



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

GT1.5 Données Géotechniques

Proposition de standard openBIM

Auteurs / Organismes

Mickaël Beaufile (BRGM)
Isabelle Halfon (BRGM)
Pierre Garnier (COLAS)
Jean Cochard (ANDRA)
Pierre Miraillet (EDF)

Norane Hassan (SETEC ALS)
Gilles Chapron (SETEC TERRASOL)
Alexis Serieys (SETEC TERRASOL)
Clément Galandrin (CAN)
Sylvie Bretelle (GEOS)

Relecteur / Organisme

François ROBIDA
Florent ROBERT (CETU)

Thème de rattachement : Structuration des données

MINnDs2_GT1.5_donnees_geotechniques_standard_openbim_018_2022

LC/21/MINNDS2/085-086-087-088-089-090-091-092-093

Septembre 2022

Site internet : www.minnd.fr

Président : François ROBIDA Chefs de Projet : Pierre BENNING / Vincent KELLER

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

1. RÉSUMÉ / ABSTRACT	2
2. INTRODUCTION À MINND GTI-5	4
2.1 Les membres du groupe.....	4
2.2 Les relations avec les autres groupes	7
2.3 Les objectifs du groupe.....	8
3. PROPOSITION GÉNÉRALE	10
3.1 La géotechnique et ses besoins dans le BIM	10
3.2 L'expression du savoir géotechnique	12
3.3 Les étapes de la connaissance géotechnique au cours d'un projet (notions de cahiers A, B et C).....	13
3.4 Le traçage de la provenance des données	15
3.5 Notion de représentations multiples	17
3.6 Représentation de l'incertitude en géotechnique	18
4. PROPOSITION DÉTAILLÉE.....	20
4.1 Identification des objets	20
4.2 Supports d'observations (Cahier A)	23
4.3 Objets interprétés (Cahier B).....	24
4.4 Objets du projet (Cahier C)	27
4.5 Propriétés des objets	28
5. EXPLOITATION ET VALORISATION DES RÉSULTATS	36
5.1 Diffusion interopérable des vocabulaires	36
5.2 Contributions aux projets de standardisation internationaux	37
5.3 Communications du groupe.....	37
6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	39
6.1 Un projet fédérateur et une influence internationale.....	39
6.2 La question du partage des données géotechniques	39
7. ANNEXES.....	41
7.1 Annexe 1- Fichier de travail Pro3	41
7.2 Annexe 2 - Synthèse du travail d'identification des objets	41

I. RÉSUMÉ / ABSTRACT

Résumé

Ce rapport présente la démarche suivie et les résultats obtenus par le groupe MINnD GT1-5 en charge de l'étude et la proposition d'extension des capacités de l'OpenBIM pour gérer les spécificités de la géotechnique.

Situé à l'interface du génie civil et des géosciences, la géotechnique vise à étudier et comprendre la nature et le comportement mécanique du sol support d'un bâtiment ou d'une infrastructure. Son usage est critique pour la construction d'ouvrages d'art, en particulier souterrains, mais importante aussi pour la construction durable de bâtiments.

Après une étude des pratiques en vigueur (normes, guides, expérience), et des solutions existantes (modèles de données et formats standards) en France et à l'international, le groupe a proposé une modélisation conceptuelle de données visant à exprimer et partager ce savoir géotechnique. Cette modélisation s'appuie notamment sur la décomposition en trois cahiers proposée par le GT32 de l'AFTES : Cahier A pour les données factuelles, Cahier B pour les données modélisées ou interprétées et Cahier C pour le Mémoire de Synthèse.

Techniquement, le modèle introduit des concepts ou objets auxquels peuvent être associés des attributs, notamment des représentations. La proposition vient étendre et compléter des modèles de données existants de buildingSMART International (bSI) et de l'Open Geospatial Consortium (OGC). La sémantique proposée concerne également les valeurs possibles pour décrire ces attributs, en particulier l'identification des propriétés et méthodes.

Les travaux de MINnD GT1-5 ont été présentés dans des organismes de référence en géotechnique (ex : CFMS, WTC...) et du BIM (ex : InfraBIMOpen, BIM World, bSI Summit, OGC...). Ils sont le socle des propositions de bSI et de l'OGC en matière de standards OpenBIM et OpenGIS pour la géotechnique, soutenues par le TC222 de l'International Society for Soil Mechanics and Geotechnica Engineering (ISSMGE).

Abstract

This document presents the approach followed and the results obtained by the MINnD GT1-5 group in charge of the study and the proposal to extend the capacities of OpenBIM to manage the specificities of geotechnics.

Located at the interface of civil engineering and geosciences, geotechnics aims to study and understand the nature and mechanical behavior of the ground supporting a building or infrastructure. Its use is critical for the construction of engineering structures, particularly underground infrastructures, but is also important for the sustainable construction of buildings.

After a study of current practices (standards, guides, experience) and existing solutions (data models and standard formats) in France and abroad, the group proposed a conceptual data modeling aimed at expressing and sharing this geotechnical knowledge. This modeling is based on the split into three notebooks proposed by the AFTES GT32: Book A for the factual data, Book B for the modeled or interpreted data and Book C for the Summary Report.

Technically, the model introduces concepts or objects to which attributes, notably representations, can be associated. The proposal extends and complements existing data models from buildingSMART International (bSI) and the Open Geospatial Consortium (OGC). The proposed semantics also concerns the possible values to describe these attributes, in particular the identification of properties and methods.

The work of MINnD GT1-5 has been presented in reference organizations in geotechnics (eg: CFMS, WTC...) and BIM (eg: InfraBIMOpen, BIM World, bSI Summit, OGC...). They are the basis of the bSI and OGC proposals for OpenBIM and OpenGIS standards for geotechnics, supported by the International Society for Soil Mechanics and Geotechnica Engineering (ISSMGE) TC222.

**Mots clés principaux
(Fra)**

MINnD ; Recherche ; Construction ; Infrastructures ; BIM ; Maquette numérique ;

**Mots clés spécifiques
au livrable (Fra)**

Géotechnique ; openBIM ; standard ;

**Main key words
(Eng)**

MINnD; Research; Construction; Infrastructure; BIM; Digital model;

**Deliverable key words
(Eng)**

Geotechnics; openBIM; standard;

2. INTRODUCTION À MINND GTI-5

2.1 Les membres du groupe

Curriculum

ANDRA



Les membres du groupe GT1-5 sont principalement des géotechniciens et des géologues / géotechniciens. Par leurs diverses expériences académiques, universitaires et professionnelles, le groupe représente une pratique relativement étendue de la géotechnique et de l'ingénierie géotechnique en France (entreprises, bureaux d'études, etc.), mais également, dans une certaine mesure, à l'international, et notamment dans les pays anglo-saxons (Royaume-Uni, Nouvelle-Zélande, Canada, etc.). Le groupe comporte aussi des experts en interopérabilité des systèmes d'information.

L'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs) est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits en France. Sa mission principale est de trouver et développer des solutions sûres pour garantir la protection de l'homme et de l'environnement face à la radioactivité des déchets sur le long terme. Cigéo (Centre Industriel de stockage Géologique) est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs. Il est conçu pour stocker les déchets hautement radioactifs et à durée de vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles, jusqu'à leur démantèlement, et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires. Au sein du groupe GT1-5, l'Andra est représentée par :

- Jean COCHARD, Ingénieur géologue & modélisation ;
- Béatrice YVEN, Ingénieur géologue & modélisation ;
- Laurent TRENTY, Responsable de la coordination des travaux scientifiques et technologiques.

BRGM



Le BRGM est l'établissement public de référence en France dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Son action est orientée vers la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques et la coopération internationale. Parmi ses missions, le BRGM a la charge de produire et diffuser les données pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources. Dans un contexte de production plus importante de données géoscientifiques, le BRGM développe des outils numériques permettant de produire une géologie prédictive et d'améliorer la diffusion de la connaissance auprès du public. Au sein du groupe GT1-5, le BRGM est représenté par :

- Mickaël BEAUFILS, Data Architect, à la Direction du Numérique pour les Géosciences, et pilote du groupe de travail GT1-5 ;
- Isabelle HALFON, Ingénieure experte en géotechnique, à la Direction Risques et Prévention.

CAN



Filiale du GROUPE CAN, la société CAN créée en 1977 est spécialisée dans les travaux d'accès difficiles et spéciaux, acteur majeur dans le domaine des travaux sur cordes. CAN accompagne ses clients dans la conception, la réalisation, l'exploitation et la maintenance de solutions de protection de leur patrimoine vis-à-vis des risques naturels gravitaires (chutes de blocs rocheux, glissements de terrain, avalanches...). L'entreprise, dont le siège est basé à Mirmande (France, 26) comprend 180 salarié(e)s réparti(e)s dans différentes Agences en Métropole et dans les DROM. Le Groupe CAN (450 personnes) est présent à l'international (Algérie, Brésil, Luxembourg, Norvège). Le service Innovation développe depuis toujours des ouvrages de protection contre les risques naturels gravitaires et travaille depuis quelques années au développement de nouveaux processus numériques

CETU



au sein des activités du Groupe : numérisation, modélisations des terrains et des ouvrages, implémentation des processus BIM. CAN est membre des Clusters Montagne & Indura.

Partie prenante de MINnD GT1-5, l'entreprise est représentée par :

- Clément GALANDRIN, Responsable Innovation, Ingénieur en géotechnique et risques naturels.

Le CETU, Centre d'Études des Tunnels, est un service technique central du ministère en charge des transports. Rattaché au Directeur Général des Infrastructures, des Transports et des Mobilités, il intervient, sur l'ensemble des aspects relatifs aux tunnels, depuis la conception jusqu'à l'exploitation, la sécurité et la gestion du patrimoine, tant sur le plan des équipements qu'en matière de génie civil, en intégrant les enjeux du développement durable.

Il apporte aux décideurs une expertise scientifique et technique éclairée en capitalisant et développant la connaissance par des actions de recherche, des missions d'ingénierie, la production de référentiels et la formation des acteurs, en relation avec de nombreux organismes français et étrangers.

- Florent ROBERT, Responsable du pôle Procédés de Construction, Marchés et Exécution

COLAS



Leader mondial dans la construction, l'entretien et la maintenance des infrastructures de transports, COLAS dispose d'un service géotechnique transverse, qui pilote les bureaux d'ingénierie sur les grands projets, et participe au dimensionnement et au suivi des chantiers. Associée à l'équipe en charge du développement du BIM chez COLAS, l'équipe géotechnique est active dans les thématiques de gestion, structuration et partage de la donnée géotechnique, en interne comme au sein du MINnD GT1-5, où elle est représentée par :

- Elodie VAUTHERIN, Géologue géotechnicienne, chargée d'affaire au service commercial de COLAS Projects ;
- Pierre GARNIER, Responsable géotechnique au sein de la Direction Technique du territoire Ouest de COLAS France.

EDF



Électricité de France (EDF) est un des premiers électriciens mondiaux, et le premier producteur et fournisseur d'électricité en France et en Europe.

Au sein de la Direction Industrielle d'EDF, le département de TEGG est l'entité de référence du groupe dans le domaine des Géosciences et des Matériaux de Génie Civil, pour le service des projets neufs et pour l'ensemble des parcs de production (nucléaire, hydraulique, thermique), en France comme à l'étranger. EDF est représentée au sein du groupe MINnD GT1-5 par :

- Pierre MIRAILLET, Ingénieur Géotechnicien Expert.

EGIS



Egis est un acteur international actif dans les secteurs du conseil, de l'ingénierie de la construction et des services à la mobilité. Egis conçoit et exploite des infrastructures et des bâtiments intelligents capables de répondre à l'urgence climatique et de contribuer à un développement territorial plus équilibré, durable et résilient. Présent dans 120 pays, Egis met l'expertise de ses 16 000 collaborateurs au service de ses clients et développe une innovation de pointe accessible à tous les projets. Par ses domaines d'activité très variés, Egis est un acteur central de l'organisation collective de la société et du cadre de vie des citoyens partout dans le monde.

L'activité Grand Ouvrage, Eau, Environnement et Énergie (GO3E) d'EGIS propose une approche globale et multidisciplinaire des projets d'infrastructure allant des études et exigences géologiques et géotechniques jusqu'à la conception et l'ingénierie, l'approvisionnement et la construction de ponts, tunnels et barrages. Egis

GEOLITHE



est un acteur du projet MINnD GT1-5 depuis son démarrage par la participation de Bastien Le Hello. Bastien Le Hello participe également au groupe GT45 de l'Aftes ce qui permet le lien et la cohérence entre ces différents projets

- Bastien LE HELLO, Ingénieur géotechnicien, chef de projet, BIM Manager pour EGIS SE (BU GO3E d'EGIS).

Le groupe Géolithe œuvre pour la gestion des risques naturels, la préservation des territoires et leur aménagement responsable.

Pour répondre aux besoins d'expertises et de managements des projets de nos clients, dans les domaines du génie civil et des risques naturels gravitaires, GEOLITHE Ingénieurs Conseils met à disposition les compétences en géologie, géotechnique, géophysique, hydrogéologie, hydrologie de plus de 130 collaborateurs répartis sur une dizaine d'agences couvrant le territoire national.

Pour répondre aux évolutions des besoins de nos client, Géolithe Innov développe des produits et services innovants. Par exemple, la plateforme numérique RIM-Nat propose une solution de gestion collaborative des risques naturels par la diffusion et l'exploitation de données 4D BIM & SIG sur le web. Ces innovations sont issues de collaborations étroites entre nos équipes de chercheurs et d'ingénieurs avec des laboratoires de recherche universitaire dans le cadre de différents projets R&D collaboratifs.

GEOLITHE est représentée au sein du groupe MINnD GT1-5 par :

- Julien LORENTZ, Ingénieur docteur en géosciences

GEOS



Geos Ingénieurs Conseils, société fondée en 1976, est un bureau d'ingénieurs conseils spécialisés en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement, filiale d'Ingérop. Geos a développé son activité selon deux axes principaux qui sont :

1 - l'ingénierie des ouvrages et des travaux du génie civil, du bâtiment et dans le domaine de l'environnement et 2 - le développement de logiciels spécialisés dans le domaine de la géotechnique.

Au sein de MINnD GT1-5, GEOS a été représenté par :

- Sylvie BRETTELLE, Directrice scientifique ;
- Pierre RATIER, Dessinateur.



Ginger CEBTP, filiale de la branche construction du groupe Ginger, est leader de l'ingénierie des sols et de l'ingénierie des matériaux en France. Ginger CEBTP est un acteur incontournable du BTP et de la construction. Bureau d'études spécialisé dans les études des sols, des matériaux issus de la construction, des ouvrages existants, des routes et des risques naturels, il intervient dans toute la France et à l'étranger à travers ses différentes agences. Pour sa participation au groupe MINnD GT1-5, Ginger est représenté par :

- Michel KHATIB, Directeur Technique et Innovation ;
- Guillaume MALINGE, Chef de projet, observateur pour la Direction Technique et Innovation.

SETEC TERRASOL



Bureau d'études reconnu dans le domaine de la géotechnique en France et à l'international et qui s'appuie sur un savoir-faire technique spécifique développé depuis près de 40 ans. Setec Terrasol commercialise notamment un certain nombre de logiciel métier de référence (TALREN : stabilité des pentes, FOXTA : fondations superficielles et profondes, KREA : calculs d'écrans aux coefficients de réaction). La société est également fortement impliquée dans des activités de formations techniques ayant trait au dimensionnement d'ouvrages géotechniques. Pour sa participation au groupe MINnD GT1-5, Terrasol est représentée par :

SETEC ALS

 setec
als

- Gilles CHAPRON, Ingénieur Géotechnicien, Responsable d'équipe et directeur des projets data ;
- Alexis SERIEYS, Ingénieur Géologue Géotechnicien, chargé d'études

Filiale du groupe Setec, Setec ALS (Aménagement Linéaires et Structures) est un acteur majeur, en France comme à l'international, de l'ingénierie des infrastructures de transport et du génie civil. La société est constituée de plusieurs départements techniques intégrés, dont le département Géotechnique - Terrassement - Chaussée et le département BIM, activement impliqués dans le développement en interne de nombreux outils innovants, favorisant l'interopérabilité du BIM pour les projets d'infrastructures. Setec ALS est représentée au sein du groupe MINnD GT1-5 par :

- Denis LEROUX, Expert BIM en infrastructures linéaires, BIM Manager ;
- Norane HASSAN, Ingénieur Géologue Géotechnicienne, chargée d'études.

2.2 Les relations avec les autres groupes

Au sein de MINnD

Lien sur la standardisation

Le projet MINnD dans sa Saison 2 aborde de nombreux sujets pouvant être connectés de près ou de la loin à la géotechnique et aux ambitions du GT1-5 de proposer des standards pour la géotechnique :

- MINnD GT1-3 : groupe traitant des ponts ;
- MINnD GT1-4 : groupe traitant des tunnels et infrastructures souterraines ;
- MINnD GT1-6 : groupe traitant des terrassements ;

Lien sur les sujets

Une cellule de coordination avait notamment été proposée par MINnD afin d'aborder la question de la nécessaire complémentarité des travaux de ces groupes.

Tous les autres groupes MINnD pourraient être cités, mais ici sont mis en valeur ceux avec lesquels les interactions sont les plus évidentes :

- MINnD GT2-2 : groupe traitant du sujet de la gestion des incertitudes et de leur représentation ;
- MINnD GT3-2 : groupe traitant du sujet de la continuité BIM-GIS.

Dans le domaine de la géotechnique

CFMS

Le groupe de travail MINnD GT1-5 est constitué de membres influents d'associations Françaises ou Internationales ; une communication régulière avec ces associations permet la mise en valeur des activités de MINnD GT1-5.

Une description succincte de ces associations et leurs liens est rappelée ci-dessous :

Le CFMS a pour objet de promouvoir et de mettre à la disposition de la profession les recherches et études de Génie Civil ayant trait au sol, au sens large, et à toutes les activités s'y rapportant. Le CFMS est un lieu de rencontres et d'échanges entre les divers acteurs de la profession : maîtres d'ouvrage, laboratoires publics, organismes universitaires, entreprises de Travaux Publics, bureaux et laboratoires privés, ingénieurs-conseils et experts, maîtres d'œuvre et bureaux de contrôle. Fondé en 1948, le CFMS est affilié à la Société Internationale de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (SIMSG).

ISSMGE

L'objectif de l'ISSMGE est la promotion de la coopération internationale entre ingénieurs et scientifiques pour l'avancement et la diffusion des connaissances dans le domaine de la géotechnique et de ses applications en ingénierie et en environnement.

CFGJ

Le Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (CFGJ), est une association qui a pour objet de promouvoir les études intéressantes directement ou

indirectement la géologie de l'ingénieur et de l'environnement et d'en diffuser les résultats. Le CFGI est la branche française de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (AIGI), elle-même membre de l'Union internationale des sciences géologiques (IUGS) et de la Federation of International Geo-engineering Societies (FedGIS).

AFTES

L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), a pour objet de rassembler et mobiliser tous les acteurs de la profession, investisseurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études et de contrôle, centres de recherche et de formation, entrepreneurs, consultants, architectes, urbanistes, équipementiers, enseignants, etc...

Le GT 45 de l'AFTES a été créé en 2019 afin de sensibiliser les acteurs de la profession des travaux souterrains aux enjeux de la démarche BIM qui tend à se généraliser dans les projets d'infrastructures. L'animation de ce groupe de travail a été confié à Florent Robert (CETU) et Nataliya Dias (ANDRA).

Et bien d'autres

La liste des organismes cités précédemment se veut non-exhaustive et ne saurait représenter l'ensemble des groupes et organisations concernés.

2.3 Les objectifs du groupe

Standard géotechnique pour le BIM

L'avènement du BIM dans le domaine de la construction vient soutenir voire accélérer la transition numérique dans le monde du BTP.

Les échanges ne sont plus seulement pensés pour une lecture / interprétation uniquement par l'homme mais aussi pour la machine afin de faciliter leur validation et leur exploitation.

Les groupes de travaux de MINnD tels que le GT1-5 ont pour vocation de définir les objets et les propriétés usités pour décrire le savoir géotechnique et permettre leur communication.

L'élicitation de ce savoir permettra ensuite de définir le contenu et les capacités attendus des futurs standards pour le BIM dédiés à la géotechnique.

En s'appuyant sur les pratiques courantes

Les membres du groupe de travail (et les organisations qu'ils représentent) se sont basés sur leur retour d'expérience de différents projets d'infrastructure, pour mener ce travail et aboutir à la structuration des données géotechniques, en vue de favoriser leur intégration au BIM et de répondre au besoin d'interopérabilité.

Parmi ces grands projets d'infrastructures qui disposent déjà d'une gestion de la donnée géotechnique voire également d'une approche BIM, on peut bien sûr citer le projet du Grand Paris Express, de la liaison ferroviaire Lyon Turin ou du projet CIGEO de l'ANDRA.

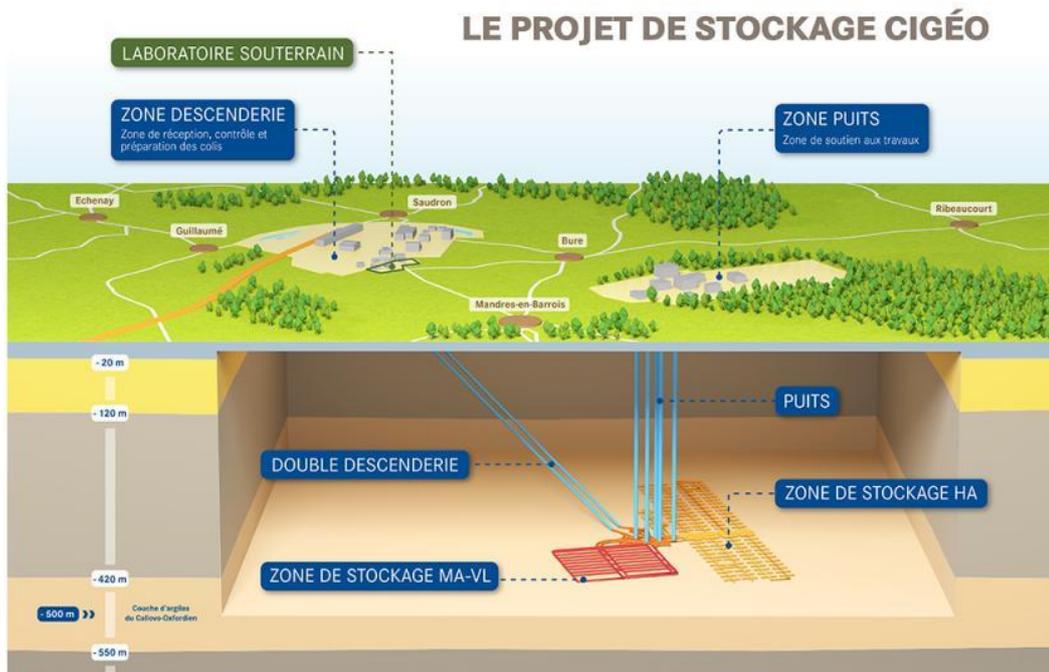


Fig 1. Schéma de principe du projet de stockage Cigéo (source : ANDRA)

En s'appuyant sur les standards existants

Cependant, à échelle plus réduite, de nombreux projets intègrent des démarches similaires, soit par la volonté des maîtres d'ouvrages, soit par initiative des différents acteurs (bureaux d'études et entreprises). On peut citer par exemple les projets de construction des bureaux du groupe Dassault, des plates-formes logistiques de la grande distribution, ou encore de la plate-forme de maintenance des Tramway de l'agglomération Nantaise.

La géotechnique se trouve à l'interface entre l'ingénierie civile et les géosciences et se doit de considérer les standards existants dans ces deux domaines.

- Les standards du BIM sont principalement représentés par les Industry Foundation Classes (IFC) développées et maintenues par buildingSmart International (bSI). Ces standards proposent un socle technique ainsi qu'une sémantique pour décrire les bâtiments, y compris leurs équipements. Les IFC 4.x ont par ailleurs introduit des extensions pour couvrir la description des infrastructures voire leur environnement quand celui-ci a une forte influence sur la construction (cas des ouvrages d'arts, ponts, tunnels, ...),
- Les standards des géosciences portés par divers organismes (on citera par exemple les travaux de l'IUGS), dont une mise en œuvre comparable aux IFC (couple solution informatique et sémantique) se retrouve au sein des standards de l'Open GeoSpatial Consortium (OGC).

La complémentarité des standards mentionnés précédemment a également été identifiée dans le rapport d'analyse des besoins d'IFC Tunnel.

3. PROPOSITION GÉNÉRALE

3.1 La géotechnique et ses besoins dans le BIM

Spécificités de la géotechnique

« Les sols naturels ne sont jamais uniformes, et leurs propriétés changent d'un endroit à un autre alors que notre connaissance à propos de leurs propriétés sont limitées à ces quelques points où ont été prélevés les échantillons ».

Karl von Terzaghi

L'ingénierie géotechnique présente des spécificités par rapport aux autres champs techniques couverts par le BIM. Ces spécificités, ainsi que l'état de l'art et les pratiques des intervenants ont fortement conditionné la proposition apportée par le groupe MINnD. Avant d'entrer dans le cœur du travail du groupe MINnD, ce chapitre a pour but d'introduire les spécificités de la démarche d'ingénierie géotechnique.

Cette citation de Karl von Terzaghi résume bien la difficulté globale des ingénieurs géotechniciens pour établir des conditions de terrain permettant de bâtir des structures sûres et durables. À travers les siècles, l'ingénierie géotechnique a développé des tests ou « essais » nombreux et variés pour étendre les connaissances sur la nature et le comportement des terrains naturels (sols et roches) et les corréliser avec des théories physiques compatibles avec des modèles mécaniques classiques.

L'étape de passage d'une mesure brute à un modèle géotechnique est un processus itératif, interprétatif et subjectif, qui est souvent réalisé de manière « déconnectée » des autres intervenants du projet, avec des outils de modélisation dédiés à la géologie ou la géotechnique. Les modèles géotechniques obtenus sont difficilement intégrables aux maquettes numériques des infrastructures, et lorsqu'ils le sont, c'est souvent de façon partielle et sans flexibilité vis-à-vis de l'apport de nouvelles données. Ainsi, les modèles obtenus, tout comme les données géotechniques qui les constituent, sont souvent oubliés après la réalisation du projet.

C'est pourquoi la modélisation BIM et le jumeau numérique offrent une opportunité unique de définir des standards pour l'échange de données, permettant d'obtenir un outil commun, évolutif et durable à l'échelle d'un projet géotechnique.

La démarche de l'ingénierie géotechnique

Comme expliqué précédemment, les terrains naturels que sont les sols et les roches sont des milieux complexes et difficiles à appréhender étant donné leur nature hétérogène, discontinue et non linéaire. Or, l'objectif final de l'ingénieur géotechnicien est de déterminer un dimensionnement sûr pour les ouvrages qu'il étudie.

Pour ce faire, la démarche générale du géotechnicien consiste à abstraire ces matériaux naturels par un modèle physique, consistant à approximer le comportement mécanique du milieu naturel par des relations mathématiques faisant intervenir divers paramètres et issues de l'état de l'art du domaine technique. Chaque modèle physique est applicable dans un certain domaine de validité, et l'appartenance du cas étudié au domaine de validité du modèle est jugée par le géotechnicien à partir d'hypothèses formulées sur la base :

- Des données géotechniques disponibles sur les terrains naturels étudiés ;
- Des "Règles de l'art" du métier, données au travers de divers ouvrages de recommandations ou normatifs dont la validité peut varier sur un critère géographique ;
- De son expérience personnelle et de retours d'expériences dans des cas similaires qui lui sont connus, et c'est ici qu'une première part de "subjectivité" intervient dans le processus d'ingénierie géotechnique.

« Il convient de considérer que la connaissance des conditions de terrain dépend de l'importance et de la qualité des reconnaissances géotechniques. Cette connaissance et le contrôle de la qualité de réalisation des travaux sont plus importants pour satisfaire les exigences fondamentales que la précision des modèles de calculs et des coefficients partiels ». Eurocode 7

La géologie

Les hypothèses formulées et le modèle physique de comportement des terrains choisi, le géotechnicien doit le caractériser, c'est à dire déterminer les paramètres mathématiques de ce modèle physique, désignés « propriétés », « paramètres géotechniques » ou « paramètres géomécaniques », permettant de l'employer pour des calculs prédictifs (dimensionnement, stabilité, déformations, etc.).

La détermination de ces paramètres géotechniques s'appuie très généralement sur l'analyse de résultats d'essais géotechniques, mais peut aussi faire l'objet d'une méthodologie analytique (corrélations avec d'autres paramètres, calculs à rebours, études paramétriques), voire être déterminés à partir de l'expérience du géotechnicien dans ces terrains (dire d'expert). Quoiqu'il en soit, cette détermination des paramètres géotechniques est un deuxième point où, par l'hétérogénéité des terrains naturels, le géotechnicien est forcé de faire des choix soumis à une certaine subjectivité : choix du mode de détermination des valeurs des paramètres géotechniques, statuer sur la représentativité des résultats des essais disponibles, délimitations des horizons géotechniques identifiés, etc.

On notera ici, vis-à-vis de la connaissance des terrains naturels, la prédominance de la qualité des reconnaissances géotechniques sur la précision des modèles de calcul employés (dans leur domaine de validité), tel qu'exprimé dans l'Eurocode 7 EN 1997-1.2.4.1(2).

À partir de ce qui a été dit ci-dessus, et en appliquant cela à l'ensemble des natures de terrains d'une zone d'étude identifiées par le géotechnicien, on obtient ce qui est dénommé dans la pratique un "modèle géotechnique". L'extension géométrique de ce modèle géotechnique doit permettre de couvrir la « Zone d'Influence Géotechnique » (abréviation : ZIG) de chacun des ouvrages étudiés. Cette ZIG est définie dans la norme NF P 94-500 §3.3.21 comme la totalité du volume de terrain en interaction avec l'ouvrage auquel elle se rapporte. En pratique, c'est le géotechnicien qui doit délimiter la ZIG de l'ouvrage en fonction de ses interprétations et des règles de l'art.

Ainsi, dans le modèle géotechnique, la totalité du volume de terrain en interaction avec l'ouvrage étudié est découpé en ensembles ou unités (parfois dénommés "horizons géotechniques") partageant un même modèle physique de comportement et une même caractérisation (valeurs identiques des paramètres géotechniques de ce modèle). Ce découpage en plusieurs unités (horizons) géotechniques est communément appelé, parfois par abus de langage, "Stratigraphie".

Pour l'élaboration des modèles géotechniques utilisés pour les calculs de dimensionnement, la démarche d'ingénierie géotechnique s'appuie, outre les connaissances techniques qui lui sont propre, sur des domaines scientifiques et techniques connexes, à savoir :

L'étude géologique des terrains permet d'identifier les terrains partageant des propriétés communes et leur organisation spatiale. En supposant que des terrains de caractéristiques géologiques communes (lithologie, âge, etc) sont susceptibles de présenter des caractéristiques géotechniques communes (modèle de comportement, caractérisation), elle permet d'établir une base servant au découpage du volume de terrains en horizons composant le modèle géotechnique.

L'étude géologique, employée dans une optique géotechnique fait intervenir les domaines suivants :

- Identification des terrains (lithologie, âge, etc...) : qui consiste à identifier la nature des terrains en présence et leur rattachement à des formations géologiques connues et le plus souvent datées ;
- Géologie structurale : identification des relations entre les différentes formations géologiques, régissant leur organisation spatiale (structures plissées, blocs basculés, etc.)

L'hydrogéologie	<p>La présence d'eau dans les sols à un fort impact sur le comportement mécanique de ces derniers. De plus, l'eau présente dans les terrains peut exercer une action directe sur les ouvrages, voire sur les terrains dans lesquels elle s'écoule. Par ailleurs, les conditions hydrogéologiques du site peuvent avoir des impacts d'autre nature sur les projets, par exemple des dispositions environnementales visant à éviter la pollution des aquifères en présence par la réalisation des travaux.</p> <p>La connaissance hydrogéologique du site est un préalable fondamental à tout projet géotechnique. Elle est en général fortement conditionnée par la géologie du site.</p>
La géotechnique	<p>Un modèle géotechnique est établi dans un but précis : dimensionner les ouvrages géotechniques étudiés dans un projet. Son niveau de détail et de complexité dépend donc de la nature de l'ouvrage et des problématiques géotechniques rencontrées pendant et après la réalisation de cet ouvrage.</p> <p>Le nombre et les types de paramètres à déterminer peuvent varier en fonction du type d'ouvrage étudié, de même que le nombre et la finesse de découpage du volume de la ZIG en horizons géotechniques.</p> <p>La précision du modèle géotechnique dépend également de l'état d'avancement du projet, passant d'un modèle général simplifié en phase avant-projet à un modèle détaillé et localisé en phase de construction, pouvant même atteindre un niveau proche de la réalité après la construction (cas d'un tunnel qui peut être assimilé à un forage grand diamètre).</p>
Contexte réglementaire français	<p>La norme NF P 94-500 codifie les missions géotechniques en France. Au-delà de son application limitée au territoire français, cette norme établit des grands principes (Zone d'Influence Géotechnique, risques naturels, etc.) et l'ordonnancement des missions qui permet d'affiner le modèle géotechnique avec l'avancement du projet.</p>

3.2 L'expression du savoir géotechnique

Parler le même langage	<p>Les géosciences, et en particulier la géologie et la géotechnique, sont étudiées et documentées à l'aide d'une dialectique et un langage spécifique. Contrairement à la terminologie géologique qu'on peut considérer faire l'objet d'un consensus international globalement admis. L'encyclopédie géotechnique s'est étoffée à travers le temps, au gré des avancées de la recherche, des retours d'expérience, des nouvelles technologies et de la mondialisation numérique. Cette encyclopédie cherche à se structurer et à se standardiser, pour les besoins de la normalisation et des échanges, inter métiers et internationaux.</p>
Mutualisation et standardisation	<p>En ce sens, le BIM et la création des jumeaux numériques dans le domaine de la construction (et donc de la géotechnique) répond à tous ces enjeux de mutualisation et de standardisation.</p>
Évolution permanente	<p>En l'état, la géotechnique demeure une discipline vivante basée sur l'expérience, l'observation et la pratique, la théorie étant très largement alimentée par de nombreux ouvrages de références, guides et publications jugés consensuels, qui sont de plus en plus fréquemment repris, mis à jour, complétés voire remplacés par des textes normatifs.</p>
Choix des références	<p>Dans le cadre de son travail, le groupe GT1-5 s'est appuyé sur l'ensemble de ces documents utilisés par la profession, en utilisant autant que possible les dénominations issues des textes normatifs. Le groupe s'est également appuyé sur la terminologie courante des observations issues des visites de sites, sondages, etc.</p>
Références	<p>On pourra citer notamment les documents suivants utilisés dans le cadre du travail du groupe GT1-5 :</p>

ISO 14688 & 14689	Classification des sols & des roches et les termes généraux
Les Eurocodes 7 (NF EN 1997) et 8 (NF EN 1998)	Règles de calcul géotechnique et de calcul des structures au séisme, notamment pour les concepts et la Terminologie générale géotechnique
GTR (et la norme correspondante NF P 11-300, en cours de révision)	Identification et classification des sols, et définition des conditions de réemploi et mise en œuvre des matériaux en remblai et en couche de forme.
Guides techniques de la profession	Sur certains sujets (travaux souterrains, clouage, renforcement de sols, digues et barrages, etc.) il existe des documents non normatifs élaborés par des organisations professionnelles référentes (AFTES, CFMS, CFBR, etc.) fournissant des recommandations pratiques pour le dimensionnement et l'exécution.
Les normes ISO d'essais et mesures géotechniques, de la série de normes « Reconnaissance et essais géotechniques »	Ces normes décrivent les méthodes et procédures d'essais permettant la mesure des propriétés géotechniques (ISO 14688, ISO 14689, ISO 17892, ISO 22476). Ces normes ont été utilisées par le groupe de travail GT1-5 pour les définitions des propriétés géotechniques, les symboles et notations.
Normes de dimensionnement issues de l'application des Eurocodes	L'ensemble des normes de dimensionnement permet d'utiliser un langage commun, et notamment les Eurocodes et sa codification exhaustive des paramètres géotechniques. Cette application correspondant au cahier C permet également de faire le lien avec les autres domaines d'études (structures, bâtiment, génie civil, etc.).

Lexique complet

À terme, l'intégration de l'ensemble des caractères qui traduisent les valeurs des paramètres d'état, intrinsèques, mécaniques, et physico-chimiques des sols et des roches constituera un lexique numérique complet, en grande partie normatif, permettant de définir un sol, une roche, un contexte géologique et géotechnique, dans toute leur complexité. La finalité est d'obtenir un format d'échange numérique complet, commun et consensuel.

3.3 Les étapes de la connaissance géotechnique au cours d'un projet (notions de cahiers A, B et C)

Processus itératif

La connaissance géotechnique lors d'un projet est généralement le résultat d'un processus itératif constitué de phases d'acquisition de données (enquêtes documentaires, sondages, essais in situ et en laboratoire) suivies de phases d'analyse, d'interprétation puis de dimensionnement des ouvrages géotechniques.

Cadre normatif

Les missions d'ingénierie successives précédant ou accompagnant les phases d'acquisition de données sont décrites dans la norme NF P 94-500 « Mission d'ingénierie géotechnique ». Cette norme met bien en évidence l'amélioration de la connaissance géotechnique d'un site au cours d'un projet et son corollaire d'identification et diminution des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

Structuration des DCE

Dans le but de bien séparer les données factuelles issues des phases de reconnaissances, les documents d'analyse / interprétation et les documents de dimensionnement, l'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain), a institué initialement dans la recommandation GT32R1F1 de 2004 (puis dans la recommandation GT32R3F1 de 2016 qui abroge GT32R1F1), la structuration d'un Dossier de Consultation des Entreprises, autour de trois sous-dossiers successifs ou « cahiers », utilisant les résultats du précédent :

Cahiers du GT32	
Cahier A	Recueil des données factuelles : c'est une compilation non contractuelle de données et de résultats spécifiques au projet. Il est lui-même subdivisé en trois sous-cahiers : <ul style="list-style-type: none"> • A1 – Données d'entrée géotechniques, • A2 – Données d'entrée constructions avoisinantes, • A3 – Données d'entrée environnement naturel et humain.
Cahier B	Mémoire de synthèse géotechnique : ce document contractuel donne l'interprétation du Maître d'œuvre sur l'ensemble des données du cahier A. Il est également subdivisé en trois sous-cahiers : <ul style="list-style-type: none"> • B1 – Mémoire de synthèse géotechnique, • B2 – Mémoire de sensibilité des constructions avoisinantes, • B3 – Commentaires sur les contraintes environnementales.
Cahier C	Mémoire de conception : ce document explicatif et non contractuel, expose et justifie la conception des ouvrages de génie civil, les méthodes d'exécution, le dimensionnement des ouvrages.

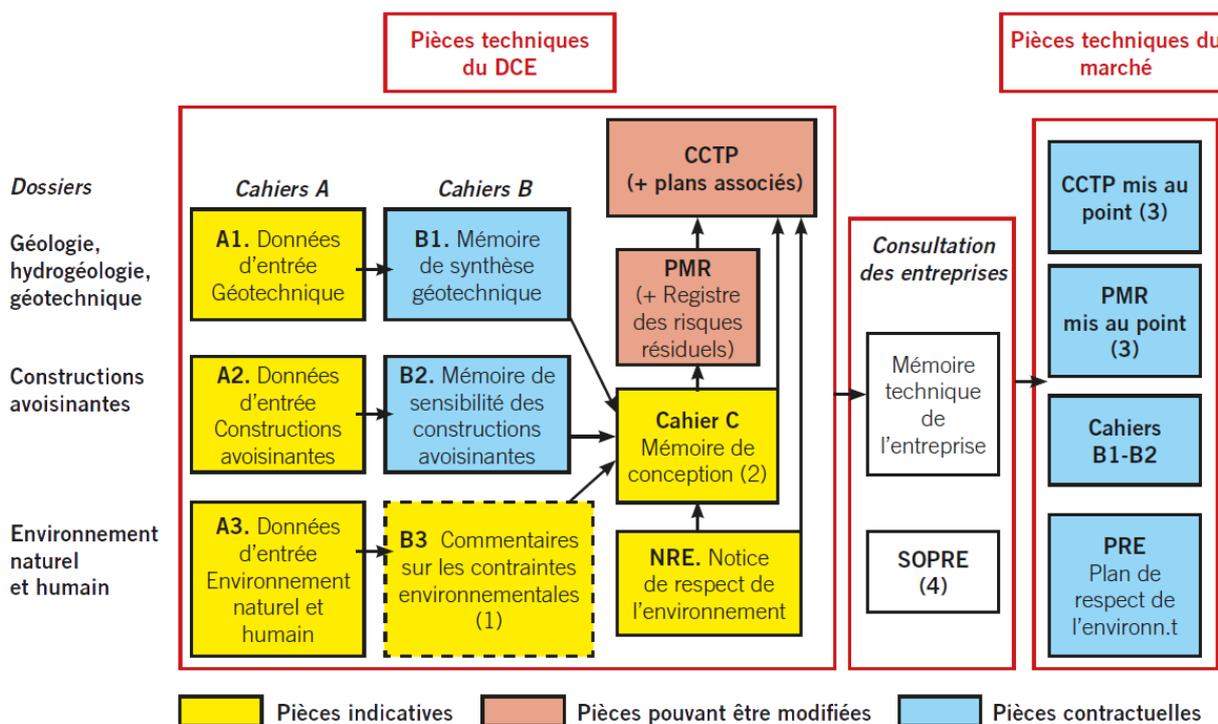


Fig 2. Articulation des pièces techniques du DCE, avec notamment la place des cahiers A, B et C (extrait recommandation AFTEs GT32R3F1, 2016)

Transposition à tous les ouvrages géotechniques

Cette structuration de documents, utilisée pour les travaux souterrains, est en fait applicable à tout type d'ouvrages géotechniques. Elle peut par ailleurs être totalement transposée aux principaux cas d'usage des utilisateurs des données géotechniques numériques au cours d'un projet :

- Recueil des données géotechniques et dépôt dans le cahier A par le titulaire du marché de reconnaissance ;
- Interprétation/analyse, établissement du modèle géotechnique dans le cahier B, par le bureau d'étude géotechnique ou maître d'œuvre, assorti d'un registre des incertitudes ;

	<ul style="list-style-type: none"> • Conception, dimensionnement, phasage des ouvrages de génie civil, plans guide et notes de calcul dans le cahier C, par le maître d'œuvre de conception, assorti d'un registre des risques qui résultent du croisement des incertitudes et des techniques de construction envisagées.
Structuration retenue	Il a donc été décidé au sein du groupe de travail GT1-5, une structuration des modèles BIM géotechniques selon trois groupes d'objets calquée sur ces trois ensembles de documents :
Données factuelles	<ul style="list-style-type: none"> • Les données factuelles acquises au cours des phases de reconnaissances seront rassemblées dans le groupe d'objets « cahier A ». Il s'agira principalement des objets « sondages », « échantillons » et autres supports d'observations, avec leurs résultats correspondants.
Modèle géotechnique de conception	<ul style="list-style-type: none"> • Le groupe d'objets « cahier B » rassemblera tous les objets constituant le modèle géotechnique de conception et les propriétés associées à un projet spécifique (couches de sol, nappe, ...).
Ouvrages Génie Civil	<ul style="list-style-type: none"> • Le groupe d'objets « cahier C » regroupera l'ensemble des objets géotechniques correspondant aux ouvrages et structures de génie civil et leurs propriétés associées.
Évolutivité du modèle	<p>Cette organisation facilite également l'évolutivité au cours du projet : les cahiers A, B et C, sont susceptibles d'être alimentés et actualisés à tout moment, y compris en phase de travaux, en cas d'acquisition de nouvelles données, de mise à jour du modèle géotechnique ou de modification et adaptation du projet (itérations).</p> <p>Par exemple, en cas de réalisation de sondages complémentaires venant peupler le cahier A, les nouveaux objets « sondages » pourront être visualisés immédiatement dans le modèle cahier B pour vérifier les informations nouvelles apportées, et donner lieu, si besoin à une mise à jour du modèle interprété (cahier B), voire du dimensionnement des ouvrages (cahier C).</p>

3.4 Le traçage de la provenance des données

Contexte d'acquisition des données	<p>La question de la traçabilité et de la qualité des données dans les modèles numériques est un élément clé pour leurs utilisations ultérieures. Les modèles véhiculent des informations qui ont leur propre histoire. Les données factuelles sont acquises dans un contexte spécifique et l'interprétation de celles-ci par le géotechnicien se fait dans un cadre de projet défini. Conférer un caractère réutilisable aux modèles nécessite une compréhension globale du contexte du projet et de la chaîne d'interprétations successives (et de décision).</p> <p>Par ailleurs, il est important de rappeler que les caractéristiques des matériaux évoluent en fonction du temps et des charges auxquelles ils sont soumis (consolidation, fluage). L'utilisation des modèles doit donc prendre en compte les conditions de leur définition.</p>
Cheminement des données	<p>Dans le cadre de la standardisation OpenBIM des données géologiques et géotechniques, il est nécessaire d'assurer l'accès et la compréhension de l'origine des données (cahier A), des interprétations/expertises géotechniques qui en découlent (cahier B) et des propriétés de dimensionnement retenues (cahier C). Le suivi de ces informations au cours du cheminement des objets du cahier A au cahier C permet la réutilisation des modèles sur des projets futurs.</p> <p>À titre d'illustration, il est facile d'imaginer que les données d'une reconnaissance géotechnique utilisées pour dimensionner les fondations d'un ouvrage puissent</p>

Provenance des données

être réutilisées dans un nouveau projet situé à proximité : les mêmes données brutes (cahier A) d'un relevé peuvent potentiellement être utilisées, mais l'interprétation et les choix de dimensionnement faits par le géotechnicien (cahier B ou C) peuvent différer d'un projet à l'autre. À titre d'exemple, les caractéristiques interprétées de sols nécessaire au dimensionnement d'une fondation dépendent du type et de la géométrie de la fondation.

Le groupe GT1-5 s'est donc attelé à garantir aux futurs utilisateurs des modèles géotechniques la transparence nécessaire au partage de ces informations. Le document « Provenance » a été élaboré dans cet objectif. Celui-ci propose pour chaque propriété issue d'un modèle géologique ou géotechnique, de définir les éléments clés permettant de retracer son historique depuis l'acquisition des données brutes jusqu'à l'obtention d'une valeur caractéristique attribuée au cahier C pour la propriété concernée de l'objet modélisé. Ainsi, pour chaque propriété caractéristique d'un modèle sont définis :

- Le support d'observation des données brutes/factuelles (sondage, capteur, zone d'intérêt...);
- La méthode d'analyse/expertise utilisée pour aboutir à une donnée qualifiée pour les besoins du projet (analyse statistique, calcul, photo-interprétation...);
- Les références normatives associées (norme expérimentale, Eurocode, ...).

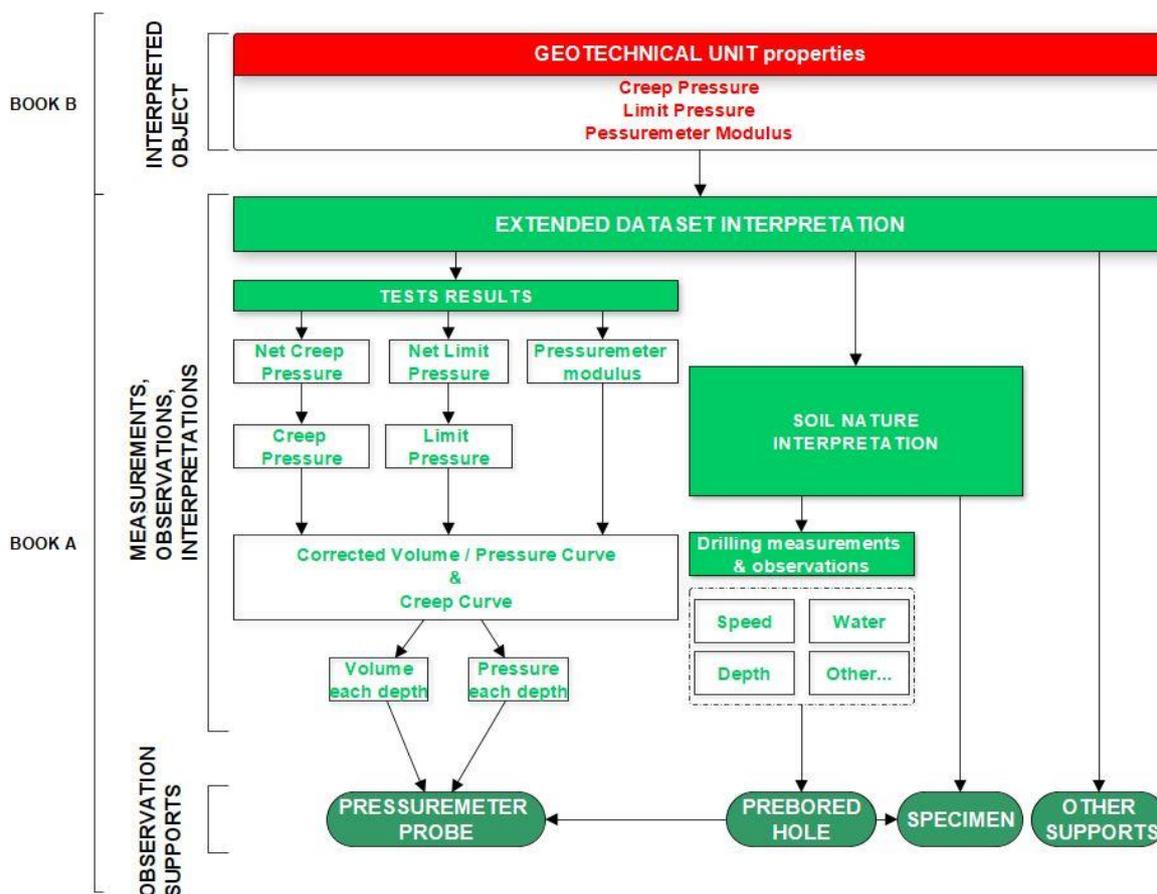
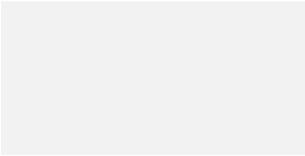


Fig 3. Exemple d'analyse de données issues d'essais pressiométriques pour la caractérisation mécanique du sol

La connaissance de cet ensemble permet de contextualiser le jeu de données et de réaliser une analyse critique du modèle lors de sa réalisation ou de sa réutilisation *a posteriori*.

La capacité à retracer ainsi la provenance des données offre plusieurs avantages :



- Déterminer le processus d'interprétation suivi par le designer ;
- Évaluer la qualité des informations ;
- Faciliter la mise à jour des modèles, notamment quand de nouveaux jeux de données sont disponibles.

3.5 Notion de représentations multiples

Principaux objectifs du modèle

Un modèle vise à rassembler l'ensemble des données relatives à la connaissance du site, c'est-à-dire, les différents objets des cahiers A, B et C et leurs propriétés associées. Les principaux objectifs du modèle sont :

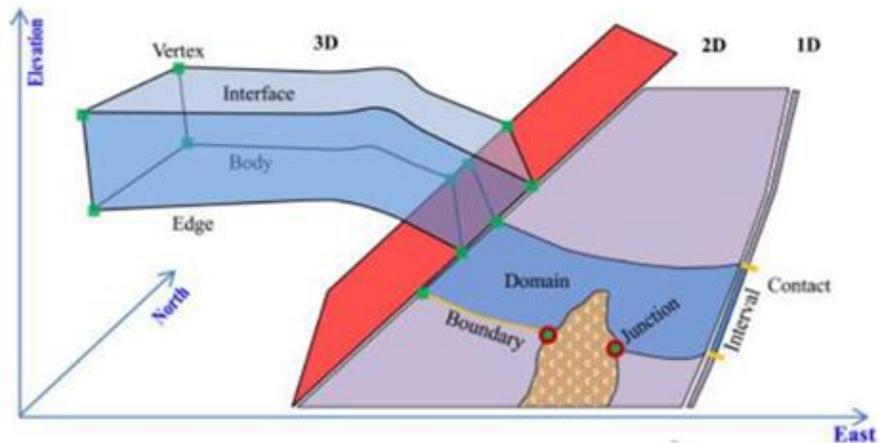
- De servir de réservoir des données sources ou intermédiaires permettant de construire de nouvelles informations,
- De visualiser les objets dans différents modes de représentation,
- De partager / communiquer à des tiers les connaissances.

Modèle et représentations

La connaissance d'un site peut être présentée sous différents type de supports : texte, numérique, graphique et cartographique.

En termes de modes de représentations graphiques, le modèle, ou une partie de celui-ci peut être visualisé en plusieurs dimensions :

- En 1D, le long d'un axe, par exemple pour représenter une propriété sur une verticale ;
- En 2D vue de dessus comme une vue en plan ou une carte, ou vue de côté, c'est-à-dire une coupe ou section ;
- En 3D, notamment pour mettre en évidence la variabilité spatiale de la géologie, du contexte environnemental, des propriétés géotechniques, etc.



Dimension of GeoModel	Dimension of Geometric elements			
	3	2	1	0
3 (3D model)	Body	Interface	Edge	Vertex
2 (map, section)		Domain	Boundary	Junction
1 (drill, traverse)			Interval	Contact

The '—>' arrow means the 'equivalent' representation of elements

Fig 4. Représentations des objets géologiques en 1D, 2D et 3D [Z.Wang, 2109]

Évolution du nombre de dimensions

Exemple

Le changement du nombre de dimensions du modèle impacte le nombre de dimensions de ses composants. La représentation des objets le constituant, peut donc varier.

Par exemple, un objet « sondage » représenté par un point sur une vue en plan (2D) permet d'indiquer sa localisation par rapport à celle du projet étudié. Par contre, ce même composant représenté comme un solide dans un modèle 3D permet d'identifier l'altimétrie de la tête et de la base du sondage par rapport à la cote du terrain naturel ou terrain final du projet et éventuellement son diamètre.

À chaque mode, son utilité

Expression des propriétés

Chaque mode de représentation apporte donc des informations différentes et a son utilité dans le projet.

Les propriétés rattachées à un objet peuvent également être représentées de diverses façons. Par exemple, la résistance d'une couche de sol peut être exprimée sous forme d'un histogramme pour une analyse statistique, d'un graphique ou diagramme sur un log d'essai, de dégradés de couleurs sur une coupe ou un plan, de fourchettes de valeurs, ou encore de paramètres statistiques (moyenne, médiane, écart-type, etc.).

Chacun de ces modes de présentation apporte un complément utile à la compréhension du contexte, enjeux et conception du projet en question.



Fig 5. Représentation 2D ; vue en plan

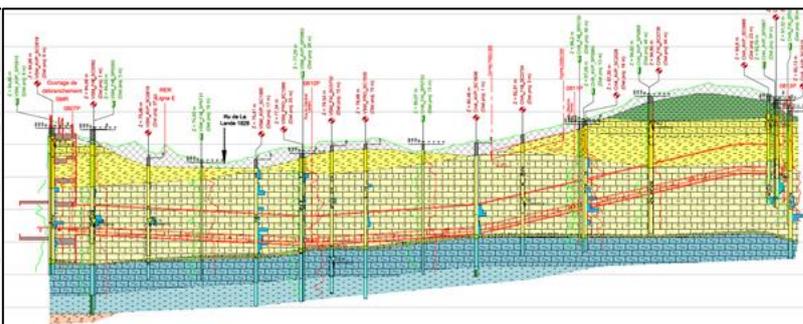


Fig 6. Représentation 2D ; profil en long

Coexistence des modèles : Il a donc été souligné au sein du groupe de travail GT1-5 l'importance de coexistence de différents types de représentation d'un même modèle.

Modèle conceptuel

Le modèle défini par le groupe de travail a été ainsi conçu afin de fournir un modèle conceptuel permettant de générer des représentations variées d'un objet. L'objectif est de décrire et confronter des coupes 2D, cartes 2D et modèles 3D en les reliant par les mêmes terminologies.

3.6 Représentation de l'incertitude en géotechnique

Source des incertitudes

Dans le domaine de la géotechnique, il est impossible de couvrir l'ensemble de la surface du sol par des sondages. Les modèles géotechniques en 2D et 3D sont des représentations basées sur l'interprétation, l'interpolation voire l'extrapolation, en

Géométrie

ayant parfois recours à des méthodes géostatistiques. Quelles que soient les méthodes employées, il demeure toujours un certain niveau d'incertitude.

Lorsqu'il s'agit d'incertitude sur la géométrie des couches de sols, celle-ci pourra être représentée en s'inspirant des exemples fournis dans la recommandation AFTES GT32R2F1.

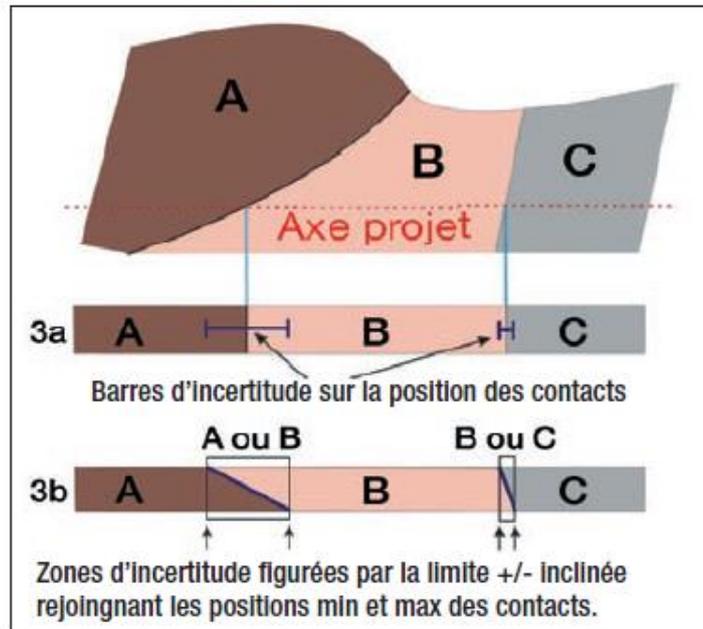


Fig 7. Exemple de représentation de l'incertitude géométrique (Recommandation AFTES GT32R2F1)

Valeurs

Lorsque l'incertitude porte sur les valeurs des propriétés géotechniques, il est également important de pouvoir l'intégrer dans le modèle, par exemple en utilisant des fourchettes de valeurs pour les propriétés géotechniques, ou encore des paramètres statistiques (moyenne, médiane, écart-type, etc.).

4. PROPOSITION DÉTAILLÉE

4.1 Identification des objets

Démarche générale

L'objectif de standardisation vise à identifier les objets et propriétés nécessaires à l'établissement d'un modèle et à leur attribuer un nom et une définition, sur la base de concepts partagés entre les différents acteurs.

Dans le but de recenser et standardiser les divers objets géotechniques entrant dans la conception de projets d'infrastructures, le travail du Groupe MINnD GT1-5 s'est basé sur des exemples réels, utilisés par les membres du groupe et sur leur retour d'expérience, en prenant en considération le critère de représentations multiples (cartes, plans, profils, coupe-types, etc.).

Une liste des objets a été consolidée et affinée à l'aide d'exemples de modèles existants, aussi variés que possible, utilisés par les membres de l'équipe. Quelques exemples de représentations utilisées pour l'identification des objets sont donnés sur la Figure 8.

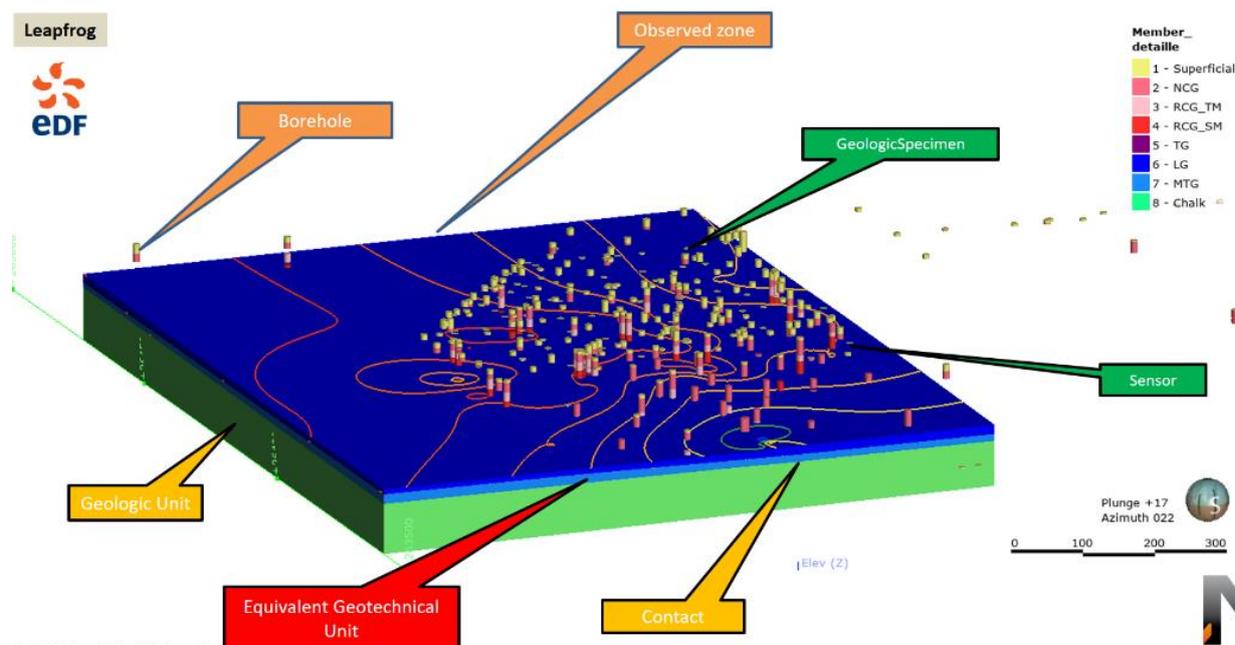


Fig 8. Exemple de modèles utilisés pour l'identification des objets

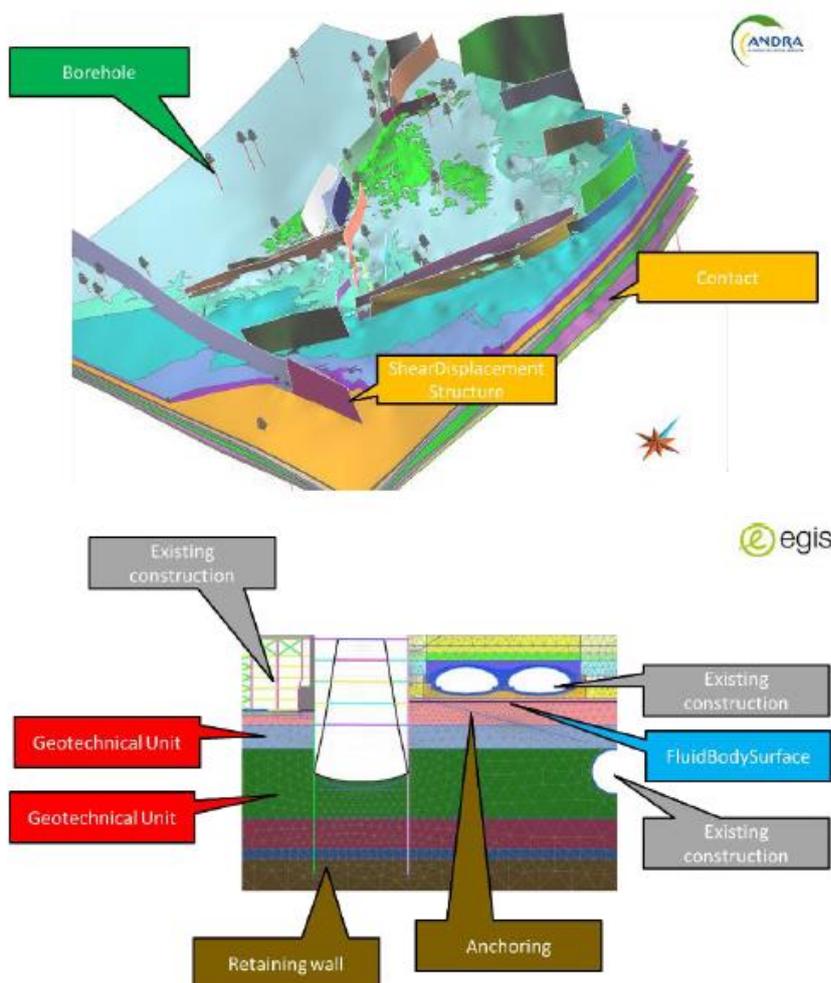


Fig 9. Exemple de modèles utilisés pour l'identification des objets

Familles d'objets

**Supports d'observations
(Cahier A)**

L'ensemble des éléments permettant de proposer une modélisation de la zone d'étude sont ainsi distingués en deux grandes familles d'objets :

Ils correspondent aux objets types d'investigations géotechniques (sondages, échantillons, capteurs, etc.) à partir desquels des observations, mesures ou analyses peuvent être faits, soit in-situ, soit en laboratoire ou post-traitement.

**Objets interprétés
(Cahier B)**

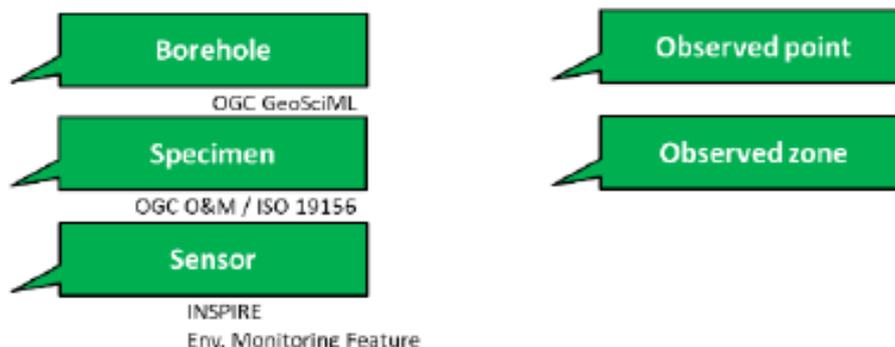
Ils correspondent à l'ensemble des composants permettant de décrire l'environnement du projet (unités géotechniques, failles, zones d'aléas, constructions existantes, etc.),

Ces objets ont été définis de sorte à refléter la démarche géotechnique présentée ci-avant, et sont donc issus du domaine géotechnique proprement dit, mais également des domaines qui lui sont connexes, à savoir la géologie et l'hydrogéologie.

**Objets du projet
(Cahier C)**

Le Cahier C regroupe l'ensemble des objets composant le projet de génie civil : ouvrages provisoires et définitifs, éléments d'instrumentation, éléments issus du registre des risques, etc. Dans le cadre des travaux du groupe GT1-5, les objets purement génie civil (fondations, clous, ancrages, voussoirs, etc.) et d'instrumentation (capteurs) n'ont pas été listés et décrits, ceux-ci étant du ressort du groupe de travail GT1-4 (Tunnel). Il a, en revanche, été décidé de définir l'objet ZIG (zone d'influence géotechnique).

Book A: Observation supports



Book B & C: Interpreted and modeled objects

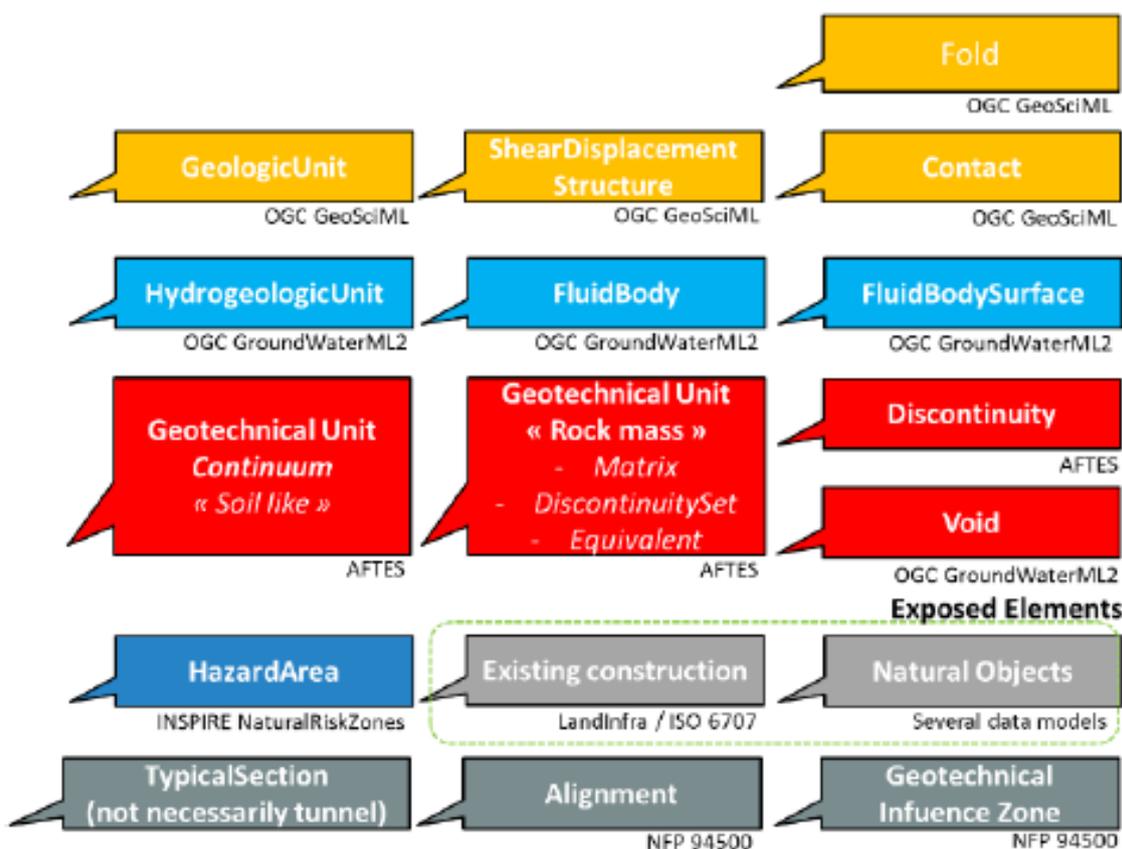


Fig 10. Liste des objets définis pour l'établissement d'un modèle BIM géotechnique

Des objets connus

Un certain nombre de ces objets sont déjà définis dans les standards existants, tels que le OGC (Open Geospatial Consortium). Les autres nécessitent d'être créés et définis. Par exemple, le concept de « Geotechnical Unit » ou « Unité Géotechnique », correspondant à une surface ou un volume de sol dont les caractéristiques mécaniques et paramètres sont modélisés par les mêmes valeurs, est un concept fondamental dans les études géotechniques, pourtant actuellement non normalisé. Par ailleurs, la géotechnique incluant souvent des notions provenant de plusieurs domaines techniques, tel que la géologie, l'hydrogéologie, la géophysique..etc, ou

spécifique au projet étudié, le travail de standardisation proposé intègre également des objets associés à ces différents domaines.

Des définitions sont ensuite attribuées aux objets, afin d'assurer une compréhension commune des différents concepts entre les différents intervenants (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise...).

Des objets liés

Le modèle proposé par le groupe GT1-5 permet également de spécifier les liens qui peuvent exister entre les différents objets. Par exemple, en conservant le lien entre un sondage et une couche, il sera toujours possible de tracer l'ensemble des données (données du sondage, données laboratoires associés à un échantillon provenant du sondage) affectées à la couche en question. En effet, dans le modèle, un objet ne traduit pas uniquement une valeur numérique mais est aussi lié au contexte global (méthode de mesure utilisée, date, opérateur, etc.). Cela permet ainsi d'avoir un œil critique sur le modèle, ce qui est essentiel pour un modèle géotechnique étant donné que celui-ci est principalement basé sur l'interprétation, la prise en compte d'hypothèses et l'extrapolation des données, avec un niveau d'incertitude important.

4.2 Supports d'observations (Cahier A)

Sondage (Borehole)

Un sondage est le terme générique pour tout type de forage de petit diamètre dans le sol, qu'il soit vertical, horizontal ou incliné (**définition OGC GeoSciML**).

De nombreuses propriétés peuvent être associées : sa localisation (x,y,z), diamètre, outils, équipement, description lithologique, échantillons prélevés, essais in situ, etc.

Echantillon (Specimen)

Echantillon physique, prélevé pour réaliser des observations ou essais, in situ ou en laboratoire (définition ISO 19156).

Point d'observation (Observed point)

Point de coordonnées connues depuis lequel une observation ou un essai est réalisé.

Zone d'observation (Observed zone)

Zone délimitée dans l'espace depuis laquelle est effectuée une observation ou un ensemble d'observations de positions non déterminées au sein de cette zone.

Capteur (Sensor)

Dispositif positionné dans l'espace (coordonnées x,y,z connues) et permettant d'établir plusieurs mesures à des intervalles de temps donnés. La définition est assez large et il peut s'agir par exemple d'une cible topographique relevée au cours d'une période de travaux et permettant d'enregistrer un déplacement.

Construction existante (ExistingConstruction)

Cet objet permet de représenter toute construction au sens large (bâtiment, infrastructure, réseau, voirie, ...) préexistant au projet et potentiellement en interaction avec celui-ci. La caractérisation des constructions existantes est bien identifiée et détaillée par l'AFTES pour les travaux souterrains. Dans le cadre du cahier A, les

bâti existants situés dans la zone d'influence géotechnique sont recensés et caractérisés par une « fiche bâti » listant toutes les propriétés pertinentes : type de bâti, type de structure, nombre de niveaux, nombre de sous-sols, type de fondations, sensibilité intrinsèque, etc. Dans le cadre du cahier C, la prise en compte du projet et de ses effets sur les existants conduit à ajouter à ces constructions des propriétés de vulnérabilité.

4.3 Objets interprétés (Cahier B)

Unité géologique (GeologicUnit)

Sur le plan conceptuel, une unité géologique représente un volume de terrain dont l'étendue complète et précise est présumée exister. Il peut s'agir d'unités formelles (c.-à-d. formellement adoptées et nommées dans un lexique officiel), d'unités informelles (c.-à-d. nommées mais non promues dans un lexique) et d'unités non nommées (c.-à-d. reconnaissables, décrites et délimitables sur le terrain mais non autrement formalisées). En termes plus simples, une unité géologique est un ensemble de matériaux terrestres dont l'histoire géologique est commune. (définition OGC GeoSciML).

L'unité géologique a pour but de représenter un volume présentant des caractéristiques géologiques communes, c'est à dire une unicité (ou du moins une hypothèse d'unicité) en tout point de ce volume, de la lithologie et de l'âge géologique des terrains.

Faïlle (ShearDisplacementStructure)

Cet objet regroupe toutes les structures de type cassantes à ductiles le long desquelles un déplacement s'est produit, d'une simple surface cassante ou ductile à un système de failles composé de dizaines de segments de nature cassante et ductile. (définition OGC GeoSciML).

Contact (Contact)

Concept général représentant tout type de surface séparant deux unités géologiques, y compris les limites primaires telles que les contacts de dépôt, tous types de discordances, les contacts intrusifs et les contacts de gradation, ainsi que les failles qui séparent les unités géologiques. (définition OGC GeoSciML).

Unité hydrogéologique (HydrogeoUnit)

Toute unité ou zone de sol ou de roche qui, en raison de ses propriétés hydrauliques, a une influence sur le stockage ou le mouvement des eaux souterraines. (Définition OGC GroundWaterML2).

Une unité hydrogéologique peut être caractérisée par une perméabilité, un coefficient d'emmagasinement, etc.

Unité géotechnique (GeotechnicalUnit)

Une unité géotechnique est soit une surface soit un volume dans lequel le comportement mécanique est modélisé en utilisant le même modèle physique, et en utilisant les mêmes valeurs numériques pour les paramètres de ce modèle.

Une unité géotechnique ne correspond pas nécessairement à une unité géologique, même si elle est souvent à minima une subdivision d'une unité géologique l'englobant. En effet, la modélisation géotechnique n'a pour but que de refléter les comportements mécaniques des terrains en présence. Aussi des terrains de géologie différente mais de caractéristiques géotechniques identiques (ou supposées

Unité géotechnique continue, "assimilable à un sol"

identiques) peuvent être regroupées dans une même unité géotechnique, et à l'inverse, des terrains appartenant à une même unité géologique mais présentant des caractéristiques géotechniques différentes (par exemple : frange d'altération, zones d'interface, etc.) peuvent être séparés dans deux unités géotechniques différentes de l'unité géologique qui leur est commune.

Trois types d'unités géotechniques ont été définies pour refléter les principales pratiques générales de modélisation physiques employées en géotechnique :

Elle correspond à un volume de terrains dont le comportement peut être rattaché au domaine de validité de la mécanique des milieux continus, ce qui est très souvent le cas pour des sols, mais peut aussi concerner certaines roches tendres ou très altérées (matériaux intermédiaires entre les sols et les roches).

Dans cette unité géotechnique, la distribution spatiale des paramètres géotechniques est continue, c'est à dire qu'elle obéit à une loi de répartition dont la plus simple expression est une constante (unicité en tout point des valeurs des paramètres géotechniques), mais qui peut également être calée pour refléter une variation spatiale continue des paramètres géotechniques (par exemple, augmentation de la compacité des sols avec la profondeur se traduisant par une augmentation de certains paramètres géomécaniques), ou encore être représentée par une loi statistique afin de traduire sa variabilité (loi normale, log normale,...).

Unité géotechnique discontinue, ou "massif rocheux"

Cette unité représente un volume de terrain composée d'une matrice assimilable à un milieu continu, mais découpée par un réseau de discontinuités, ce qui correspond à la définition d'un massif rocheux au sens de l'AFTES. Cette voie de représentation concerne quasi exclusivement les massifs rocheux, mêmes si certaines structures anthropiques pourraient s'y rapporter (mur en maçonnerie par exemple, mais dans un cadre ne relevant pas de l'ingénierie géotechnique).

Dans ce type d'unité géotechnique, les caractéristiques continues de la matrice ne peuvent s'appliquer à l'ensemble du volume et ce sont les discontinuités qui conditionnent largement le comportement mécanique des terrains.

Aussi, le réseau de fracturation, décomposable en plusieurs familles de discontinuités d'orientations semblables, est caractérisé par des paramètres géométriques et mécaniques qui lui sont propres.

Il faut aussi prendre en compte le fait que l'échelle considérée relativement à la géométrie du réseau de fracturation, a une très forte importance dans l'étude de ce type de modèle. De cette échelle dépendent les mécanismes de rupture à prendre en compte pour la justification des ouvrages, et il est possible de voir coexister différents types de mécanismes pour différents ouvrages réalisés au sein d'un même massif rocheux.

Notamment, dans certains cas où l'échelle d'étude est très grande devant les dimensions du réseau de fracturation (fracturation très resserrée et sans direction préférentielle), il est possible de considérer ce milieu comme continu à l'échelle considérée. On parle alors de "milieu continu équivalent", présentant des caractéristiques considérées comme continues à l'échelle étudiée. Ces caractéristiques diffèrent de celles de la matrice du massif rocheux. La caractérisation d'un tel milieu continu équivalent s'appuie en général sur des considérations empiriques (indices de classification RMR de Bieniawski, GSI de Hoek & Brown, Q de Barton, etc...) faisant intervenir entre autres paramètres les caractéristiques des discontinuités et celles de la matrice.

Ainsi, l'unité discontinue ou "massif rocheux" est définie par 3 jeux de propriétés distinctes :

- Propriétés de la matrice (milieu continu) ;
- Propriétés du réseau de discontinuités ;

- (facultatif) Propriétés du milieu continu équivalent (attention, valable uniquement à une certaine échelle).

Discontinuité isolée

Il s'agit d'un objet géotechnique surfacique, recoupant d'autres unités géotechniques et qui possède des paramètres géotechniques propres jouant un rôle dans le dimensionnement des ouvrages. À la différence du réseau de discontinuité affectant une unité géotechnique discontinue, la "discontinuité isolée" représente une discontinuité particulière dont la géométrie et la position précise dans l'espace est connue (ou supposée connue), alors que la définition d'un réseau de discontinuité s'appuie plutôt sur des considérations statistiques d'espacement de persistance etc...

Cette discontinuité isolée est utilisée quand le dimensionnement s'appuie sur une position et une géométrie précise (réelle ou estimée) d'une discontinuité recoupant une autre unité géotechnique. Par exemple, cette discontinuité peut représenter un plan délimitant un mécanisme de rupture en bloc au sein d'un milieu rocheux, ou bien une surface de cisaillement au sein d'un sol.

À noter qu'il s'agit d'un **objet** de géométrie surfacique. En réalité, l'objet qu'elle représente est doté d'une certaine épaisseur, ou ouverture dans le cas d'une discontinuité rocheuse. L'utilisation de l'objet "discontinuité" est jugée pertinente dans le cas où le modèle de calcul considéré pour le dimensionnement ne fait pas intervenir directement cette épaisseur : exemple, mécanisme de cisaillement le long d'une surface. En revanche, quand la modélisation du remplissage de la discontinuité revêt une importance pour les calculs, il sera nécessaire d'employer une unité géotechnique volumique et très probablement l'unité géotechnique continue.

Masse d'eau (Water Body)

Volume de fluide (en général de l'eau) pouvant circuler librement, comme par exemple une rivière, un plan d'eau, ou une retenue de barrage. (correspond à la définition OGC/WMO de Water ML2 : Water Body).

Surface piézométrique (WaterBodySurface)

Surface d'un fluide (en général de l'eau) occupant les vides du sol, par exemple la surface piézométrique d'une nappe. (correspond à la définition OGC de GroundWater ML2 : FluidBodySurface).

Cavité (Cavity)

Objet représentant un espace à l'intérieur (hébergé par) d'une unité ou de son matériau. (correspond à la définition OGC Groundwater ML2 : Void).

Plus précisément, l'objet « cavité » au sein du modèle, dont la géométrie est connue, n'a pas à proprement parler de caractéristiques géotechniques mais possède les propriétés suivantes : origine de la cavité (naturelle ou anthropique), type (karst, carrière souterraine, marnière, ...), etc.

Zone d'aléa (HazardArea)

Cet objet permet de délimiter les contours surfaciques ou volumiques d'une zone présentant un aléa significatif pouvant impacter le projet. Cela peut être par exemple : une zone d'aléa retrait-gonflement des argiles, une zone de sols pollués, une zone de sols liquéfiables, une zone de risque pyrotechnique, etc. En termes de propriétés, on peut définir la nature de l'aléa, le niveau de l'aléa (par exemple moyen, élevé) et toute autre information utile.

4.4 Objets du projet (Cahier C)

Zone d'influence géotechnique (Geotechnical Zone of Influence)

La zone d'influence géotechnique (ZIG) est un concept essentiel, notamment défini dans la norme NF P 94-500 des missions d'ingénierie géotechnique. Il s'agit du « volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre d'une part l'ouvrage ou l'aménagement de terrain et d'autre part, l'environnement (...) ». La ZIG est dépendante du projet et des méthodes d'exécution, elle est donc obligatoirement rattachée au cahier C. Elle est en général représentée par un objet volumique, ou par sa projection en plan (dans le cas d'une représentation en 2D).

Zone type de dimensionnement (Typical Design Area)

Une zone type de dimensionnement est un objet se rapportant à un ouvrage géotechnique ou à un ensemble d'ouvrages géotechniques liés. Cet objet représente une zone de l'espace au sein de laquelle le modèle géotechnique est homogène et le dimensionnement de l'ouvrage géotechnique, ou des ouvrages géotechniques en question, est unique, et effectué au travers du ou des mêmes modèles de calculs.

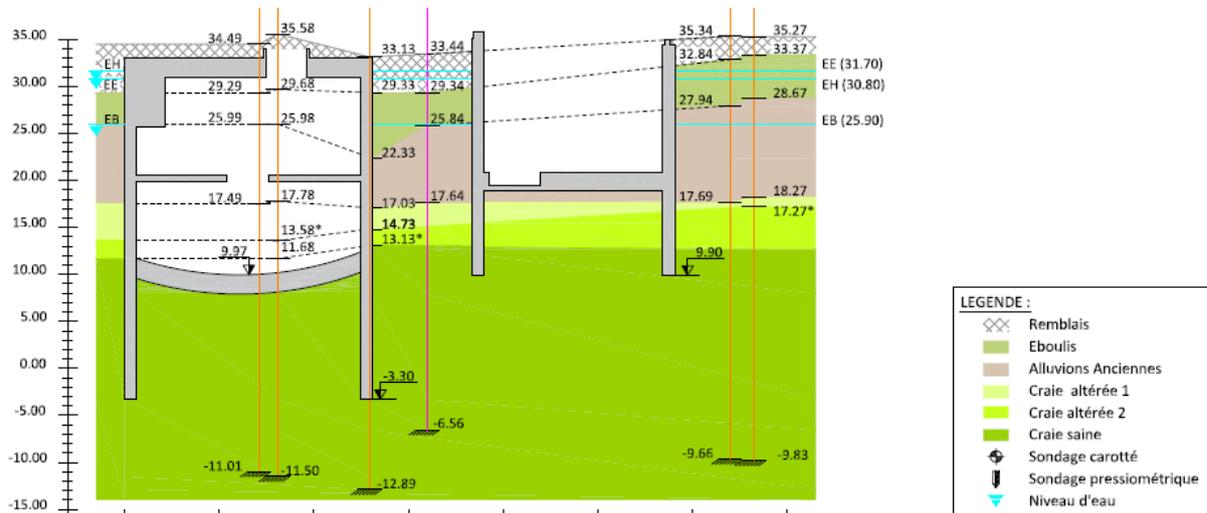


Fig 11. Exemple de zone type de dimensionnement

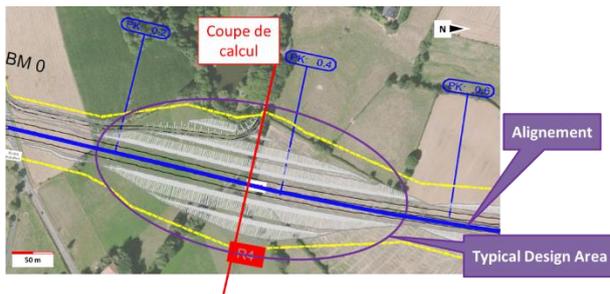


Fig 12. Vue en plan d'une zone type de dimensionnement – Ouvrage en remblai

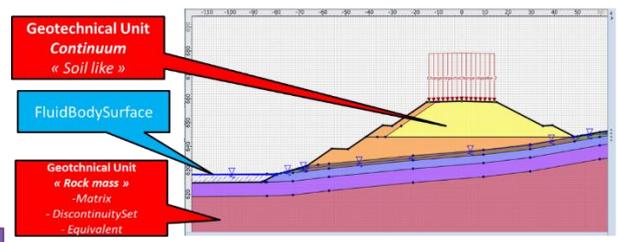


Fig 13. Modèle de calcul utilisé pour le dimensionnement de la zone – ici modèle 2D

Cet objet consigne donc dans ses propriétés les informations relatives :

- A la zone géographique d'application du modèle géotechnique employé et des modèles de calculs utilisés. Il peut s'agir d'une zone délimitée par une surface, un volume, voire une référence linéaire (PM, PK) dans le cas d'un projet linéaire (infrastructure routière, tunnel, etc.) ;
- Au modèle géotechnique utilisable dans cette zone ;

- Aux autres conditions valables dans la zone impactant les calculs ou le dimensionnement : conditions hydrogéologiques, risques, etc. ;
 - Au(x) modèle(s) de calculs utilisés pour le dimensionnement des ouvrages de la zone ;
- Au dimensionnement proprement dit du ou des ouvrages en question.

Alignement (Alignment)

L'alignement est une ligne courbe dans l'espace, correspondant au positionnement d'un projet linéaire (en général son axe, dans le cas d'un tunnel et d'ouvrages linéaires), qui fournit un système de référence linéaire pour localiser les éléments physiques rattachés au projet.

L'alignement est donc l'objet géométrique qui intercepte les objets constitutifs du modèle géotechnique (éléments du cahier B), et auquel on peut rattacher les objets du modèle de l'ouvrage (éléments du cahier C). C'est généralement le long de l'alignement que l'on représente le modèle géotechnique.

4.5 Propriétés des objets

Organisation générale

Selon le principe du BIM, à chaque objet est associé un jeu de propriétés ou attributs. Il a donc été entrepris un inventaire détaillé de toutes les propriétés possibles pouvant être attribuées aux objets précédemment identifiés. À titre d'exemple, l'objet « faille » (= « shear displacement structure ») est associé aux propriétés suivantes (type de faille, azimut, pendage, sens, rejet...).

Par ailleurs, afin de répondre au critère de provenance des propriétés, il était nécessaire de pouvoir associer chaque propriété à une méthode de détermination ou procédure d'essai. Par exemple, lorsque l'on spécifie la cohésion et l'angle de frottement d'une unité géotechnique, il est essentiel de connaître la provenance de ces caractéristiques (essais triaxiaux, essais de cisaillement, corrélations avec autres essais, expérience, etc.).

Une fois défini l'expression du besoin, il a fallu mettre en place une organisation qui permette d'assurer les liens entre d'une part les propriétés identifiées, leur méthode de détermination et d'autre part les supports d'observation et/ou les objets que l'on souhaitait modéliser.

Le choix retenu a consisté à créer un fichier Excel constitué de différents onglets dont l'articulation simplifiée est reprise dans le schéma ci-dessous (un rectangle = un onglet).

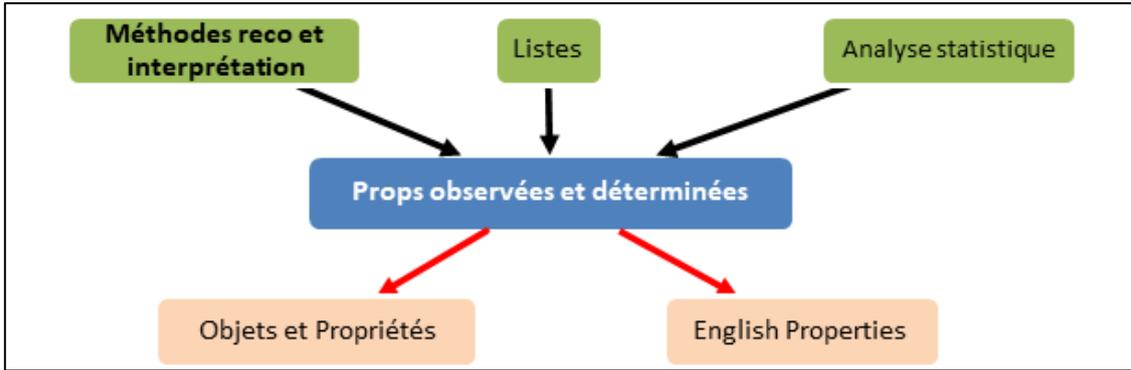


Fig 14. Organisation du fichier Pro3

Méthodes reco et interprétation

Il s’agit d’énumérer de façon exhaustive et en les regroupant par thématiques l’ensemble des essais in-situ ou en laboratoire qui permettent de caractériser une propriété et ainsi définir une liste de choix possibles.

Les différentes méthodes de reconnaissances sont classées par thème : Essais géotechnique in-situ sur les sols, essais géotechniques in-situ sur les roches, Mesures géophysiques, etc. Dans chaque thématique, un ordre de niveau ou “rang” est attribué à chaque méthode d’investigation, afin de les classer en sous-familles. Par exemple, l’essai triaxial (classé sous le rang 3) peut être réalisé sous différents types selon l’information recherchée tel que l’essai en condition consolidé drainé (rang 4) afin d’obtenir les caractéristiques effectives du sol ou encore en condition non consolidé non drainé (rang 4) pour obtenir les caractéristiques apparentes. L’ensemble des différents types d’essai triaxial (rang 3) sont rangés sous la famille des essais mécaniques (rang 2), appartenant au thème des Essais en laboratoire sur les sols (rang 1).

Les normes applicables pour chaque méthode de reconnaissance sont également précisées. Les supports d’observation correspondant à chaque méthode sont listés, tels que : Sondage, Échantillon, Point d’observation..., ainsi que le type d’expertise ; qu’il s’agisse d’une mesure, d’une observation ou d’une préconisation.

NOM	Rang	Définition / Norme
Essai de compression uniaxial	3	NF EN ISO 17892-7
Essai Triaxial	3	
Essai en conditions non-consolidées et non-drainées (UU)	4	NF EN ISO 17892-8
Essai en conditions consolidées drainées (CD)	4	NF EN ISO 17892-9
Essai en conditions consolidées et non-drainées (CU)	4	NF EN ISO 17892-9
Essai consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle (CU+u)	4	NF EN ISO 17892-9
Essai à l'oedomètre	3	
Essai de compressibilité à l'oedomètre	4	NF EN ISO 17892-5
Essai de perméabilité à l'oedomètre	4	ISO TS 17892-11:2004

Fig 15. Extrait du Pro 3 – Extrait de la liste des supports d’observation

Listes

Cette feuille complète la liste précédente avec un ensemble de variables correspondant également à des choix prédéfinis.

Nb : L'utilisation de listes permet de contraindre les choix qui seront faits ultérieurement et ainsi obtenir un document plus homogène .

		Expression du résultat	Processus d'obtention du résultat
Occurrence	Categorie	Type_valeur	Type_expertise
0..1	Numérique	Obs ponctuelle (une date, un lieu)	Calcul
0..n	Liste valeurs prédef.	Série temporelle (obs ponctuelles à différentes dates)	Interprétation
1	Texte libre	Série spatiale (obs ponctuelles a différents lieux)	Mesure
1..n	Description statistique	Intervalle spatial (date fixe, entre deux points)	Observation
	Plage de temps	Intervalle temporel (lieu fixe, entre deux dates)	Préconisation
	Volume spatial	Série d'intervalles spatiaux (des intervalles spatiaux bout à bout)	Analyse statistique
	Booléen	Moyenne des valeurs sur un ensemble de lieux	Mesure / Observation
	Numérique / description s	Mini des valeurs sur un ensemble de lieux	
	Numérique / Angulaire [0-	Maxi des valeurs sur un ensemble de lieux	
	Numérique / Angulaire [0-	Moyenne des valeurs sur un ensemble de dates	

Fig 16. Extrait de l'onglet « Listes »

Description statistique des propriétés

Pour un certain nombre de propriétés, on peut être amené selon les situations :

- Soit à donner une unique valeur (numérique ou autre) ;
- Soit à la décrire de façon plus complète en adoptant un schéma de type « description statistique ».

Description statistique

Pour ce second cas, on rentre alors dans une arborescence permettant de décrire :

- La distribution statistique de la propriété ;
- Les valeurs caractéristiques qui en sont déduites, en général, avec un formalisme type Eurocode (voir EN 1997-1 version provisoire, §4.3.2.2) ou autre formalisme du même type ;
- Les valeurs de calcul qui peuvent en résulter (cahier C).

Origine de la proposition

Ce formalisme découle de la pratique de détermination des valeurs caractéristiques d'une propriété. En effet, dans la majeure partie des cas, exprimer uniquement la valeur moyenne, l'écart type ou les quantiles ne suffit pas pour justifier de façon rigoureuse la valeur choisie au bout du compte. Il convient de façon plus générale de partir de l'ensemble des mesures qui vont servir à déterminer cette valeur caractéristique puis :

- De visualiser la façon dont ces mesures se distribuent (histogramme / courbe de densité de probabilité) ;
- De visualiser également leur variabilité dans l'espace ou en profondeur ;
- De déterminer la loi de distribution représentative de cet ensemble de mesure (loi normale, loi log-normale, ou tout autre intermédiaire avec une transformation de type Box-Cox par exemple) ;
- De calculer les valeurs moyennes et les quantiles sur les paramètres transformés.

La figure suivante illustre par l'exemple une distribution de mesures (module pressiométrique), l'histogramme qui permet de visualiser la distribution des valeurs et les formules proposées par l'Eurocode 7 permettant d'extraire l'intervalle de confiance IC, la valeur caractéristique X_{mi} , et la valeur basse X_b pour une certaine valeur de risque statistique choisie (voir l'Eurocode pour les détails).

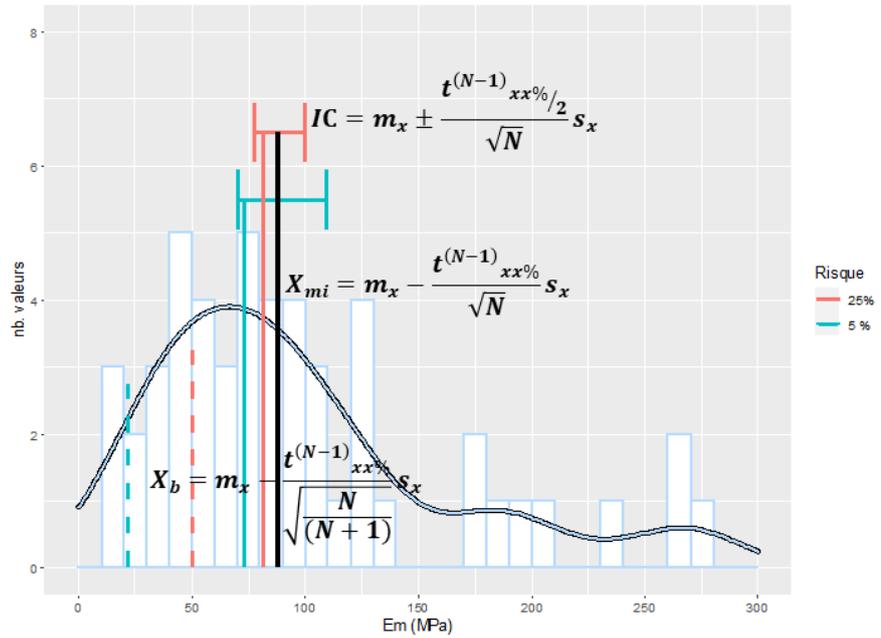
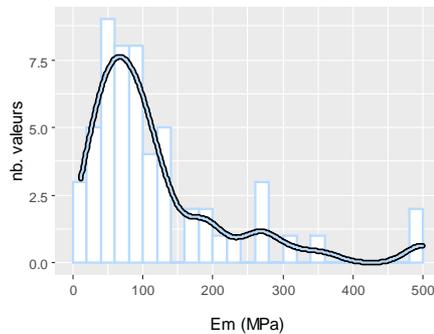


Fig 17. Illustration d'une distribution de valeurs de mesures et grandeurs qualificatives

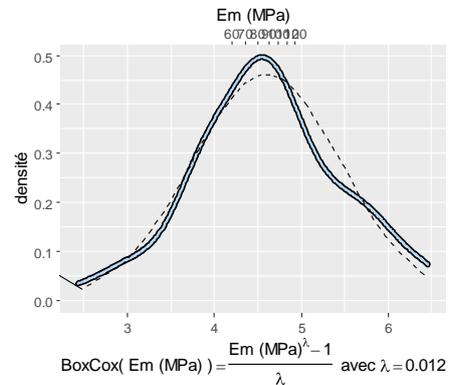
Les deux figures suivantes illustrent deux schémas de distribution différents :

- En bleu, une distribution de valeurs plutôt log-normale (coefficient de transformation Box-Cox proche de 0) ; les valeurs caractéristiques sont donc à calculer sur le log des valeurs (moyenne géométrique) ou directement avec la valeur Box-Cox transformée ;

Distribution brute



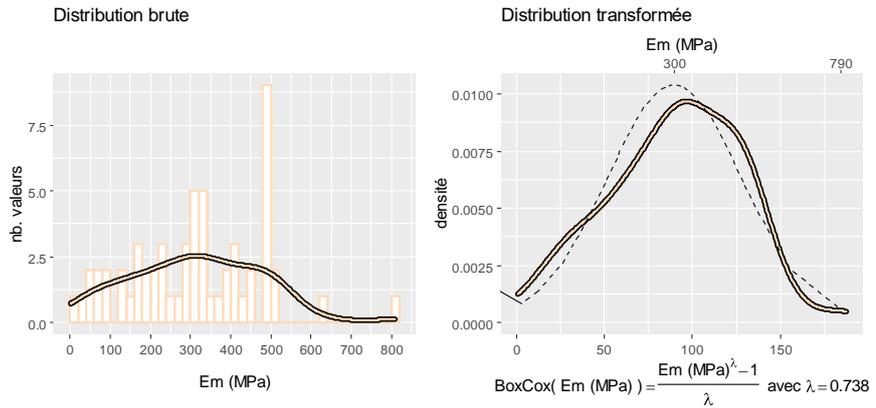
Distribution transformée



- En beige, une distribution de valeurs plutôt normale (coefficient de transformation Box-Cox proche de 1) : une moyenne arithmétique peut alors convenir dans ce cas.

Détail de la proposition

Partie 1



L'objectif de l'arborescence proposée est de permettre une description exhaustive et flexible. Elle peut s'adapter aux paramètres à valeur numérique ou catégorielle (type classement GTR par exemple). Les entrées « Description statistique », « Valeurs caractéristiques » et « Valeurs de calcul » sont facultatives.

La première partie de l'arborescence comprend le nom de la propriété, sa notation, son unité et le système d'unité attaché, une description en texte libre, un éventuel état et une liste de valeurs (soit une copie extraite d'une base de données, soit un lien vers un ensemble de mesures).

Niv 0	Niv 1	Niv 2	Niv 3	Niv 4	Occurrence	Catégorie	Valeurs possibles	Exemple	Commentaire
Propriété									
	Nom				1	Texte libre		Module pressiométrique	
	Notation / symbole				1	Texte libre		E_M	
	Unité				1				
	Unité				1	Liste valeurs prédéf.		kPa	
	Système d'unités				1	Liste valeurs prédéf.		SI	
	Description				1	Texte libre		Module pressiométrique mesuré au sens de la norme NF P 94-110-1	
	Etat				0..1	Liste valeurs prédéf.	non perturbé, perturbé, de pic, résid non perturbé		
	Liste des valeurs				0..n				
	Valeur					Texte libre		"4" ou "A3"	Tout type : numérique / texte

Fig 18. Description d'une propriété mesurée : partie descriptive obligatoire

Partie 2

La seconde partie (facultative) est la description statistique proprement dite de l'ensemble des valeurs fournies dans la liste de valeurs :

Niv 0	Niv 1	Niv 2	Niv 3	Niv 4	Occurrence	Catégorie	Valeurs possibles	Exemple	Commentaire
Propriété									
	Description statistique				0..1				Pour des propriétés continues uniquement (numériques)
	Nombre de valeurs				1	Numérique		25	
	Min				1	Numérique		4	
	Max				1	Numérique		67	
	Médiane				1	Numérique		35	
	Moyenne arithmétique sur valeurs brutes				1	Numérique		24	
	Ecart type sur valeurs brutes				1	Numérique		5	
	Transformation				0..n				
	Nom de la transformation				1	Texte libre	ln, log10, exp, atanh, box-cox, etc...	box-cox	
	Paramètre de la transformation				0..n				
	Nom				1	Texte libre		lambda	
	Valeur				1	Numérique		0.2	
	Moyenne sur le paramètre transformé				0..1	Numérique		20	
	Ecart type sur le paramètre transformé				0..1	Numérique		2	
	Quantiles				0..n				
	Pourcentage				1	Numérique		95%	
	Valeur				1	Numérique		56	

Fig 19. Description d'une propriété mesurée : partie statistique optionnelle

Parties 3 et 4

Les premières valeurs sont déduites directement de la liste (nombre, valeurs minimales, maximales, médianes, moyennes arithmétiques et écarts types sur la liste brute des valeurs).

Suit l'explicitation de la transformation adaptée (log, etc..) en texte libre avec une liste de paramètres éventuels caractérisant cette transformation puis les valeurs calculées sur les paramètres transformés.

Enfin, les deux dernières parties (facultatives) du tableau permettent d'exprimer les valeurs utiles pour le dimensionnement :

Niv 1	Niv 2	Niv 3	Niv 4	Occurrence	Catégorie	Valeurs possibles	Exemple	Commentaire
Propriété								
Valeurs caractéristiques				0..n				valeurs phénoménologiques (aucun choix)
	Nom			1	Texte libre	Xmi, Xb, Xh	Xmi:bc	
	Valeur			1	Numérique		18	
	Formule si dépendance à un paramètre			0..1	Texte libre		15 + 0.12 * profondeur	
	Méthode d'obtention			0..1	Texte libre		moyenne après transformation box-cox - un peu d'écart type	
Valeurs de calcul				0..n				valeurs de calcul (avec prise en compte d'autres paramètres comme la sureté)
	Nom			1	Texte libre		Xcalc	
	Valeur			1	Numérique		18	
	Méthode d'obtention			0..1	Texte libre		Egal à la valeur caractéristique	
	Champ d'utilisation			0..1	Texte libre		Calcul d'un écran par la formule de Schmith	

Fig 20. Description d'une propriété mesurée : valeurs utiles optionnelles

Deux sous-catégories ont été proposées :

- L'expression des valeurs caractéristiques : elles sont déterminées de façon univoque à partir de la description statistique. Pour la valeur caractéristique au sens de l'Eurocode Xmi, on calcule la moyenne des mesures (transformé ou non) puis on retranche un peu d'écart type en fonction du risque statistique retenu (typiquement 5%). C'est la formule indiquée sur la première figure plus haut. On peut également être amené à indiquer Xb (valeur basse), ou Xh (valeur haute).
- L'expression des valeurs de calcul / finalement retenues : si pour une raison ou une autre, on a choisi de ne pas retenir directement la valeur caractéristique, il est souhaitable de l'exprimer dans cette catégorie, associée à la description littérale de la façon dont cette valeur a été obtenue (par expérience etc.), et son champ d'application. Cela peut être utile également pour donner une fourchette de valeurs.

Propriétés observées et déterminées

Dans cet onglet figure une matrice avec en entête des lignes la liste exhaustive des propriétés identifiées susceptibles d'être retenues dans le standard d'échange et en entête des colonnes l'ensemble des supports possibles et des objets à modéliser. Cette organisation nous a paru être la manière la plus adaptée pour répondre à la problématique exposée au paragraphe 2.

Remarque : L'utilisation de cinq colonnes (<> cinq niveaux) en guise d'entête a permis de concrétiser la dépendance existante entre certaines propriétés.

Une fois cette structure définie, ont été ajoutées d'autres colonnes plus générales dans lesquelles ont pu être caractérisées :

1. Les définitions ainsi que les traductions de chacune des propriétés ;
2. L'expression du résultat ;
3. Les différentes méthodes possibles permettant de définir/d'obtenir chacune des propriétés mentionnées.

Ces informations générales fournies, les propriétés ont été affectées aux supports d'observation et/ou aux objets s'il existait un lien entre eux afin de les caractériser.

Propriétés					Définition française	Source définition	English denomin
Niv 1	Niv 2	Niv 3	Niv 4	Niv 5			
Propriétés mécaniques des massifs rocheux							Mechanical prop
	matrice rocheuse (roche intacte)						Rock matrix (inta
		Résistance à la compression simple				NF P94-420	Unconfined com
			Valeur		Rapport entre la force appliquée lors de la rupture de l'éprouvette cylindrique et l'aire de la section transversale déterminée avant essai	NF P94-420	Value
			Classe résistance				UCS class
		Déformabilité					deformability
			Module d'Young		Quotient de la variation de la contrainte axiale $\Delta\sigma_1$ par la variation de la déformation correspondante dans la même direction	NF P94-425	Young modulus
			Coefficient de Poisson		Rapport entre la déformation dans le plan perpendiculaire à la direction de la contrainte de compression et la déformation dans la direction de cette contrainte	NF P94-425	Poisson's ratio
Propriétés mécaniques des discontinuités							Mechanical prop discontinuities
		Famille					Discontinuity set
		Caractéristiques mécaniques					Characteristics
			Cohésion long				cohesion (discon
			Angle de frottement long				friction angle (di
			Raideur normale				Normal stiffness
			Raideur				Tangential stiffn

Fig 21. Extrait de l'onglet « Propriétés observées et déterminées »

L'extrait ci-dessus de l'onglet « Props observés et déterminés » permet d'illustrer l'utilisation des différents niveaux :

- Au niveau 1 est indiqué ce que l'on souhaite caractériser, en l'occurrence il s'agit des propriétés mécaniques des massifs rocheux mesurées en laboratoire ;
- Au niveau 2, une distinction est faite dans les propriétés affectées à la matrice d'une part et aux discontinuités d'autre part ;
- Le niveau 3 - si l'on considère la matrice rocheuse – permet de distinguer d'une part la résistance à la compression simple et la déformabilité d'autre part ;
- Le niveau 4 et 5 si nécessaire correspondent aux niveaux où les résultats des essais sont repris.

Les colonnes suivantes permettent à la fois de rappeler la définition française de la propriété (avec la source) afin de lever les ambiguïtés, la référence à la norme de l'essai si elle existe et la traduction en anglais. Nb : Dans le paragraphe suivant figure le développement correspondant à cet extrait

Onglets orange

Objets et Propriétés

Les deux onglets ci-après sont issus directement de « Props observés et déterminés » sans aucune modification de contenu afin d'assurer une parfaite cohérence entre l'ensemble des informations et cela quel que soit la présentation retenue.

Correspond au développement de la matrice précédente en considérant tour à tour chaque support d'observation ou objets avec l'ensemble des propriétés qui permettent de le caractériser (nb : les propriétés intègrent la structure des cinq niveaux correspondant aux 5 premières colonnes).

Les versions française et anglaise figurent dans cet onglet.

Num	Objet	Propriété	Propriétés
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / matrice rocheuse (roche intacte) / Résistance à la compression simple / Valeur	Mechanical properties of rock mass / Rock matrix (intact rock) / Unconfined compressive strength / Value
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / matrice rocheuse (roche intacte) / Résistance à la compression simple / Classe	Mechanical properties of rock mass / Rock matrix (intact rock) / Unconfined compressive strength / UCS class
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / matrice rocheuse (roche intacte) / Déformabilité / Module d'Young	Mechanical properties of rock mass / Rock matrix (intact rock) / deformability / Young modulus
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / matrice rocheuse (roche intacte) / Déformabilité / Coefficient de Poisson	Mechanical properties of rock mass / Rock matrix (intact rock) / deformability / Poisson's ratio
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / Propriétés mécaniques des discontinuités / Famille / Caractéristiques mécaniques / Cohésion long terme : c'	Mechanical properties of rock mass / Mechanical properties of discontinuities / Discontinuity set number / Characteristics / cohesion (discontinuity)
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / Propriétés mécaniques des discontinuités / Famille / Caractéristiques mécaniques / Angle de frottement long terme : phi'	Mechanical properties of rock mass / Mechanical properties of discontinuities / Discontinuity set number / Characteristics / friction angle (discontinuity)
25	GeotechUnit (mat rock mass)	Propriétés mécaniques des massifs rocheux / Propriétés mécaniques des discontinuités / Famille / Caractéristiques mécaniques / Raideur normale	Mechanical properties of rock mass / Mechanical properties of discontinuities / Discontinuity set number / Characteristics / Normal stiffness

Fig 22. Extrait de l'onglet « Objets et Propriétés »

English Properties

Il s'agit de la traduction de l'onglet « Props observés et déterminées » à partir des éléments fournis afin d'en faciliter la diffusion.

Cette figure correspond à l'extrait en anglais du tableau décrit précédemment (avec les différents niveaux)

Propriétés					Dénomination Française	English definition
Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5		
Mechanical properties of rock mass					Propriétés mécaniques des massifs rocheux	
	Rock matrix (intact rock)				matrice rocheuse (roche intacte)	
		Unconfined compressive strength			Résistance à la compression simple	
			Value		Valeur	Ratio between the force applied during fracture of the cylindrical test piece and the area of the cross section determined before the test
			UCS class		Classe résistance	
		deformability			Déformabilité	
			Young modulus		Module d'Young	The Young modulus is a mechanical property that measures the tensile stiffness of a solid material.
			Poisson's ratio		Coefficient de Poisson	The Poisson's ratio is a measure of the deformation of a material in direction perpendicular to the specific direction of loading.
Mechanical properties of discontinuities					Propriétés mécaniques des discontinuités	
		Discontinuity set number			Famille	
		Characteristics			Caractéristiques mécaniques	
			cohesion (discontinuity)		Cohésion long terme : c'	
			friction angle (discontinuity)		Angle de frottement long terme : phi'	
			Normal stiffness		Raideur normale	
			Tangential stiffness		Raideur tangentielle	

Fig 23. Extrait de l'onglet « English Properties »

Fig 24.

5. EXPLOITATION ET VALORISATION DES RÉSULTATS

5.1 Diffusion interopérable des vocabulaires

Des propriétés aux registres

Le projet MINnD GT1-5 a permis :

- D'identifier des termes utilisés en géotechnique ;
- D'associer à ces termes des définitions claires ;
- De mettre en valeur les liens sémantiques entre ces termes.

Pour valoriser ce type de données de manière informatisée, notamment via le web, des langages et des protocoles dédiés existent. Ils sont associés et regroupés sous le terme de Web Sémantique.

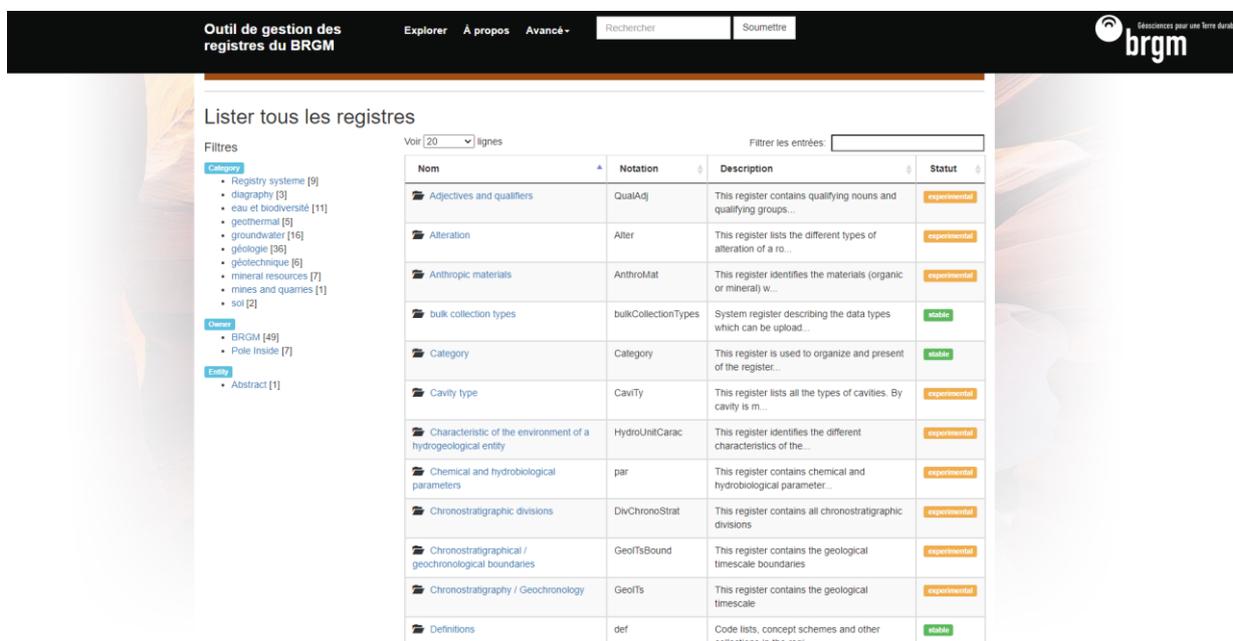
Ces dernières ont pour utilité de :

- Faciliter leur mention ou citation : association systématique de chaque entrée à un identifiant unique et persistant ;
- Exprimer les liens sémantiques : termes parents, enfants ou liés ;
- Permettre la découverte des vocabulaires : association à un outil de recherche et consultation.

Registre national des géosciences

Dans le domaine des géosciences, le BRGM, service géologique national, expose ses vocabulaires par le biais d'un outil de gestion de registres. Ce dernier est en libre consultation à l'adresse suivante : <https://data.geoscience.fr/ncl/>

On y retrouve notamment les vocabulaires de référence au niveau français et international dans les domaines de la géologie, l'hydrogéologie, les ressources minérales, etc.



Outil de gestion des registres du BRGM Explorer À propos Avancé Rechercher Soumettre

géosciences pour une terre durable
brgm

Lister tous les registres

Voir 20 lignes

Filter les entrées:

Nom	Notation	Description	Statut
Adjectives and qualifiers	QualAdj	This register contains qualifying nouns and qualifying groups...	experimental
Alteration	Alter	This register lists the different types of alteration of a ro...	experimental
Anthropic materials	AnthroMat	This register identifies the materials (organic or mineral) w...	experimental
bulk collection types	bulkCollectionTypes	System register describing the data types which can be upload...	stable
Category	Category	This register is used to organize and present of the register...	stable
Cavity type	CavTly	This register lists all the types of cavities. By cavity is m...	experimental
Characteristic of the environment of a hydrogeological entity	HydroUnitCarac	This register identifies the different characteristics of the...	experimental
Chemical and hydrobiological parameters	par	This register contains chemical and hydrobiological parameter...	experimental
Chronostratigraphic divisions	DivChronoStrat	This register contains all chronostratigraphic divisions	experimental
Chronostratigraphical / geochronological boundaries	GeoTsBound	This register contains the geological timescale boundaries	experimental
Chronostratigraphy / Geochronology	GeoTs	This register contains the geological timescale	experimental
Definitions	def	Code lists, concept schemes and other collections in the regi...	stable

Filtres

Category

- Registry systems [9]
- diagraphy [3]
- eau et biodiversité [11]
- geothermal [5]
- groundwater [16]
- géologie [36]
- géotechnique [6]
- mineral resources [7]
- mines and quarries [1]
- sol [2]

Owner

- BRGM [49]
- Pole Inside [7]

Entity

- Abstract [1]

Fig 25. L'outil de gestion des registres du BRGM, en Janvier 2022.

Enrichissement des registres

Afin de valoriser les travaux de MINnD GT1-5 et permettre aux entrées de vocabulaires définies dans le cadre du projet d'être accessibles et exploitables selon les principes du web sémantique, il a été proposé d'alimenter les registres du BRGM.

Les registres concernés portent sur :

- Les méthodes et processus : <https://data.geoscience.fr/ncl/Proc>
- Les propriétés observées : <https://data.geoscience.fr/ncl/ObsProp>
- Les unités de mesures : <https://data.geoscience.fr/ncl/uom>
- Les instruments de mesures : <https://data.geoscience.fr/ncl/SenTy>

5.2 Contributions aux projets de standardisation internationaux

IFC Tunnel Geosubgroup

Au sein de bSI, le projet IFC Tunnel vise à permettre la description des ouvrages souterrains, en particulier les tunnels avec les standards IFC. Il s'intéresse également à la description de l'environnement de ces ouvrages.

La géotechnique est ainsi étudiée et un sous-groupe du projet est chargé de la spécification des extensions IFC relatives à ce domaine.

MINnD GT1-5 est représenté dans ce projet par :

- Mickaël Beaufilet,
- Isabelle Halfon,
- Sylvie Bretelle,
- Alexis Serieys.

L'influence et les contributions de MINnD GT1-5 ont été de différents types :

- Conseil méthodologique : par la suggestion (puis adoption) de méthodes de travail éprouvées au sein de MINnD GT1-5 ;
- Contenu : par la fourniture des livrables de MINnD GT1-5, en particulier le travail d'identification des objets et des propriétés d'intérêts (propriétés observées, méthodes) ;
- Expertise scientifique : par la fourniture d'une expertise en géotechnique qui par association et confrontation avec celle des autres membres, a permis la co-construction de la proposition IFC Tunnel.

5.3 Communications du groupe

Une large diffusion des travaux

Les travaux de MINnD GT1-5 ont été présentés devant diverses audiences, nationales et internationales et selon différentes formes.

Ces actions de communication avaient pour but de :

- Informer et sensibiliser les communautés géoscientifiques et ingénierie génie civil des travaux réalisés,
- Obtenir le support.

Organismes de standardisation

La proposition de MINnD GT1-5 visant à s'appuyer sur des définitions fournies dans des standards OGC et à s'interfacer avec le BIM, les travaux ont été présentés au sein des :

- OGC Technical Committees,
- buildingSmart International Summit.

Organisation en lien avec la géotechnique

Des actions de porter à connaissance ont été menées auprès des organismes métiers dans le domaine de la géotechnique et des tunnels, menant ainsi à des présentations auprès de :

- Comité Français de Mécanique des Sols,

Présentation dans des conférences

- GT45 de l'Association Française des Tunnels et Espaces Souterrains (AFTES),
- Syntec Ingénierie.

Les travaux mettant en valeur des avancées scientifiques dans le domaine de l'interopérabilité des données géotechniques, des présentations ont été réalisés dans diverses conférences :

- SOLSCOPE 2019,
- ICITG 2019,
- BIM World 2019 – 2020 - 2021,
- InfraBIMOpen 2020 – 2021,
- Symposium Rock Slope Stability 2021,
- WTC2022.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

6.1 Un projet fédérateur et une influence internationale

Continuité numérique BIM et SIG

Les choix de concepts faits dans MINnD GT1-5 avaient pour but de réutiliser au maximum les notions et définitions existantes, en particulier celles retenues dans les standards OpenGIS de l'OGC et ainsi faciliter une continuité numérique entre BIM et SIG.

Cet intérêt avait été mis en valeur lors du Geotechnical Data Standardization Workshop, conjointement organisé par le BRGM et MINnD en janvier 2019. Les SIG constituant en effet un format très usité en géotechnique, notamment dans les phases projets.

Grâce à la participation au projet IFC Tunnel, les travaux de MINnD GT1-5 contribuent à la définition d'extensions pour la géotechnique du standard OpenBIM IFC utilisant des concepts communs avec les standards OGC.

Geotech IE

À l'initiative de MINnD, et dans le cadre du programme de développement de standards pour l'industrie ATLAS, une action internationale a été lancée au sein de l'OGC pour continuer le travail de rapprochement entre le monde du BIM et du SIG.

Le Geotech Interoperability Experiment a ainsi deux principaux objectifs :

1. Communautaire, avec l'élaboration d'un modèle conceptuel commun entre les différents standards ou formats internationaux en géotechniques (incluant OGC, bSI, AGS et DIGGS) et la rédaction de documents destinés aux vendeurs de solutions pour la prise en compte des besoins des utilisateurs.
2. Technique, avec l'extension des standards OGC (notamment GeoSciML, GroundWaterML2), la fourniture de guide d'utilisation des APIs OGC ainsi que la réalisation et promotion de démonstrations.

Dans la continuité de MINnD GT1-5, le pilotage est confié au BRGM, membre OGC, et assuré par Mickaël Beaufils, chair du GeoScienceDWG. De nombreux membres de MINnD GT1-5 participent.

Convergence entre communautés géotechnique et informatique

En France, le projet MINnD GT1-5 a contribué à rapprocher les communautés scientifiques en géotechnique de celles qui travaillent sur les standards informatiques. Cet effort est marqué par la reprise des concepts existants notamment au sein de l'AFTEs, des normes (eg. NFP 94500, Eurocode), mais aussi par des actions de communication au sein des fédérations du monde de la géotechnique tels que le CFMS, le CFGI ou Syntec Ingénierie.

A ce titre, des journées d'information et de sensibilisation sont prévues par le CFGI et le CFMS, respectivement en octobre et novembre 2022.

ISSMGE TC222

Sur le plan international, l'ISSMGE a décidé de créer un Comité Technique dédié au sujet « BIM et Jumeaux Numériques pour la Géotechnique ».

Le groupe est piloté par Magnus Romoen (Norwegian Geotechnical Institute) et Mickaël Beaufils (BRGM) et vise notamment à définir des guides d'utilisation des standards OGC et bSI à destination des experts géotechniques de tous pays.

La première réunion du groupe est prévue en avril 2022.

6.2 La question du partage des données géotechniques

Les données géotechniques collectées lors d'un projet et les études associées sont finalement la propriété du maître d'ouvrage. Elles sont cependant recueillies par les divers intervenants du projet et sous leur responsabilité : par exemple les titulaires des marchés de reconnaissances sont en charge et responsables de la collecte des résultats factuels de sondages et d'essais, les ingénieries ou maîtrises d'œuvre géotechniques préparent et établissent les modèles géotechniques et les dossiers de conception des ouvrages. En phase exécution, les entreprises de travaux réalisent les études d'exécution, le suivi du comportement des ouvrages (instrumentation), les dossiers d'ouvrages exécutés (DOE).

Par ailleurs, divers intervenants supplémentaires (bureaux de contrôle, assistants maîtres d'ouvrage, etc.) sont également amenés à interagir dans le cadre de leur mission.

Il en résulte de nombreux échanges de données (rapports, plans, notes de calcul, modèles BIM,...) entre les différents intervenants et par conséquent des risques de perte accidentelle ou fuites intentionnelles (acte de malveillance) d'informations, dans un contexte, en général, de confidentialité des données.

Il est donc essentiel de garantir au cours d'un projet la sécurité des données en utilisant des technologies de stockage et d'échanges protégées ainsi qu'une traçabilité complète des échanges et versions des fichiers échangés (blockchain).

À l'issue d'un projet, l'ensemble des groupes d'objets du modèle (cahiers A, B et C) sont entièrement transférés au maître d'ouvrage, qui peut, par exemple, les utiliser dans le cadre d'un modèle BIM ou un jumeau numérique pour la maintenance de l'ouvrage.

En ce qui concerne les données géotechniques, leur structuration et format au sein des objets du cahier A, tels que définis dans ce document, faciliteront leur réemploi, dans le cadre de projets futurs pilotés par le même maître d'ouvrage, ou de désordres survenant sur un ouvrage.

Enfin, la mise en place de formats et lexiques des données géotechniques simplifiera leur transmission dans la Banque du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM (<https://info-terre.brgm.fr/>), par application du code Minier (articles L412-1 et 2). Ces données, présentées sous un format et un vocabulaire harmonisé, seront en effet plus facilement exploitables par l'ensemble des utilisateurs et contribueront à l'amélioration de la connaissance du sous-sol.

7. ANNEXES

7.1 Annexe I- Fichier de travail Pro3

7.2 Annexe 2 - Synthèse du travail d'identification des objets