czech)

APPENDIX A – CONTRIBUTEURS

Rôle	Personnes		Pays
Lead Author	Fred	Baynes	Australia
Lead Author	Steve	Parry	United Kingdom
Lead Editor	Martin	Culshaw	United Kingdom
Lead Editor	Jim	Griffiths	United Kingdom
IAEG Editors	Yogendra	Deva	India
IAEG Editors	Antonio	Dematteis	Italy
IAEG Editors	Erik	Wunder	Brazil
IAEG Editors	Jorge	Bejeman	Argentina
IAEG Editors	Jia-Jyun	Dong	Taiwan
IAEG Editors	Bill	Haneberg	USA
IAEG Editors	Doug	Stead	Canada
IAEG Editors	Ann	Williams	New Zealand
IAEG Editors	Anthony	Bowden	Australia
Contributors	Fred	Baynes	Australia
	Richard	Brehaut	Australia
	Roberto	Cravero	Argentina
	Martin	Culshaw	UK
	Dafydd	Chandler	UK
	Antonio	Dematteis	Italy
	Yogendra	Deva	India
	Jia-Jyun	Dong	Taiwan
	Mark	Eggers	Australia
	Peter	Fair	UK
	Robin	Fell	Australia
	Phil	Flentje	Australia
	Martin	Griffin	UK
	Andrew	Forsythe	Singapore
	Jim	Griffiths	UK
	Nizam	Hasan	Malaysia
	Chris	Jack	UK
	Graeme	Jardine	Australia
	Stratis	Karantanellis	Greece
	Aliki	Kokkala	Greece
	Teemu	Lindqvist	Finland
	Robert	MacKean	UK
	Vassilis	Marinos	Greece
	Stuart	Millis	Hong Kong
	Tim	Nash	Australia
	Judith	Nathanail	UK
	Paul	Nathanail	UK
	Simon	Nelis	New Zealand
Jan	Novotny	Czech Republic	
Steve	Parry	UK	
Darren	Paul	Australia	



	Alistair	Schofield	Australia
	David	Shilston	UK
	Ian	Shipway	Australia
	Keith	Turner	USA
	David	Waring	UK
	Felicia	Weir	Australia
	Ann	Williams	New Zealand
	Eric	Wunder	Brazil
BECA provided a specific contribution to Section 3	Ann	Williams	New Zealand
	Joe	Cant	New Zealand
	David	Dobson	New Zealand
	Christoph	Kraus	New Zealand
	Alicia	Newton	New Zealand
IAEG C28 provided a specific contribution to Section 4	Antonio	Dematteis	Italy
	Wayne	Barnett	Canada
	Trevor	Carter	Canada
	Diego	Dicurzio	Italy
	Giovanna	Vessia	Italy