



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

GT2.2 - Incertitudes et Tolérances dans le domaine de la construction

Enjeux et Définitions

Auteurs / Organismes

Pierre BENNING (Bouygues TP)
Christian DONZEL (INETUM)
Xavier GODART (INETUM)
Bertrand LE BRIS (SYSTRA)
Christelle LOISELET (BRGM)
Paul MASSON (SGP)
Emmanuel NATCHITZ (ESITC Paris)

Jean-François PAGE (Bouygues Construction)
Michel RIVES (Vianova Systems France)
Claude ROSPARS (UGE)
Pierre ROZO (INETUM)
Eric TOURNEZ (Bouygues TP)
Marc VILLIÉ (SYSTRA)

Relecteur / Organisme

Vincent COUSIN (Processus & Innovation)

Thème de rattachement : Qualification des données

MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022
LC/21/MINNDS2/028-029-030-032-099-145 & LC/22/MINNDS2/161
Juillet 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
1.1 Abréviations / Glossaire.....	3
2. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE	5
2.1 Enjeux du Groupe de Travail GT2.2.....	5
2.2 Premières définitions, contexte et périmètre	6
3. CYCLE DE VIE DE L'INFORMATION.....	9
3.1 Incertitudes à chaque étape du projet de construction	9
3.2 Représentation du monde physique par des modèles	11
3.3 Conception de l'ouvrage et simulations de ses performances	16
3.4 Construction sur site et hors site	21
3.5 Modélisations et simulations du déroulé des assemblages sur site et hors site.....	24
3.6 Montages et assemblages sur site.....	26
3.7 Modélisation des ouvrages « Tels Que Construits ».....	28
3.8 Modélisation des ouvrages « Tels Que Maintenus »	31
3.9 Modélisation des ouvrages pour simulation.....	33
4. INCERTITUDES ET RISQUES ASSOCIÉS	35
4.1 Définitions.....	35
4.2 Comment mieux maîtriser les incertitudes ?	38
4.4 Risques et Contrat	49
4.5 Contrats justes et équilibrés (Exemple FIDIC)	58
4.6 Règles de l'art, Usages et Performances.....	60
4.7 Notions de niveaux d'information	62
5. TOLÉRANCES	64
5.1 Principe des tolérances.....	64
5.2 État de l'art de la notion de tolérance	66
5.3 Tolérances prises en compte par les entreprises	68
5.4 Deux rôles clés pour la gestion des tolérances.....	71
5.5 La gestion des tolérances : une source de progrès.....	71
5.6 Modélisation des tolérances dans les outils de modélisation et d'analyse.....	72
6. CONCLUSION	78
7. ANNEXE A – GLOSSAIRE ET NOTIONS ASSOCIÉES	79
7.1 Exigences	79
7.2 Précision d'une valeur mesurée.....	79
7.3 Méthode de détermination d'une grandeur	80
7.4 Fautes - Erreurs systématiques - Erreurs accidentelles.....	82
7.5 Détermination d'une valeur conventionnellement vraie.....	84
7.6 Auscultation et monitoring	88
7.7 Cotation fonctionnelle et chaîne de cotes	90
7.8 Vocabulaire complémentaire.....	91
8. ANNEXE B – LISTE DES NORMES PRINCIPALES TRAITANT DU SUJET DES TOLÉRANCES	93
9. ANNEXE C – LISTE DES OBJECTIFS MÉTIERS ET USAGES DU BIM (MINND SI – LIV25)	95

I. RÉSUMÉ / ABSTRACT

Résumé

Ce document « Incertitudes et Tolérances / Enjeux et Définitions » est la première partie des livrables du projet de recherche MINnD concernant les notions d'incertitudes et de tolérances dans le secteur de la construction, et en particulier leur traitement et représentation numérique dans une démarche BIM.

Dans un premier temps (Chapitre 2), cette publication présente la problématique et le périmètre de l'étude, ainsi que l'ensemble des définitions des principes liés à la gestion des incertitudes dans un projet d'infrastructure. Pour en faciliter la compréhension, un glossaire (Annexe A) est inclus pour expliciter les tolérances et leur mesure dans le domaine de la construction.

Ce texte précise ensuite (Chapitre 3) la notion d'incertitude à chaque étape d'un projet, sur l'ensemble du cycle de vie des informations nécessaires à la conception, la construction et à l'exploitation-maintenance des ouvrages. Les incertitudes identifiées à chaque phase ont été abordées selon leur source, leur traitement, leur degré d'incidence sur le projet ainsi que les responsabilités des risques associés.

Le chapitre suivant (Chapitre 4) traite principalement de la gestion des risques associés aux incertitudes, leur contractualisation dans les projets de construction, ainsi que la présentation des méthodes et outils actuels utilisés pour mieux maîtriser les menaces et les opportunités induites par l'identification, l'analyse et éventuellement le traitement de ces incertitudes.

Enfin, le dernier chapitre (Chapitre 5) présente l'état de l'art concernant les concepts de tolérance et leur gestion dans les projets de construction, ainsi que les méthodes actuelles de représentation dans les logiciels de modélisation.

Le second livrable « Incertitudes et Tolérances / Qualification et Recommandations » exposera les types de représentations des incertitudes et tolérances dans l'industrie. Il propose et recommande des méthodes de représentations adaptées aux enjeux des projets de construction.

Abstract

This document "Uncertainties and Tolerances / Issues and Definitions" is the first instalment of the deliverables of the MINnD research project concerning the notions of uncertainties and tolerances in the construction sector, and in particular their treatment and numerical representation in a BIM approach.

Firstly (Chapter 2), this publication presents the problem and the scope of the study, as well as all the definitions of the principles related to the management of uncertainties in an infrastructure project. To facilitate understanding, a glossary (Appendix A) is included to explain the tolerances and their measurement in the construction field.

This text then specifies (Chapter 3) the notion of uncertainty at each stage of a project, throughout the entire life cycle of the information required for the design, construction, and operation-maintenance of structures. The uncertainties identified at each phase were addressed according to their source, their treatment, their degree of impact on the project as well as the responsibility for the associated risks.

The next chapter (Chapter 4) mainly deals with the management of risks associated with uncertainties, their contractualization in construction projects, as well as the presentation of current methods and tools used for better managing the threats and opportunities arising from the identification, the analysis, where appropriate, the treatment of these uncertainties.

Finally, the last chapter (Chapter 5) presents the state of the art concerning the concepts of tolerance and their management in construction projects, as well as the current methods of representation in modelling software.

The second deliverable "Uncertainties and Tolerances / Qualification and Recommendations" will present the types of representations of uncertainties and tolerances in the industry sector. It proposes and recommends representation methods adapted to the challenges of construction projects.

I.1 Abréviations / Glossaire

Abréviation	Signification
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (Méthode d'analyse des risques)
AMO	Assistant Maîtrise d'Ouvrage
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
CCTG / CCTP	Cahier des Clauses Techniques Générales / Cahier des Clauses Techniques Particulières
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve, Control (définir, mesurer, analyser, améliorer et contrôler)
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DPMO	Défauts Par Million d'Opportunités
DTU	Documents Techniques Unifiés
FIDIC	Fédération Internationale Des Ingénieurs Conseil
GBR	Geotechnical Baseline Report. - Rapport de référence géotechnique
gon	Abréviation de grade (degré centésimal)
mgon / dmgon	milligrade (10^{-3} grade) / déci-milligrade (10^{-4} grade)
IoT	Internet of Things (Internet des Objets – Capteurs connectés)
ISO	International Organization for Standardization
JN	Jumeau Numérique (DT : Digital Twin)
LOD	Level Of Detail (Niveau de Détail)
LOI	Level Of Information (Niveau d'Information)
LOIN	Level Of Information Need (Niveau de Besoin d'Information)
MOA	Maîtrise d'Ouvrage
MOE	Maîtrise d'Œuvre
PLM	Product Life-Cycle Management
PMBOK	Project Management Body of Knowledge (guide de gestion de projet, réalisé par le PMI)
PMI	Project Management Institute
PMR	Personne à Mobilité Réduite
PRI	Provision pour Risques Identifiés
RAG	Réaction Alkali-Granulat
RBS	Risk Breakdown Structure
RSI	Réaction Sulfatique Interne
TQc	Tel Que conçu (« c » minuscule)
TQC	Tel Que Construit (« C » majuscule)
TQM	Tel Que Maintenu

Glossaire

Un glossaire des mots du BIM est disponible sur le site internet <https://www.minnd.fr/livrables/>

Notions complémentaires

Un glossaire spécifique des mots et concepts utilisés dans les développements de ce présent livrable se trouve en Annexe A.

**Mots clés principaux
(Fra)**

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

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

Incertitude ; Tolérance ; Gestion des risques ;

Main key words (Eng)

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

**Deliverable key words
(Eng)**

Uncertainty; Tolerance; Risk management;

2. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

2.1 Enjeux du Groupe de Travail GT2.2

La nécessité de trouver des méthodes de représentation...

Tout au long du cycle de vie d'un ouvrage, de nombreuses données d'entrées sont mal connues ou incertaines (géologie, biodiversité, bâti existant...) et peuvent nécessiter une représentation indicative ou schématique.

D'autres données peuvent être parfaitement connues et précises mais leur intégration dans un modèle complet interfère parfois avec d'autres données encore incertaines. C'est le cas par exemple d'un avant-projet d'autoroute incorporant la représentation exacte des panneaux de signalisation verticale ou d'un avant-projet d'ouvrage où sont insérés des équipements manufacturés parfaitement définis.

Au fur et à mesure de l'avancement dans le développement d'un projet, la représentation des données s'affine par enrichissement du niveau de détail. Par là même, les risques diminuent au fur et à mesure de la connaissance des données du projet. Il est donc indispensable de trouver des **méthodes pour prendre en compte les incertitudes et les tolérances admissibles dans une démarche BIM.**

Pour cela, il est nécessaire de :

- les modéliser,
- les représenter,
- suivre l'évolution de leur matérialisation.

... des incertitudes...

Données, observations, mesures et, *a fortiori*, modèles du sous-sol sont entachés d'incertitudes. Ces incertitudes étant souvent difficiles à estimer, car elles concernent :

- les valeurs des paramètres,
- le positionnement, du point de mesure et de la limite spatiales des unités géotechniques.

Pourtant, certaines techniques géostatistiques permettent d'obtenir des estimations dans des contextes précis. Dans ce cas, il est important que ces indications soient prises en compte dans les différentes phases d'études, afin de permettre notamment de mieux estimer :

- leur définition (dans certains cas leur position),
- le dimensionnement des ouvrages,
- les risques associés.

La capacité à documenter cette information et à la transférer depuis les études géotechniques vers les outils de conception constitue un enjeu.

... et des tolérances

Concernant le domaine de la construction, les écarts entre la conception et la réalisation, ou entre l'existant et sa modélisation *a posteriori*, doivent être évalués et intégrés.

Cet enjeu primordial se heurte à la notion de tolérances et principalement à la capacité de les prendre en compte dans les modèles, de les représenter en 3D ou en 2D et d'échanger ces données entre les modélisateurs. Ces concepts sont rarement abordés dans la modélisation des ouvrages.

Une modélisation 3D cherche, par principe, à représenter la réalité de manière « fiable ». En effet, un modèle 3D vectoriel est très précis puisqu'il est représenté par des pixels sur un écran, sur lequel on peut zoomer à l'infini. Mais cela ne signifie aucunement que la donnée représentée est juste, puisqu'on ne représente que sa géométrie nominale, et non pas sa géométrie et ses tolérances admissibles.

Incertitudes et tolérances, deux concepts liés

Pourtant, au même titre que dans l'industrie, la prise en compte des tolérances (et des incertitudes induites) est un prérequis pour dimensionner, localiser, fabriquer et assembler les composants d'un ouvrage fini ou en cours de réalisation (temporaire).

L'incertitude représente l'approximation de la qualité d'un résultat de mesure, et donc sa pertinence et sa fiabilité. La notion de tolérance complète la notion d'incertitude pour déterminer si un résultat ou un livrable est déclaré conforme. Cette décision (conformité ou non-conformité) combine l'incertitude et son degré d'acceptabilité (tolérance). La tolérance est la marge d'erreur inévitable mais acceptable entre la valeur mesurée et la valeur nominale.

Enjeu du GT2.2 de MINnD S2

L'objectif du groupe de travail GT2.2 de MINnD S2 est de mieux comprendre les **notions de tolérances et d'incertitudes**, deux notions différentes et pourtant intimement liées. **L'enjeu principal est la diminution des risques et des aléas**, par optimisation de la qualité des données tout au long du cycle de vie des ouvrages, depuis leur conception, pendant leur réalisation, jusqu'à leur exploitation et leur maintenance, voire jusqu'à leur déconstruction.

2.2 Premières définitions, contexte et périmètre

Définition de l'incertitude

L'**incertitude** « caractérise ce qui n'est pas établi avec exactitude, ou n'est pas connu avec certitude » (Dictionnaire Larousse).

Il existe également une définition statistique de l'incertitude, variant de 0% (valeur absolument vraie) à 100% (valeur absolument fausse).

Une méconnaissance d'un objet...

L'incertitude marque l'incapacité à établir la connaissance rigoureuse de la géométrie d'un objet ou d'une de ses propriétés particulières (masse, volume). Elle peut également concerner des caractéristiques immatérielles comme une durée, une vitesse de vieillissement, etc.

... dans un contexte temporel ou physique...

L'incertitude peut également porter sur des valeurs dont la connaissance n'est réellement connue qu'à un instant donné et en un point donné, comme la température ou la vitesse du vent. L'incertitude peut aussi découler des modèles de prévision et donc concerner des événements incertains, voire non totalement prévisibles, comme les événements climatiques et leurs conséquences dans le temps (par exemple le niveau des mers et des nappes phréatiques).

... mesuré par des instruments

À cela, il faut ajouter l'incertitude liée aux capteurs et aux instruments de mesure, qui peuvent se combiner à d'autres incertitudes, qu'elles soient géométriques ou non. L'incertitude associée à l'instrument de mesure et du capteur doit être établie et intégrée à la mesure-même.

Définition de la tolérance

La **tolérance** est l'« intervalle défini par rapport à une dimension théorique, à l'intérieur duquel doit se trouver la valeur mesurée pour que cette dernière puisse être considérée comme correcte » (Dictionnaire Larousse, et pour le domaine technique).

En d'autres termes, une tolérance est une contrainte d'acceptabilité qui est associée à une valeur, pour respecter des exigences techniques ou fonctionnelles.

Risques décisionnels liés à l'inexactitude

Pour les personnes chargées de prendre des décisions, la méconnaissance de la réalité physique exacte d'un ouvrage et de son contexte réel, présent et futur, génèrent de nombreuses

<p>Méconnaissance du contexte</p>	<p>difficultés, avec la perspective de prendre de mauvaises décisions, voire de ne pas pouvoir prendre de décision du tout.</p> <p>Imaginer et concevoir un ouvrage dans son contexte impose une connaissance suffisante de ce contexte, sans nécessairement en connaître tous les détails, mais avec un niveau d'informations convenable et suffisant pour établir un avant-projet réaliste. Ensuite, pendant le développement du projet, la connaissance du contexte augmente et autorise à faire des choix et à prendre les décisions idoines concernant l'ouvrage à construire et les méthodologies à employer pour le réaliser.</p>
<p>Information méconnue ou inconnue</p>	<p>Le niveau d'information sur le contexte dépend des campagnes de mesures réalisées, de la maîtrise des incertitudes sur ces mesures et de la façon de les modéliser. Lorsqu'il s'agit d'évaluer une situation existante, il est important de souligner que l'incertitude sur une information doit être « bornée » (c'est la notion de tolérance). L'incertitude d'une mesure peut être équivalente à quelques pourcents de la valeur de la mesure, voire à 30 ou 50%, mais elle ne peut pas être supérieure à 100% (incertitude totale). Dans le cadre du présent document, à un niveau d'incertitude de 100%, nous préférons parler d'information inconnue plutôt que de mesure incertaine. Nous devons en effet admettre que parfois il n'est pas possible ou très difficile de mesurer un existant (en particulier dans le domaine de la géologie et du sous-sol).</p> <p>Distinguer les notions d'incertitude et d'inconnue est important techniquement et peut s'avérer crucial contractuellement et financièrement.</p>
<p>Exemple de méconnaissance du contexte</p>	<p>Des incertitudes élevées sur la connaissance du contexte pourraient, par exemple, amener à sous-dimensionner les fondations d'un ouvrage ou à employer des outils inadaptés pour sa construction. Si les informations sur le sous-sol sont absolument inconnues, il devient difficilement envisageable de poursuivre sans une étude approfondie de ces fondations.</p>
<p>Incertitudes sur l'ouvrage livré</p>	<p>Par ailleurs, les incertitudes affectent aussi l'ouvrage définitif construit.</p> <p>L'ouvrage réalisé respecte plus ou moins les plans établis. Ceci s'explique par de nombreux phénomènes comme la précision des outils de mesure utilisés, les déformations des outils et ouvrages temporaires de retenue ou de soutènement, mais aussi par les erreurs humaines toujours possibles lors de l'exécution et des mesures. Ainsi, l'ouvrage construit ne correspond jamais avec exactitude aux modèles numériques et aux plans établis par les concepteurs : les écarts peuvent être de l'ordre du millimètre, voire de quelques centimètres.</p>
<p>Incertitudes sur l'ouvrage en exploitation</p>	<p>De plus, l'ouvrage vieillit et est soumis à des pathologies qui affectent ses capacités portantes. Il existe de grandes disparités de comportement des ouvrages dans le temps, avec des désordres liés à :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'oxydation des aciers, • le fluage du béton, • les pertes de câbles de précontrainte, • le tassements des fondations, • la perte de tension des haubans porteurs, • l'augmentation du trafic routier et donc à l'augmentation des chargements, • ...
<p>Tolérances et limites</p>	<p>Lorsque la pathologie est identifiée, il est nécessaire de modéliser l'évolution moyenne de la pathologie (avec des incertitudes sur cette évolution) et de faire des contrôles avec des jalons temporels. Les pathologies des ouvrages d'art sont principalement liées à un manque d'entretien.</p> <p>Plusieurs questions immédiates apparaissent alors :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quels types de défauts et d'écarts pouvons-nous admettre ? • Quelles sont les valeurs maximales admissibles pour ces écarts ?

Incertitudes liées à la phase du projet

Nous abordons là le domaine des tolérances, c'est-à-dire la démarche qui vise à **fixer des limites aux imperfections inhérentes** à nos méthodologies de construction et aux matériaux utilisés, mais aussi aux incertitudes et inexactitudes de nos mesures.

Les incertitudes sur les informations n'ont pas le même impact selon la phase du cycle de vie du projet, et selon les usages métiers qu'elles concernent. Le présent document vise ainsi à identifier les situations où les informations présentent un caractère incertain, afin que les personnes en charge de prendre des décisions puissent mieux **appréhender les risques et les enjeux associés à leurs décisions**.

Aussi, nous nous attacherons à analyser ces situations et les différents cas d'usage associés.

Cycle de vie du projet

Nous expliquerons et détaillerons les concepts d'incertitudes et de tolérances, dans le domaine de la construction, tout au long des processus de conception, de construction, de livraison, de mise en service, d'exploitation et de maintenance de l'ouvrage.

Acteurs du projet

Le sujet des incertitudes concerne l'ensemble des acteurs du processus de conception, de planification, d'estimation financière, de construction de l'ouvrage, de son exploitation et de sa maintenance. Ce sujet concerne non seulement les architectes et les ingénieurs par ses aspects techniques, mais aussi les juristes, les clients et les assureurs, par ses aspects contractuels. Chaque partie prenante au projet doit percevoir l'importance de pouvoir décrire dans les pièces écrites, les engagements réciproques entre acteurs que ces notions entraînent.

Cependant, nous ne traiterons pas les incertitudes liées aux budgets, même si celles-ci peuvent être des conséquences directes du sujet traité.

Technologies et outils

Nous étudierons les technologies et les outils numériques qui nous permettent de mieux gérer les incertitudes, de mieux maîtriser les tolérances de fabrication afin, in fine, de répondre aux exigences d'amélioration de la qualité des études et des ouvrages, pour l'efficacité générale du projet et des travaux.

Incertitudes des données du Système « à faire » et du Système « pour faire »

Dans le chapitre 3 suivant, nous aborderons la représentation des incertitudes dans les données décrivant le système « à faire » (c'est-à-dire le produit ou l'ouvrage à réaliser).

Dans le chapitre 4, nous aborderons la représentation des incertitudes et les risques associés dans les données décrivant le système « pour faire », c'est-à-dire l'organisation réalisant le projet, les ressources et moyens de maîtrise des incertitudes que celles-ci portent sur le système « à faire ».

3. CYCLE DE VIE DE L'INFORMATION

3.1 Incertitudes à chaque étape du projet de construction

Travaux préliminaires : UC6 de MINnD SI

Le cycle de vie de l'information d'un projet de construction a été documenté lors de la Saison 1 du projet national MINnD, notamment dans le livrable du groupe de travail UC6 intitulé « Flux de données, modèles et historisation des données d'infrastructures et environnementales ». Nous y découvrons les très nombreux échanges d'informations et les très nombreux acteurs, émetteurs et récepteurs, de ces informations. Il est aussi expliqué que des erreurs sur les informations peuvent s'immiscer pendant ces échanges.

Notions non abordées dans MINnD SI

Toutefois la notion d'incertitude n'a pas été abordée dans MINnD Saison 1. En effet, il avait été établi que lorsque deux acteurs s'échangent une information sur la géométrie d'un objet ou bien une valeur concernant une propriété, il est rarement précisé quelles sont les incertitudes associées. Cette notion est donc approfondie dans ce nouveau livrable, afin d'estimer la nécessité ou non de préciser les incertitudes associées aux informations échangées.

Parcours de l'information

Reprenons de façon synthétique le parcours de l'information entre le monde « réel » et ses diverses représentations, et observons à quel moment les incertitudes apparaissent. Le schéma suivant illustre le parcours de l'information tout au long du cycle de vie d'un projet.

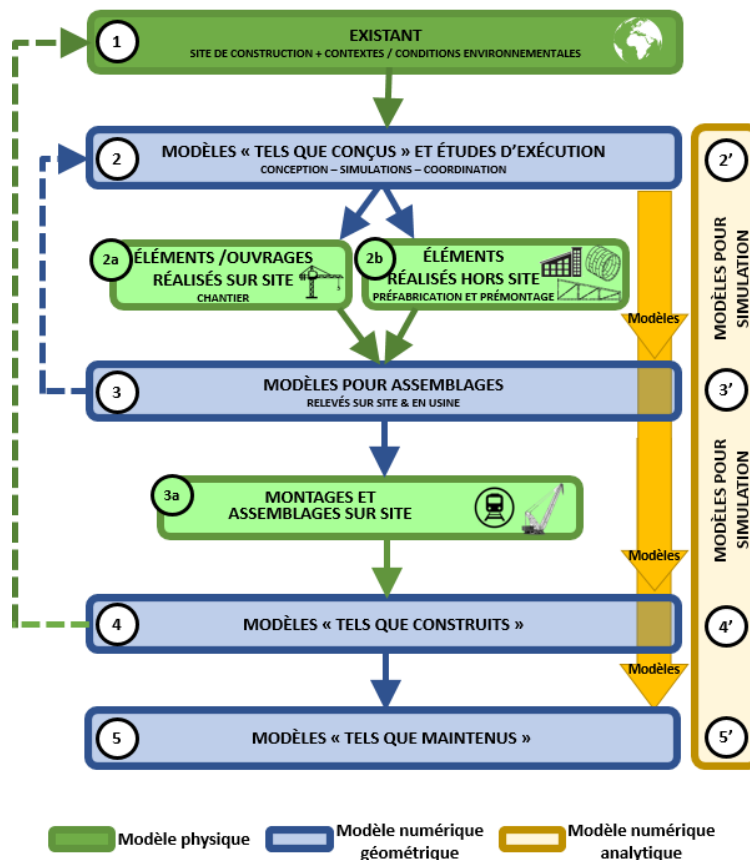


Fig.1 : Le parcours de l'information et ses représentations

Le monde « réel »

Le monde existant « réel » (élément n°1 sur la Fig.1) est constitué par :

- le contexte existant avant l'exécution du projet (le site de la construction et son contexte lié aux conditions environnementales),
- l'ouvrage en construction, à réparer ou à rénover, en tenant compte de la phase de réalisation des travaux (la flèche verte en pointillé explique les itérations nécessaires pour prendre en compte l'ouvrage au fur et à mesure de sa construction).

Les représentations du monde réel

Les représentations et les modèles conceptuels (éléments bleus 2, 3, 4 et 5 sur la Fig.1) du monde réel sont de deux natures :

- la représentation du contexte existant, complétée par la modélisation du futur ouvrage dans son contexte,
- la représentation de l'ouvrage « Tel Que Construit » à laquelle il est possible d'ajouter des données dynamiques concernant ses usages et ses performances (températures, taux d'occupation, trafic, déformations...).

Ces représentations sont reliées entre elles par des flèches jaunes « Modèles » qui se justifient par l'élaboration progressive de ces modèles conceptuels tout au long du cycle de vie du projet et de l'information associée, en fonction des usages et des niveaux de développement du projet.

Modèle analytique et modèle géométrique

Un **modèle analytique** (ou modèle de calcul) est une représentation exacte de la description complète d'un modèle physique structurel, réalisée à l'aide d'équations mathématiques. Il permet de faire des calculs de structure, des simulations et des optimisations dans le but de dimensionner l'ouvrage à réaliser.

Le modèle analytique s'appuie généralement sur un **modèle géométrique** (ou modèle architectural) qui représente la géométrie complète de l'ouvrage, c'est-à-dire ses dimensions et sa localisation, mais aussi sa décomposition en objets complétés de données attributaires (propriétés des matériaux, masse...). Ce modèle géométrique statique est généralement approché, car la géométrie est variable en fonction de phénomènes externes (changement de température, déformation sous chocs ou poids propre...).

Les incertitudes à chaque étape de la progression de l'information

Le schéma en Fig.1 montre la progression de l'information entre le monde « physique » et ses représentations, avec une alternance entre physique et numérique. Cette illustration montre également que la question des incertitudes apparaît distinctement dans trois étapes :

- la représentation du monde physique par des modèles et des valeurs numériques : c'est le **passage du réel à sa modélisation théorique** (cases vert clair et vert foncé vers cases bleues),
- la construction d'un ouvrage à partir de modèles et de valeurs numériques : c'est le **passage du concept au réel** (cases bleues vers cases vertes),
- la représentation de l'ouvrage « Tel Que Construit », la mesure des usages et de ses performances par des modèles numériques et par des essais de réception ou de performance : c'est le **confrontation du réel au concept**.

Chaque « passage » est empreint d'incertitudes

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'incertitude marque l'incapacité à établir la compréhension rigoureuse et la maîtrise exacte de la géométrie d'un objet, d'une entité ou de l'une de ses propriétés particulières : **chaque passage entre mondes physiques et modèles numériques est donc imprégné d'incertitudes**.

L'évolution des incertitudes

Les incertitudes accompagnent donc les acteurs et les décideurs tout au long du projet, sans oublier que ces incertitudes :

- augmentent parfois, par addition, voire multiplication des valeurs (par exemple, le non-respect de tolérances sur des éléments assemblés),

- devraient diminuer, par une meilleure connaissance du contexte (par exemple à la suite de sondages complémentaires) ou une meilleure connaissance du comportement (par exemple avec des capteurs qui réduisent les incertitudes en apportant une nouvelle mesure).

3.2 Représentation du monde physique par des modèles

<p>Le site environnant la construction</p> <p>Livrables de MINnD Saison I</p>	<p>La première étape du projet consiste à modéliser le monde physique existant, c'est-à-dire le site et le milieu réels dans lequel l'ouvrage vient s'intégrer.</p> <p>On distingue deux types de contexte :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le contexte lié à l'activité humaine : Le bâti hors et sous-sol, les réseaux, l'activité économique, les services publics et de sécurité... • Le contexte naturel : la biodiversité, le sol, le sous-sol, les cours d'eau et nappes phréatiques... <p>La représentation du contexte du site de construction a été largement abordée dans les livrables du projet national MINnD Saison 1 (disponibles sur le site internet www.minnd.fr/livrables »). Pour rappel, les livrables concernés sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • MINnD_TH03_UC06_01_Infrastructure_Environnement. • MINnD_TH03_UC06_02_Analyse_critique_outils_existants. • MINnD_TH03_UC06_03_Processus_etude_enjeuxenvironnementaux. • MINnD_TH03_UC06_04_Flux_modeles_historisation_donneesenvironnementales.
<p>Le monde physique existant</p>	<p>Ce monde physique existant s'analyse en deux parties faisant appel à des ressources technologiques différentes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le visible. • Le non-visible.



Fig.2 : Représentation du monde existant par des modèles numériques

<p>Le visible</p>	<p>La partie visible (hors sol, hors ouvrage bâti, hors objet) du contexte peut être relevée par des technologies numériques éprouvées, puis traitée et modélisée par des experts du métier. Des textures ou des orthophotographies peuvent être appliquées aux surfaces du terrain naturel, ce qui permet une représentation visuelle assez fidèle de la réalité.</p>
--------------------------	--

Les forages d'exploration sont positionnés. (d'après Gabalda S., 2008³)

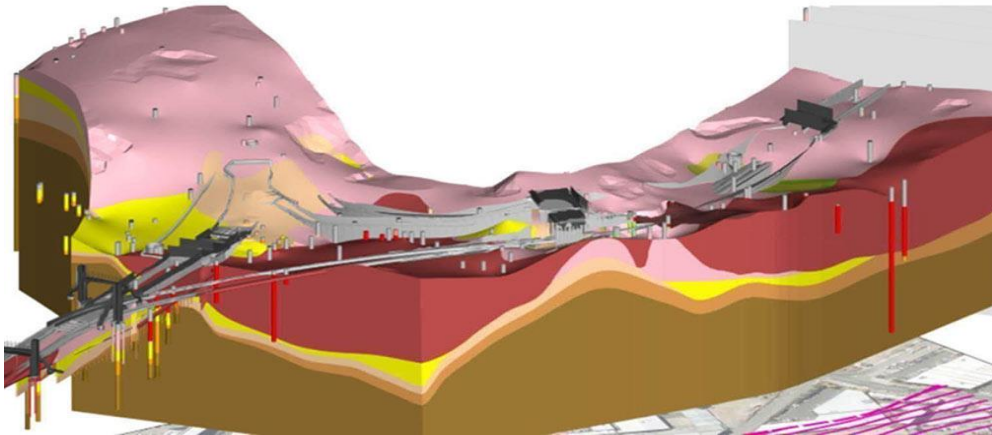


Fig.5: Coupe géologique issue de la modélisation tridimensionnelle de la zone au regard des données d'acquisition (le long des forages ; des observations de terrain et de la carte géologique de la zone). Il s'agit du résultat du travail de terrain assisté de la modélisation 3D comme aide à la décision en termes de géologie structurale (© www.tunneltalk.com)

Banque du sous-sol du BRGM

Généralement, en phase commerciale comme en phase préliminaire d'études, les relevés géotechniques s'appuient sur des sondages peu rapprochés, voire dans un périmètre assez éloigné de l'enveloppe du projet. Il peut s'agir également de sondages déjà réalisés précédemment (surtout dans les grandes villes où les informations sont disponibles gratuitement sur le site du BRGM⁴ à travers la Banque du sous-sol consultable depuis la plateforme de diffusion du BRGM des données géoscientifiques du sous-sol national⁵.

Ces sondages géologiques permettent à partir d'une information géologique discrète de disposer d'une information continue par interpolation des données selon un profil (coupe) géologique (Fig.4) ou un modèle géologique tridimensionnel (Fig.5)⁶. Ces sondages permettent les évaluations des types de matériaux en tout point de l'espace du sous-sol, et d'obtenir le volume de matériaux à traiter ou excaver au regard de leur qualité ou quantité. Ce ne sont que des indications qui seront remises en question lors de la passation du marché, et qui font l'objet d'une évaluation des risques pour le bon déroulement et le coût des travaux.

Représentation du sous-sol

Sur la représentation Fig.6 ci-dessous, issue d'un document d'appel d'offre pour le Grand Paris Express, les différentes couches de matériaux sont représentées approximativement par des couleurs (interpolation linéaire entre deux sondages à proximité du corridor du projet). Cette représentation permet d'obtenir une première approche qualitative et quantitative des matériaux rencontrés, de façon à estimer :

- les tassements potentiels,
- le soutènement provisoire à mettre en œuvre,
- les volumes de matériaux à extraire,
- les volumes à traiter,
- ...

³ Sunsearé Gabalda. Processus d'exhumation dans les Alpes occidentales : modélisation géométrique et reconstitution géodynamique sur la transversale Chartreuse-Maurienne, une approche multi-échelle. Sciences de la Terre. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008. Français. NNT : 2008ENMP1607. pastel-00005248

⁴ BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Service géologique national français www.brgm.fr)

⁵ <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>

⁶ La distinction entre un modèle 2D (coupe) et un modèle 3D (volume) est la précision et la justesse des informations lorsque l'on s'éloigne de l'axe, mais aussi aux méthodes pour obtenir ces modèles : on peut produire un nombre infini de coupes 2D à partir d'un modèle 3D, mais il faut plusieurs coupes 2D pour produire un modèle 3D.

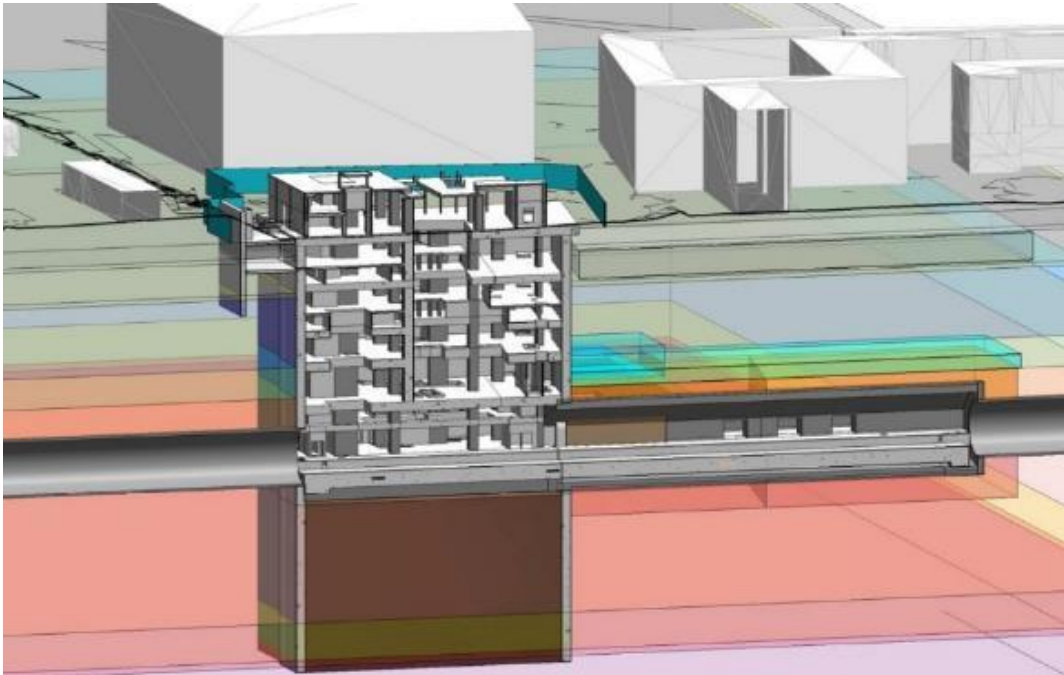


Fig.6 : Représentation en coupe d'une gare du Grand Paris Express, avec son contexte géologique approximatif

Autres inconnues

Mais les plus grandes inconnues concernent des données mal estimées ou peu prévisibles, liées particulièrement aux :

- phénomènes anthropiques,
- catastrophes naturelles,
- changements climatiques,
- évènements météorologiques...

Ces incertitudes affectent significativement le contexte (impacts environnementaux) et donc les projets sensibles en zone à risque (bord de mer, bordure de cours d'eau, zone montagneuse, zones sismiques...).

Les données d'entrées

Les données d'entrée qui permettent de **modéliser l'existant** sont généralement basées sur des :

- modèles prédictifs calculés (Fig.5 par exemple) à partir de nombreuses données recueillies pendant de longues périodes (banques de données publiques accessibles en openData (par exemple la banque du sous-sol du BRGM pour les données nationales françaises),
- modèles prédictifs calculés à partir de données dynamiques en temps réel,
- combinaisons de modèles interpolés et de connaissances, souvent interprétées par des experts (comme des données géologiques obtenues par des sondages),
- relevés physiques et numériques réalisés ponctuellement pour les besoins spécifiques d'un projet (sondages, essais de convenue⁷, mesures de contrôle de positionnement, relevés numériques...),
- lois physiques et lois de comportement des matériaux constitutifs,

⁷ Essais de convenue : Ensemble d'essais ayant pour but de vérifier a priori qu'un béton - défini par sa formulation et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier - satisfiera aux exigences précisées dans le marché. Cette épreuve n'est pratiquée que pour les ouvrages de génie civil.

<p>Qualification de la donnée</p>	<ul style="list-style-type: none"> plans ou documents techniques des avoisinants (réseaux, structures, ouvrages, fondations...), données des fournisseurs de matière et de matériaux, ... <p>La donnée, qui est un élément brut non interprété, est qualifiée avec les termes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> Inconnue : donnée manquante. Inconsistance : contradiction entre deux sources de la même donnée. Imprecision : approximation de la valeur donnée (« environ X mètres »). Incomplétude : toutes les informations ne sont pas renseignées. Incertitude : données existantes mais non certaines (qualité non vérifiable, source inconnue ou peu fiable, voire erronée). <p>Généralement, seules les données sont conservées, rendant la qualification des dites données problématique.</p> <p>La qualification de la donnée se base sur des paramètres comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> des mesures relatives de distance, la température absolue ou relative, la précision des capteurs, ...
<p>Incertitudes il</p> <p>Sources</p> <p>Constat</p> <p>Degré d'incidence</p> <p>Responsabilité du risque associé</p>	<p>Les incertitudes liées à la connaissance de l'existant sont caractérisées par les aspects décrits ci-après.</p> <p>Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> Contexte bâti (construit par l'homme). Contexte environnemental (non construit par l'homme, grottes karstiques...). Transformation du contexte environnemental par l'homme (mines souterraines...). Données climatiques et météorologiques (qui peuvent affecter le contexte). <p>Ces incertitudes sont en partie atténuées par :</p> <ul style="list-style-type: none"> Relevés numériques (géométrie et tolérances associées). Relevés physiques (caractéristiques des matériaux). Plans et modèles existants. Schémas de systèmes existants. Statistiques et prévisions numériques météorologiques et climatiques. <p>L'incidence de l'incertitude est liée aux critères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> Conservation et accessibilité de l'information (stockage de la connaissance). Évaluation des risques associés. Interdépendance des incertitudes entre elles. Expertise des analystes pour analyser des résultats complexes et les traduire en informations concrètes. <p>Le risque associé est décrit dans le contrat, car il dépend du choix stratégique du Maître d'ouvrage. Ces responsabilités sont indiquées dans les CCTP.</p>

3.3 Conception de l'ouvrage et simulations de ses performances

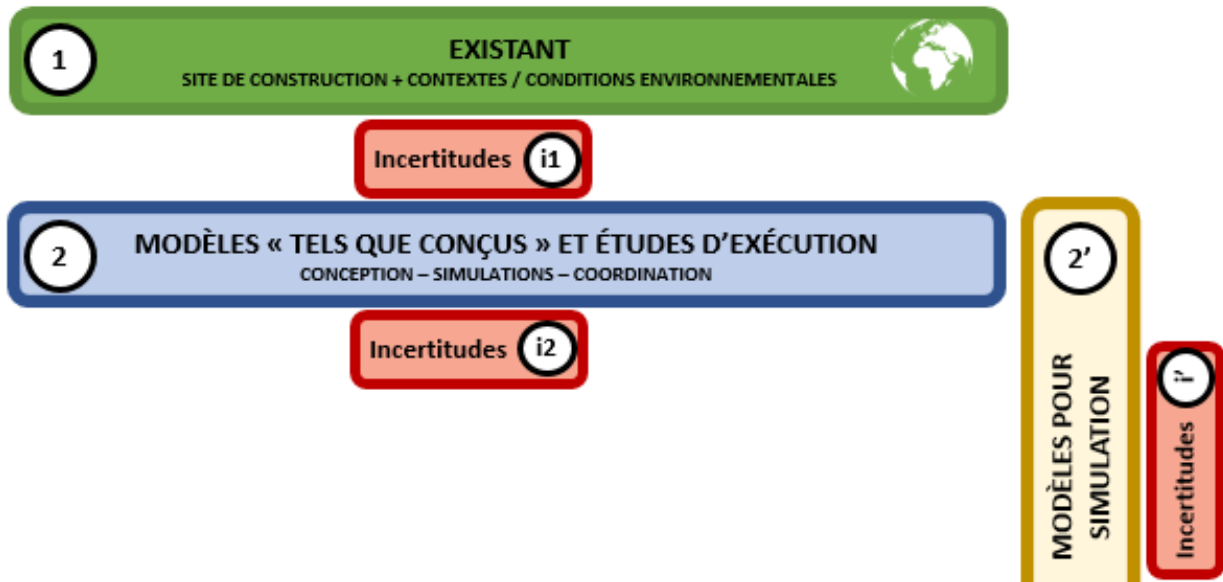


Fig.7 : Conception de l'ouvrage et simulation de ses performances

Tolérances

Géolocalisation des ouvrages

Pendant les différentes phases de conception, il faut d'abord tenir compte des **tolérances de construction** des ouvrages. Il est important de souligner que les ouvrages sont réalisés sur site (à l'extérieur ou sous terre, mais rarement dans une usine, sauf pour certains éléments préfabriqués ou modules assemblés sur site).

La géolocalisation des ouvrages est un des aspects les plus complexes, étant donné les différents repères (illustrés sur la Fig.8), utilisés pour positionner les objets et les systèmes qui composent les ouvrages :

- **Relatif** (référentiel local, par rapport à des points fixes identifiés), pour une implantation locale.
- **Absolu** (référentiel topographique, dans un système géodésique), pour un positionnement global.
- **Alignement linéaire** (PK Point kilométrique sur l'axe de l'ouvrage, appelé aussi abscisse curviligne), pour un positionnement le long de l'alignement de l'infrastructure avec un éventuel décentrement ou écart à l'axe.

Il est nécessaire d'assurer la cohérence et la précision pour assurer la confiance lors des changements de repères. En effet, le passage d'un type de repère à l'autre entraîne systématiquement des erreurs, dont les écarts admissibles doivent être fixés par des tolérances. Ces tolérances doivent donc être pris en compte pendant les différentes phases de conception des ouvrages et des systèmes.

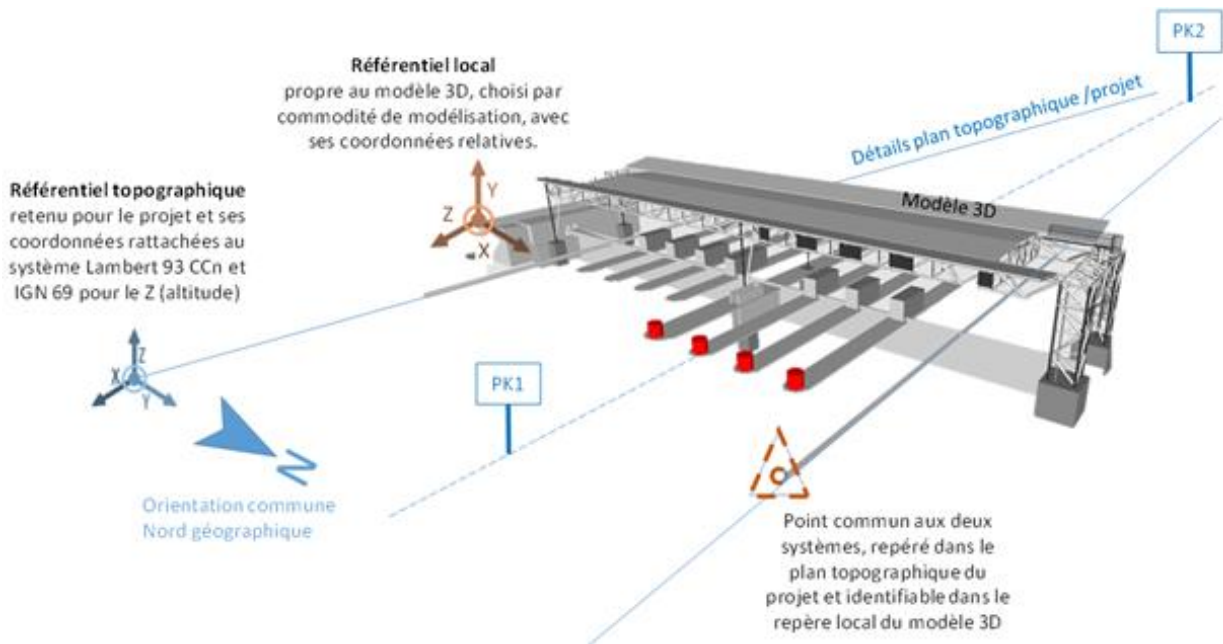


Fig.8 : Les différents repères utilisés (MINnD – Livrable 25 « Guide Application BIM Infra »)

Composants préfabriqués et équipements manufacturés

Les objets manufacturés ou préfabriqués font également l'objet de tolérances de fabrication ou de déplacements relatifs (déformations) pendant leur mise en œuvre sur site. Ces tolérances doivent être identifiées et valorisées dès les phases de conception (et indiquées dans le CCTP du projet), afin d'anticiper les solutions pour corriger les écarts observés.

On tiendra compte en particulier des :

- tolérances initiales de fabrication,
- combinaisons d'assemblage (chaîne de cotes),
- déplacements relatifs sous poids propre (par exemple, les flèches des charpentes métalliques) ou précontrainte (pré-tension, post-tension) ou encore exploitation (chargements pendant la construction ou pendant l'exploitation des ouvrages),
- éléments à comportement non linéaire, dont la géométrie résulte des efforts appliqués (par exemple, les câbles de suspension d'un ouvrage d'art).

Déplacements relatifs pendant la phase de construction

Il est à noter que les phases de constructions sont parfois plus « dimensionnantes » que la phase d'exploitation. En effet, les chargements appliqués pendant les séquences temporaires de construction (objets en porte-à-faux, poids des engins de construction) alors que les éléments construits ne présentent pas encore leurs caractéristiques définitives, sont parfois plus contraignants que les chargements appliqués sur l'ouvrage fini en exploitation.

Incertitudes et erreurs

Certaines données d'entrée des logiciels de calculs et de simulations intègrent des hypothèses qui relèvent de :

- les performances attendues (chargements maximaux autorisés, valeurs nominales et extrêmes, conditions d'utilisation...),
- la méthodologie de construction (chargements temporaires...) et phasage,
- les réglementations internationales et locales,
- le CCTP du projet.

Modèles mathématiques et physiques spécifiques

La conception et les simulations sont donc établies dans des **conditions supportées optimales** et avec les réglementations en vigueur au moment de la conception du projet, appliquées sur des parties d'ouvrage, dans des phases de construction temporaires ou précises, puis dans la phase d'exploitation.

De nombreuses incertitudes demeurent malgré tout, et de nombreux coefficients sont prévus par les codes ou spécifiquement au projet et sont alors appliqués pour atténuer ou supprimer les risques identifiés.

De plus, les simulations peuvent être réalisées par des bureaux d'étude différents et doivent donc être coordonnées afin de vérifier l'adéquation des modèles et des résultats entre eux.

La représentation par un modèle numérique ou une maquette physique introduit ses propres types d'incertitude.

On peut citer les simulations sur maquettes physiques à échelle réduite :

- mouvements maritimes en canal à houle,
- effets du vent en soufflerie,
- essais en centrifugeuses...

Il faut aussi tenir compte des limites des calculs numériques et des erreurs de :

- modélisations, c'est-à-dire la négligence de paramètres insignifiants sur des modèles de petites dimensions appliqués à des ouvrages de très grandes dimensions,
- effets statiques et effets dynamiques (résonance, amortissement, amplification...),
- mesures,
- interprétations.

Exemple de stabilité d'une infrastructure en béton armé

Préparation des données pour la simulation

Pendant le processus de calcul de stabilité d'une infrastructure en béton armé, les incertitudes peuvent résulter de plusieurs facteurs, liés aux données, aux calculs, à l'analyse des résultats, mais aussi à l'interopérabilité entre les outils.

Le déroulé ci-dessous explique chacun de ces facteurs.

- Lors de la préparation des données pour la simulation les paramètres et variables du modèle (comme le module de Young, le coefficient de Poisson, la masse volumique...) sont issues d'essais de caractérisation matériau (traction, flexion ...). Une incertitude liée à la mesure est introduite dans ce cas et à sa propre variabilité pour un matériau donné, celle-ci peut être facilement déterminée (précision de mesure du matériel utilisé et type de matériau et méthode de fabrication).
- Lors de l'import des pièces, une incertitude est présente :
 - d'une part due à l'idéalisme des pièces conçues, car on ne peut tenir compte de la tolérance des pièces lors du processus de modélisation,
 - d'autre part, les hypothèses de simplification du modèle (liées à la symétrie, la périodicité, la proximité, etc.) et le choix du partitionnement des pièces, la définition des propriétés des pièces et leurs assemblages introduisent eux aussi des incertitudes.
- Une autre source de non-linéarité et entraînant des incertitudes pour la résolution du problème est le choix du type de loi de comportement pour la modélisation du béton armé. Plusieurs théories existent et continuent d'apparaître mais ne sont ni idéales ni faciles d'application⁸.

⁸ **Remarque** : contrairement au cas linéaire, il n'existe pas de modèle non-linéaire unique pour la modélisation du béton. Plusieurs théories existent et continuent d'apparaître, aucune n'étant parfaite. Aucun modèle ne peut être validé

Réalisation du calcul

- La non-linéarité de type « conditions aux limites » entraîne des incertitudes, en fonction de ce que veut modéliser l'utilisateur. Cette non-linéarité est présente à travers la définition de contacts, de frottements et de conditions d'appuis du modèle. D'autre part, comme pour les conditions aux limites, la définition des cas de charge, des interactions et des liaisons internes peut aussi dans ce cas engendrer des incertitudes qui sont liées à l'interprétation de l'utilisateur.
- Lors du processus de discrétisation par maillage en éléments-finis, l'incertitude peut être maîtrisée et les erreurs de maillage peuvent être corrigées. Le choix du pas de temps peut également influencer sur la précision des calculs et être une cause d'incertitudes.
- On peut, avant de lancer le calcul, choisir ou non de tenir compte des non-linéarités géométriques, cela consiste à tenir compte ou non des grands déplacements (linéaires ou rotations) lors du processus de résolution du modèle.
- Lors du processus de calcul, la principale source d'incertitudes est le choix du type de résolution du problème impliquant un solveur, qui peut être de deux types :
 - un premier dédié aux analyses statiques, de dynamique linéaire, thermiques et à certains couplages multi-physiques,
 - un second dédié aux analyses dynamiques transitoires brèves type crash et aux analyses quasi-statiques ainsi qu'à certains couplages multi-physiques.
 On peut avoir des différences de résultats entre deux solveurs pour un même modèle lié à la méthode de résolution employée.
- Il est important de vérifier à la fin du calcul la convergence numérique, elle permet de vérifier le bon déroulement de la simulation.

Remarque : Le calcul non-linéaire implique :

- un modèle de béton (loi de comportement),
- un algorithme de résolution non-linéaire,
- un temps de calcul résultant bien plus important.

Le bon choix des deux premiers ingrédients constitue un élément clé pour la réussite de telles analyses dans le cadre de gros modèles complexes. Autrement dit, avoir un modèle de béton sophistiqué n'est pas d'une grande utilité s'il est utilisé avec un algorithme de résolution standard incapable de gérer les instabilités locales dues à l'adoucissement du béton. L'inverse est également vrai pour un algorithme de résolution performant et un modèle de béton standard ne pouvant pas traiter les aspects complexes fondamentaux du matériau béton. La combinaison « bon modèle de béton / bon algorithme de résolution » est malheureusement rare au niveau des analyses par éléments finis des structures en béton armé. Elles constituent malgré cela une condition nécessaire et non suffisante pour la conception de structures complexes.

Exploitation et analyse des résultats

Il est nécessaire d'interpréter de manière critique les résultats obtenus (pertinence, complétude, etc.) et éventuellement d'étudier la possibilité d'une vérification complémentaire des résultats. Les incertitudes portent alors sur :

- Extrapolation des analyses et incertitudes entre le résultat brute et l'analyse déduite.
- Incertitude de contextualisation : « cas simulé versus cas en contexte ».

d'une manière définitive, il ne peut être qu'invalidé (Babuska et Oden 2004). De plus, il existe plusieurs paramètres d'entrée possibles pour chaque modèle, certains ne sont pas facilement mesurables, la plupart constitue des variables aléatoires dont la variabilité est importante.

<p>Contraintes liées à l'interopérabilité entre les outils</p>	<p>Il est important de choisir un outil de simulation permettant une interopérabilité des fichiers en entrées et sorties avec des solveurs pour différents modèles (statique, dynamique linéaire, dynamique non linéaire, etc.). En effet, les transferts et les échanges de données d'un format vers un autre sont toujours sujets à simplification et à interprétation, et sont donc sources d'erreurs et donc d'incertitudes.</p>
<p>Incertitudes i2 et i2'</p> <p>Sources</p> <p>Constat</p> <p>Degré d'incidence</p> <p>Responsabilité du risque associé</p>	<p>Les incertitudes liées à la connaissance de l'existant sont caractérisées par les aspects décrits ci-après.</p> <p>Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Données d'entrée (fiabilité / hétérogénéité des matériaux...). • Accès au site (pour relevés). • Budget alloué (sondages géotechniques et autres). • Durée planifiée nécessaire et suffisante pour effectuer les sondages. • Connaissance de la topographie et de l'alignement du projet. • Méthodes de construction. • Incertitudes géologiques et géotechniques, intrinsèques voire celles liées à la méthode d'interpolation ou d'extrapolation. • Recours de parties prenantes externes (protection biodiversité, protection cadre de vie, recours juridiques...). • Projets concomitants ou concourants (contexte et coactivité mal connus). <p>Ces incertitudes sont en partie atténuées par des :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relevés complémentaires de mesures et des contrôles qualité. • Rétro-modélisation (saisie de la géométrie et de la localisation des objets existants). • Rétro-engineering (définition et fonctionnement des systèmes existants). <p>Pour lever le maximum d'incertitudes, il faut donc diminuer les écarts entre la connaissance générée (hypothèses et données d'entrée) et le comportement réel.</p> <p>Le degré d'incidence de l'incertitude est lié aux types d'incertitudes identifiées. Certaines incertitudes demeurent et doivent faire l'objet d'une analyse de risques, afin de faire des provisions budgétaires et temporelles pour traiter ces risques.</p> <p>Le risque associé doit être décrit dans le contrat, car il dépend de la stratégie du Maître d'ouvrage ou du Maître d'œuvre.</p> <p>Ces derniers font appel à des organismes de contrôles externes (et donc indépendants) afin de réaliser des constats sur les incertitudes identifiées et risques rencontrés.</p>

3.4 Construction sur site et hors site

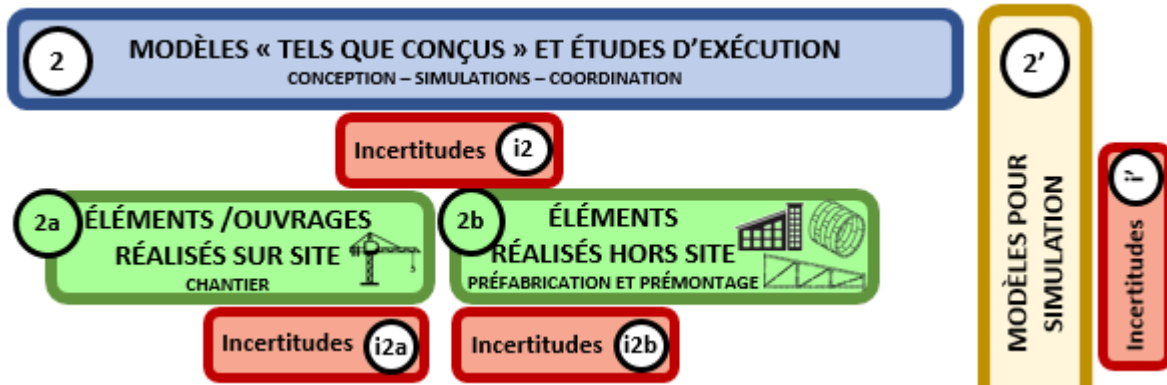


Fig.9 : Construction sur site et hors-site

Tolérances d'exécution

Le non-respect des tolérances dimensionnelles est fréquent dans la construction, car la réglementation n'est pas très stricte en la matière (Voir Chapitre 5.1).

Pour le génie civil, les documents de références sont principalement :

- La norme NF EN 13 670⁹ sur l'exécution des structures en béton.
- Le DTU 21¹⁰ sur l'exécution des ouvrages en béton.

Ces documents exposent les différents types de tolérances rencontrés. Ils précisent également les valeurs de tolérances dans certains cas.

En plus de ces documents de références, il faut tenir compte des règles de l'art.

Règles de l'art

Les règles de l'art correspondent à l'état de la technique au moment de la réalisation de l'ouvrage ou de la prestation (voir aussi Chapitre 4.6). Ces règles sont composées de tout un ensemble de pratiques professionnelles qui sont à respecter et spécifiques à chaque domaine, ceci afin que les ouvrages ou les prestations soient correctement réalisés. Les règles de l'art sont des obligations implicites. Leur non-respect constitue une faute de nature à engager la responsabilité contractuelle de leur auteur.

Tolérances sur site (2a)

Quelle que soit la complexité d'un projet, la topographie est nécessaire à toutes les étapes. Les compétences topographiques sont soit directement mises en œuvre par un topographe de métier, soit intégrées dans les équipes terrain par délégation à une personne formée aux techniques de base et à la manipulation des instruments.

À toutes les étapes, ces techniques sont mobilisables :

- Au démarrage des travaux pour :
 - mettre en place le référentiel topographique et/ou géodésique dans les 3 dimensions,
 - créer le réseau de points d'appui et le matérialiser sur le terrain,
 - transmettre les éléments pratique pour positionner les éléments d'implantation de la construction et le suivi des travaux.
- À l'avancement des travaux pour :

⁹ AFNOR, 2013, NF P18-450, NF EN 13670 : Exécution des structures en béton.

¹⁰ AFNOR, 2017, (DTU 21) NF P18-201, NF DTU 21 : Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton – Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types.

<p>Gestion des tolérances</p>	<ul style="list-style-type: none"> - valider la position des éléments les uns par rapport aux autres, et dans leur contexte, dans le respect des systèmes cartographiques (dans les 3 dimensions), - implanter ou tracer les éléments constructifs selon les prescriptions fournies pour les équipements spécifiques dans le respect des tolérances adaptées, - contrôler l'avancement du projet pour établir le « tel que construit » en temps réel selon l'avancement des phases travaux. <ul style="list-style-type: none"> • À l'issue du chantier pour : <ul style="list-style-type: none"> - établir l'assemblage final du modèle « tel que construit », - établir les plans de récolement. <p>Il n'est pas rare de constater que, pendant la durée des travaux, les informations topographiques sont exprimées dans un référentiel local, qui par la suite, sera rattaché aux référentiels nationaux.</p> <p>C'est lors de l'organisation du chantier et de l'évaluation de sa difficulté, que le choix d'attribuer, ou pas, une équipe de topographie professionnelle sur la durée du chantier doit être décidée.</p> <p>Les tolérances de positionnement et des volumes des objets sont donc gérées au fur et à mesure de la réalisation des travaux (les écarts avec les dimensions nominales sont fréquents, et donc les adaptations sur les objets qui seront réalisés par la suite également).</p>
<p>Tolérances hors site (2b)</p> <p>Gestion des tolérances</p> <p>Tolérance des constructions métalliques</p>	<p>Les éléments préfabriqués (poutres ou dalles précontraintes, voussoirs de tunnel, voussoirs de tablier d'ouvrage d'art...) ou manufacturés (équipements divers, tuyauterie de réseaux...) sont réalisés en usine, avec des tolérances proches des normes industrielles (en particulier celles de la mécanique).</p> <p>Les tolérances sont parfaitement connues, et doivent être prises en compte pour la réalisation des structures qui accueilleront ces éléments préfabriqués ou manufacturés. Pour compenser les écarts, des attaches ou des cales complémentaires sont parfois prévues, ainsi que des joints de liaison ou de compensation.</p> <p><u>Remarque</u> : les joints de liaison ou de compensation sont rarement indiqués dans une maquette numérique. Mais ils doivent apparaître dans la documentation associée aux objets de la maquette, pour leur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • budgétisation, • approvisionnement, • stockage sur site (surtout s'il s'agit de matériaux inflammables), • leur temps de mise en œuvre ou de séchage... <p>Les éléments de construction métalliques sont soumis à la norme NF EN 1090-2¹¹. Une charpente métallique est composée d'éléments de grandes dimensions. Leur assemblage est nécessairement délicat étant donné des déformations sous l'effet du poids propre des éléments mis en œuvre.</p> <p>Ces charpentes métalliques font le plus souvent l'objet de montage à blanc en usine (dans un repère local), de manière à anticiper les solutions à mettre en œuvre sur site pour compenser les écarts identifiés (dans un repère topographique absolu). Ces constructions métalliques sont en interface avec des éléments béton réalisés sur place, dans des tolérances qui doivent rester compatibles avec les tolérances des composants réalisés en usine¹².</p>

¹¹ AFNOR 2020, NF EN 1090-2 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en acier

¹² Le détail de ces processus est expliqué dans le deuxième livrable MINnD GT2.2 « Incertitudes et Tolérances / Moyens de qualification et de structuration des données »

Incertitudes

Pendant la phase de construction, les incertitudes sont principalement liées au contexte dans lequel le projet se réalise.

- formation et compétences opérationnelles des intervenants,
- transmission des informations et des exigences (documents, langues et traduction...),
- coactivité : proximité de tâches simultanées (gestion des interfaces),
- concomitance : proximité d'autres projets (gestion des accès, de la logistique...),
- logistique (trop tard ou trop tôt),
- accessibilité, disponibilité zone montage ou assemblage,
- conditions météorologiques (température, vent, orages violents...),
- ressources disponibles (humaines et matérielles, moyens de manutention et levage),
- libération des terrains,
- découvertes archéologiques,
- mauvaise reconnaissance des terrains et du sous-sol,
- planning (retards travaux, retards fourniture, retards validation plans...),
-

Incertitudes i2a et i2b

Les incertitudes liées à la construction ou la fabrication sont caractérisées par les aspects suivants.

Sources

Les sources principales d'incertitudes :

- positionnement XYZ, avec les tolérances de localisation,
- repères utilisés (voir Fig.8) avec le passage d'un repère à l'autre :
 - relatif (référentiel local),
 - absolu (référentiel topographique),
 - linéaire (PK Point kilométrique),
- état surface des différents matériaux,
- bétonnage (intérieur des éléments bétonnés) ,
- équipements et ouvrages provisoires (déformations des outils),
- facteurs humains (formation, motivation, absentéisme, pandémie...),
- logistique, acheminement, formalités administratives (douanes...),
- planning : retards travaux, retards fourniture, retards validation plans,
- recours de parties prenantes externes,
- projets concomitants / concourants,
- ...

Constat

Ces incertitudes sont identifiées par :

- résultats de mesures et de contrôles qualité (par échantillonnage),
- chrono-analyses,
- écarts relevés (relevés topographiques ou relevés numériques Lidar),
- relevé de réserves (à résoudre),
- visites de chantiers et observations,
- ...

Ces incertitudes doivent être confrontées au « registre des risques » établi avant le démarrage des travaux, afin de les atténuer en cherchant des solutions d'amélioration ou de résolution complète.

Degré d'incidence	<p>Le degré d'incidence peut avoir des impacts sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • planning (dérapage, non-respect de jalons impératifs, ajournement de livraison...), • coûts (livraison du projet différée, litiges, réclamations, mauvaise qualité ou performance), • sécurité et santé (des ouvriers pendant les travaux et des usagers pendant l'exploitation), • impact environnemental (biodiversité, pollution, cohésion du sous-sol), • ...
Responsabilité du risque associé	<p>Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité du :</p> <ul style="list-style-type: none"> • maître d'œuvre (mauvaise conception, non-respect de normes, non-respect des exigences du programme...), • constructeur (mauvaises méthodes de construction, erreur de dimensionnement des matériels de construction, mauvaise connaissance du sous-sol, mauvaise formation ou qualification des compagnons, mauvais encadrement...).
Recommandation pour la rédaction des pièces contractuelles	<p>Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour la réalisation des travaux, issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.</p>

3.5 Modélisations et simulations du déroulé des assemblages sur site et hors site

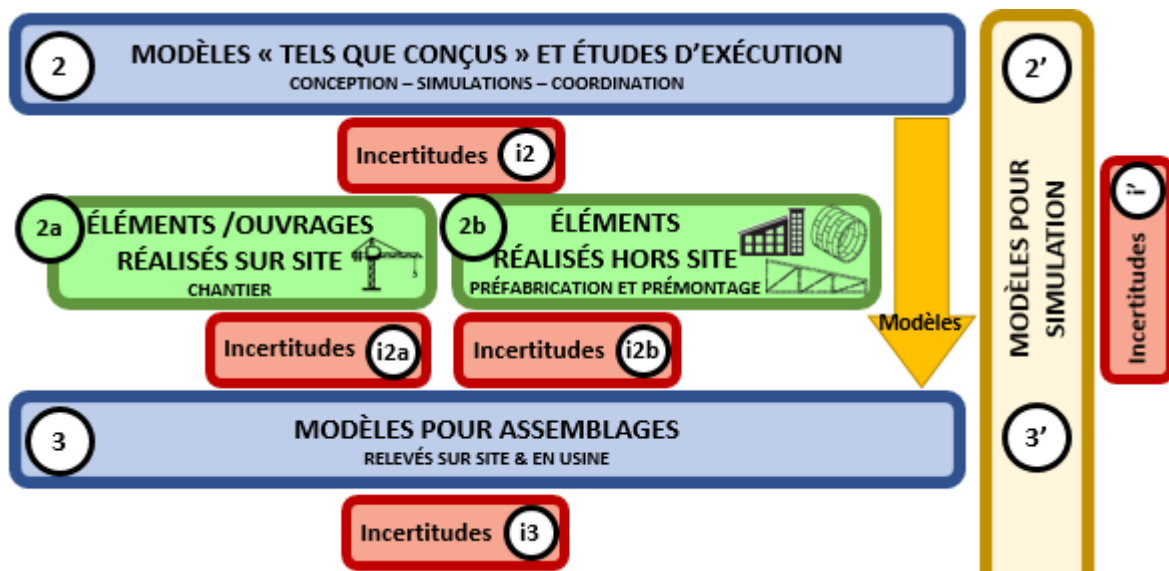


Fig.10 : Conception des assemblages sur site et hors site

Incertitudes et tolérances des modèles d'assemblages

Comme évoqué précédemment, les assemblages sur site exigent une gestion robuste des interfaces entre les différents types de composants.

Les interfaces doivent donc être identifiées en amont du démarrage des travaux, afin d'identifier les :

<p>Remarque</p>	<ul style="list-style-type: none"> • collisions potentielles entre éléments fixes déjà construits (ouvrage temporaire ou permanent), • tolérances de raccordements et adaptations à prévoir sur site, • collisions potentielles entre éléments à manutentionner et objets mobiles existants, • constructibilité des assemblages, • ... <p>La flèche verticale descendante jaune « Modèles » indique que certains modèles « Tels que conçus » sont utilisés, après modification, complément ou non, dans la réalisation des modèles pour assemblage.</p>
<p>Incertitudes i3 et i3'</p> <p>Sources</p> <p>Constat</p> <p>Degré d'incidence</p> <p>Responsabilité du risque associé</p> <p>Recommandation pour la rédaction des pièces contractuelles</p>	<p>Les incertitudes liées à la modélisation des assemblages sont caractérisées par les aspects suivants :</p> <p>Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • tolérance de fabrication, • chaîne de cotes / Tolérance d'assemblage, • détermination des centres de gravité des pièces, points d'accrochage, élingages et moyens de levage / manutention, • assemblage non réalisable (constructibilité non vérifiée, contexte mal connu, zone de montage mal appréhendée). <p>Ces incertitudes sont identifiées par :</p> <ul style="list-style-type: none"> • tests de conformité aux exigences attendues, • enveloppe des composants avec détail des interfaces (attaches de fixation, connecteurs de raccordement...), • équipement différent des préconisations (à la suite d'un changement d'exigence ou de fournisseur). <p>Le degré d'incidence peut générer la :</p> <ul style="list-style-type: none"> • nécessité de changement du système ou d'équipement, • nécessité de revoir la méthodologie d'assemblage, • ... <p>Et donc avoir des impacts sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • planning, • coût, • qualité / performance, • satisfaction du client. <p>Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • maîtrise d'ouvrage (changements ou évolution des exigences), • maîtrise d'œuvre (conception), • fournisseurs des équipements et des matériels (fourniture, livraison, logistique), • constructeur (Coactivité, enchaînement des séquences de construction...). <p>Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour la conception (toutes phases), issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.</p>

3.6 Montages et assemblages sur site

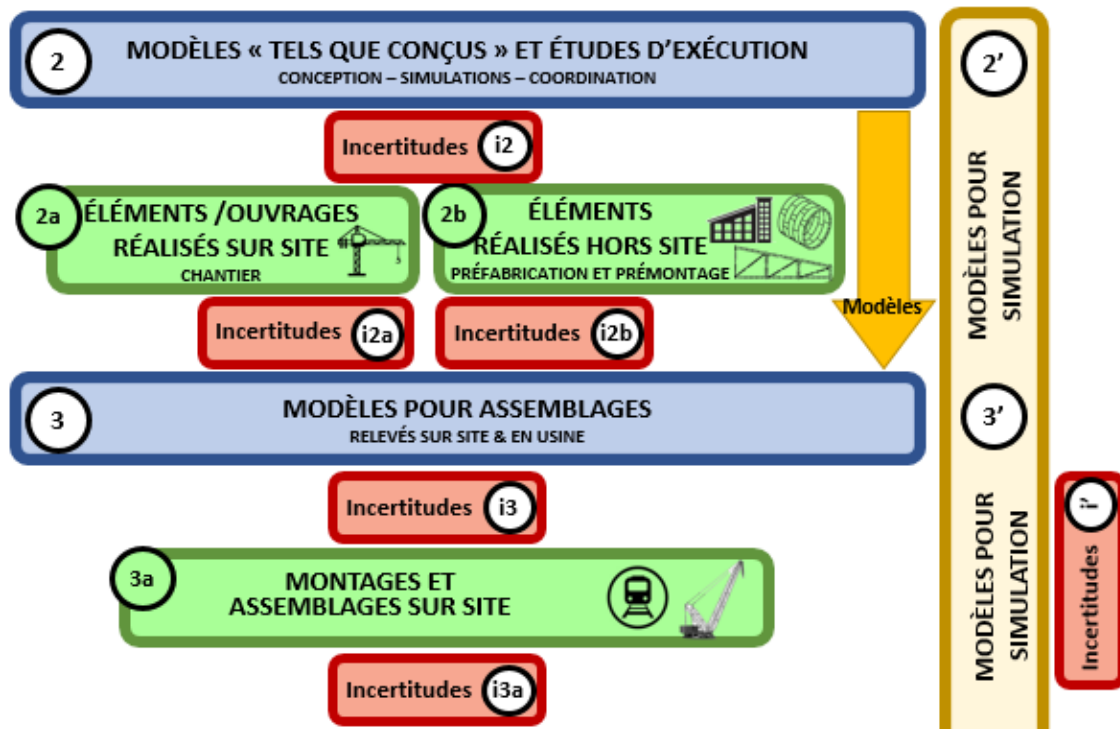


Fig.11 : Montages et assemblages sur site

Incertitudes et tolérances liées aux montages et assemblages sur site

Les séquences d'assemblages et de montages sur site exigent une bonne anticipation des moyens, des ressources et de l'enchaînement des tâches.

Les séquences de montage doivent être étudiées en amont du démarrage des assemblages, afin d'identifier les :

- zones de coactivité (nombreux intervenants sur une même zone),
- zones à risque (sécurité des collaborateurs),
- collisions potentielles entre éléments fixes (ouvrage fini ou permanent), pour amener ou mettre en position du matériel,
- centres de gravité des pièces à manutentionner et points d'accrochage pour présentation des pièces selon les orientations souhaitées,
- adaptations avec les équipements prévus pour le respect des tolérances prévues,
- moyens de manutention, de montage, d'étaie provisoire...

Il est donc indispensable de réaliser :

- un découpage en tâches élémentaires (plots de bétonnage, pré-assemblages, composants manufacturés et préfabriqués...),
- une représentation 4D Macro pour définir l'enchaînement général des différents ouvrages et identifier les zones de travail nécessaires,
- une représentation 4D Micro pour les zones de forte coactivité (afin d'expliquer le contexte et de faire respecter le planning d'intervention des différents intervenants).

Remarque

Dans l'industrie, les « plans » d'assemblage sont principalement des éclatés de modèles 3D. Chaque composant à assembler fait l'objet d'un modèle ou d'un plan spécifique. Dans le milieu de la construction, les composants et les assemblages sont représentés

dans les mêmes modèles et sur les mêmes plans. Il est très rare d'avoir le détail de chaque composant dans un modèle ou un plan spécifique.

Incertitudes i3a

Sources

Les incertitudes liées au montage et assemblage sur site sont caractérisées par les aspects suivants :

Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :

- Assemblage non réalisable (constructibilité non vérifiée, contexte mal appréhendé).
- Incertitudes sur le calcul des centres de gravité des pièces.
- Manutention non réalisable (pièces en mouvement, planning de construction non connu ou ayant évolué).
- Plannings non respectés (coactivité mal gérées).
- Communication mal assurée (méconnaissance du contexte d'intervention).

Constat

Ces incertitudes sont identifiées par :

- Adaptation de composants sur site.
- Adaptation des méthodes de levage et de construction (matériels de manutention, étaielement provisoire, déviations et fermetures d'accès provisoires, ...).
- Adaptation des séquences de construction (enchaînement des tâches).
- Non-respect des plannings d'intervention.

Degré d'incidence

Le degré d'incidence peut nécessiter :

- Changement de méthode assemblage (destruction puis réparation pour permettre la réalisation ou l'accessibilité).
- Découpage et adaptation de composants sur site.
- Mise en œuvre de supports complémentaires.
- ...

Et donc avoir des impacts sur :

- Planning.
- Coût.
- Qualité.
- Sécurité.

Responsabilité du risque associé

Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité du :

- maître d'œuvre (choix des composants ou des matériaux),
- constructeur (Séquences de construction, zones de manutention et de montage, matériels de manutention...).

Recommandation pour la rédaction des pièces contractuelles

Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour la conception (toutes phases) et la réalisation des travaux, issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.

3.7 Modélisation des ouvrages « Tels Que Construits »

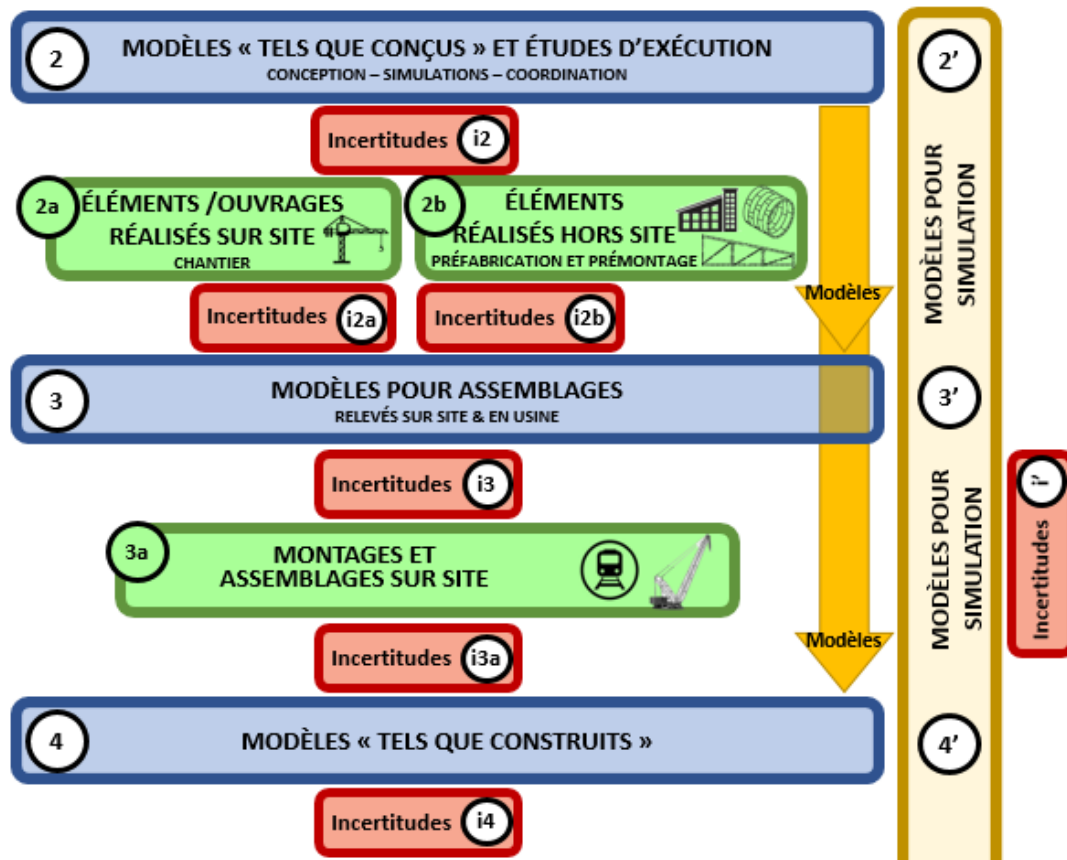


Fig.12 : Modélisation des ouvrages « Tels Que Construits »

Incertitudes et tolérances des modèles TQC

Les modèles TQC (Tels Que Construits) sont les modèles nécessaires pour établir les DOE numériques, et servent de base à l'établissement des modèles « Tels Que Maintenus ». La géométrie des modèles TQC doit être conforme à ce qui a été réalisé, aux tolérances près.

Les modèles TQC ne sont pas uniquement des modèles géométriques. Ils doivent également être en conformité avec les attentes du projet, c'est-à-dire conformes au niveau de besoin d'information attendu (LOIN, voir chapitre 4.7), en accord avec les exigences du cahier des charges :

- attributs existants et renseignés,
- documentation des composants et des équipements mis en œuvre, et livrés,
- ...

Ces modèles TQC peuvent comprendre de nombreuses incertitudes. Puisque de nombreux composants ne sont plus visibles une fois les travaux réalisés (tranchées refermées, composants à l'intérieur du béton...), il est nécessaire de réaliser ces modèles TQC au fur et à mesure des travaux (et surtout de ne pas attendre la fin des travaux et la livraison des ouvrages).

Écarts par rapport aux tolérances

Le principe de la réalisation des modèles TQC est basé sur le relevé des écarts entre ce qui a été conçu (le TQc, Tel Que conçu) et la réalité (le TQC, Tel Que Construit). Si ces écarts sont significatifs (au-delà des tolérances admissibles), le TQc doit être repris et mis à jour.

Déformations et Ajustements

Dans de tels cas, les procédures d'assurance-qualité doivent s'appliquer et la non-conformité spécifiquement acceptée par le Maître d'œuvre qui devra en avoir vérifié l'acceptabilité pour assurer la fonctionnalité de l'ouvrage.

Au-delà des tolérances de fabrication ou de montage, la réalisation d'un ouvrage nécessite parfois des éléments d'ajustement afin de compenser :

- des déformations et des déplacements relatifs (par exemple, sous le poids propre des composants assemblés),
- des phénomènes physiques (par exemple, la déformation d'un pylône de grande hauteur sous l'effet de l'ensoleillement),
- des défauts de géométrie (par exemple, le voussoir de clavage du tablier d'un ouvrage d'art, ou bien l'anneau de liaison entre un tunnel et la paroi de la gare souterraine dans laquelle le tunnel débouche),
- ...

La géométrie de ces éléments de compensation n'est souvent connue en détail qu'après leur réalisation sur site, et ne peut donc être intégrée dans le modèle TQC qu'après un relevé topographique exact.

Zones non visibles

La géométrie, la localisation, les caractéristiques techniques des composants non visibles sont les données les plus complexes à intégrer dans un modèle TQC.

Il s'agit par exemple :

- des composants insérés dans un voile béton (ferraillage, inserts...),
- des composants insérés dans une tranchée refermée (réseaux divers...),
- des composants dans un faux plafond, sous un plancher, derrière des équipements lourds...

De plus, les points de références principaux ne sont parfois plus accessibles impliquant une localisation à partir du seul repérage local.

Méthodologie

Il est donc primordial de faire le relevé des composants nécessaires à l'établissement du TQC, en accord avec les exigences du marché et les tolérances admissibles, avant la fermeture des tranchées, le bétonnage des ouvrages, la mise en place de faux plafonds ou d'équipements lourds qu'on ne pourra pas déplacer...

Responsabilité

Ces relevés peuvent être ponctuels ou systématiques et doivent être réalisés par un topographe afin d'en avoir une localisation et une géométrie exacte. La question qui peut se poser est de savoir s'il est recommandé d'utiliser les services de topographie interne à la société qui réalise les travaux ou de faire appel à l'expertise externe d'un cabinet de topographie indépendant. Dans ce document, nous ne traiterons pas des aspects financiers inhérents à ce choix, mais bien à l'aspect technique lié à ce choix. En effet, le choix d'un prestataire externe est souvent un moyen direct d'obtenir un contrôle « qualité » des données relevées dans toutes les phases du projet. L'ensemble des acteurs impliqués sur le projet a la possibilité d'accéder à une série d'informations linéairement indépendante de celles déterminées par l'un des acteurs. Le contrôle n'est donc plus simplement un « auto-contrôle » mais se base sur une comparaison de données objective et indépendante.

Le contrôle externe permet donc d'assurer la neutralité des informations. Par principe, ce contrôle est fait avec des moyens techniques et humains différents. Il est alors considéré comme opposable aux tiers.

Performance

Il est conseillé de conserver dans le modèle TQC les performances attendues des équipements. En effet, lorsqu'il s'agira de remplacer un composant, il faudra se référer aux exigences attendues et non pas aux performances du composant en place qui sont parfois différentes (supérieures ou inférieures) aux performances nominales.

Remarque

Les flèches verticales descendantes jaunes « Modèles » indique que certains modèles « Tels que conçus » ou « Modèles pour assemblage » sont utilisés, après modification, complément ou non, dans la réalisation des modèles « Tels que Construits ».

Incertitudes i4 et i4'**Sources**

Les incertitudes liées aux modèles TQC sont caractérisées par les aspects suivants :

Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :

- Géométrie des objets manufacturés ou réalisés sur place) .
- Localisation des objets.
- Distance des objets entre eux.
- Nature des objets (matériau, épaisseur, méthode d'assemblage ou de fixation...).
- Liens entre les objets (notion de système).

Constat

Ces incertitudes sont identifiées par :

- Résultats des mesures et des contrôles qualité.
- Écart relevés (mesures ponctuelles ou comparaison TQc/TQC par des logiciels d'analyse de nuages de points).
- Attributs non renseignés, ou valeurs en dehors des plages attendues.
- Niveau de besoin d'information non respecté.

Degré d'incidence

Le degré d'incidence peut nécessiter la :

- reprise de modèles géométrique (ressaisie ou mise à jour avec les données réelles),
- complétude des données (fiabilité, exhaustivité...),
- évaluation des risques associés (en fonction du degré d'importances de l'incertitude).

Responsabilité du risque associé

Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité de :

- maître d'œuvre (erreurs de conception, surtout sur les sujets de déformation),
- constructeur (respect des tolérances d'exécution, relevés non réalisés en temps...).

Recommandation pour la rédaction des pièces contractuelles

Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour la livraison de l'ouvrage, issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.

Lien avec la norme ISO 19650-1

Le référentiel du modèle « Tel Que Construit » est issu du modèle PIM (Project Information Model) de la norme ISO 19650-1. Les tolérances sont liées aux opérations de construction et aux procédures de fabrication et de montage.

Les liens avec le norme ISO 19650-1 seront approfondis dans le second livrable de ce groupe de travail : Incertitudes et Tolérances – Qualification et Recommandations).

3.8 Modélisation des ouvrages « Tels Que Maintenus »



Fig.13 : Modélisation des ouvrages « Tels Que Maintenus »

Incertitudes et tolérances des modèles Tels que Maintenus

Les modèles Tels que Maintenus sont les modèles utilisés pour l'exploitation et la maintenance et des ouvrages.

Ces modèles peuvent être considérés comme l'état zéro, c'est-à-dire le modèle de référence de l'exploitation (appelé souvent « baseline »). Ces modèles doivent être maintenus à jour durant toute la phase d'exploitation, avec le niveau d'information nécessaire aux usages.

Ces modèles doivent souvent être simplifiés par rapport aux modèles TQC, car le niveau de détail ou d'information peut être trop élevé par rapport aux usages opérationnels et de maintien en conditions de services.

Ces modèles requièrent une adéquation avec les schémas fonctionnels qui permettent de comprendre et de gérer le fonctionnement des systèmes mis en œuvre.

Ces modèles doivent comporter le niveau d'exigence fonctionnel attendu par chacun des systèmes ou chacun des composants d'un système.

Historique des mises à jour

À la suite d'une intervention (modification ou remplacement d'un équipement) ou d'une constatation d'écart avec les tolérances admissibles, le modèle Tel que Maintenu peut être mis à jour directement par les équipes de maintenance pour autant que le niveau de tolérance défini soit respecté. À défaut, il faudra faire appel à un topographe. Il est nécessaire de conserver l'historique des mises à jour afin de comprendre les erreurs ultérieures éventuelles.

Remarque

Les flèches verticales descendantes jaunes « Modèles » indiquent que certains modèles « Tels que Construits » sont utilisés, après modification, complément ou non, dans la réalisation des modèles « Tels que Maintenus ».

Incertitudes i5 et i5'

Sources

Les incertitudes liées aux modèles Tels Que Maintenus sont caractérisées par les aspects suivants :

Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :

- Modification ou réparation effectuée sans reprise du modèle Tel Que Maintenu initial (alors que la modification entraînait le non-respect des tolérances admissibles).
- Changement d'équipement ou de composant effectué sans reprise du modèle initial ou non conforme aux exigences fonctionnelles attendues.

<p>Constat</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Informations non saisies au fur et à mesure des interventions.
<p>Degré d'incidence</p>	<p>Ces incertitudes sont identifiées par des :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Écarts significatifs entre le modèle et la réalité. • Informations non à jour, obsolètes ou manquantes. • Écarts entre les modèles géométriques et les modèles schématiques. • Performances non conformes aux exigences attendues.
<p>Responsabilité du risque associé</p>	<p>Le degré d'incidence peut nécessiter :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inventaire complet des équipements et des informations les concernant. • Reprise des modèles géométriques ou schématiques. • Vérification de l'adéquation entre performances théoriques et réelles. • Adaptation ou modification du processus de remontée des interventions et des changements réalisés.
<p>Recommandation pour la rédaction des pièces contractuelles</p>	<p>Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité du :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exploitant. • Mainteneur. <p>Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour l'exploitation et la maintenance, issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.</p>
<p>Lien avec la norme ISO 19650-1</p>	<p>Le référentiel du modèle « Tel Que Maintenu » est issu du modèle AIM (Asset Information Model) de la norme ISO 19650-1. Les tolérances sont liées aux ouvrages réalisés, donc exploités et maintenus.</p> <p>Les liens avec la norme ISO 19650-1 seront approfondis dans le second livrable de ce groupe de travail « Incertitudes et Tolérances – Qualification et Recommandations ».</p>

3.9 Modélisation des ouvrages pour simulation

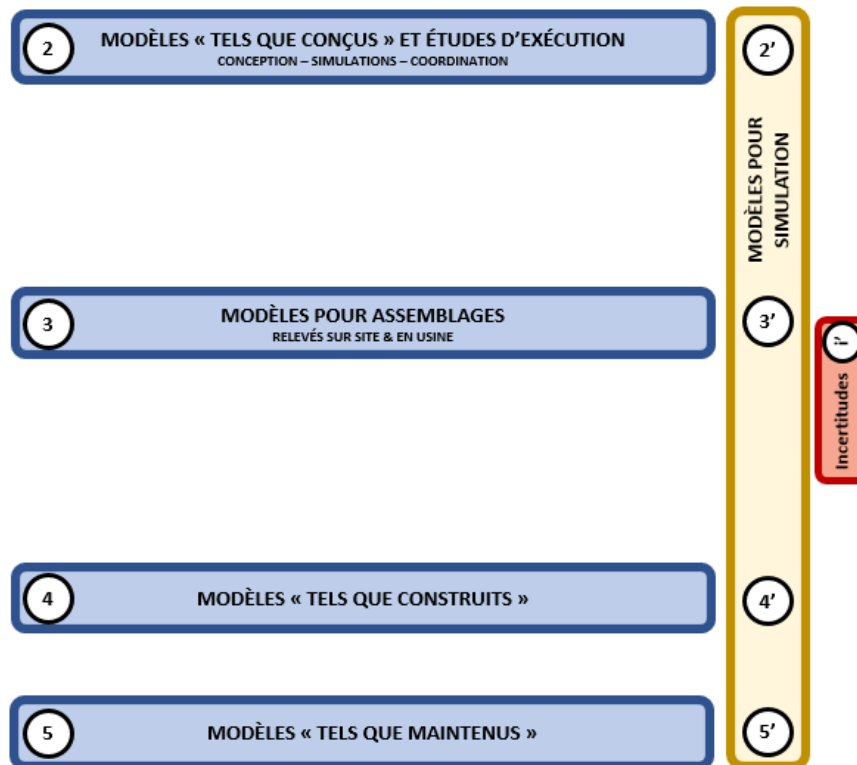


Fig. I4 : Modélisation des ouvrages « Tels Que Simulés »

Incertitudes et tolérances des modèles pour simulation en correspondance avec les modèles « Tels que Maintenus »

Des modèles pour simulation sont à nouveau utilisés pour simuler le comportement des ouvrages ou des systèmes pendant la phase d'exploitation et de maintenance.

Ces modèles peuvent répondre à deux types d'objectifs :

- prédictifs, afin d'améliorer les systèmes (ouvrages ou équipements électromécaniques, comme par exemple, le changement d'équipement pour absorber une charge plus importante,
- palliatifs, afin de résoudre et de fiabiliser les ouvrages ou les systèmes, dans le but de maîtriser les risques associés et de vérifier la conformité de comportement par rapport à des indicateurs identifiés (ex : flèche réelle mesurée sur travée par rapport aux prévisions).

Les modèles pour simulation sont en interaction forte avec les modèles Tels Que Maintenus (modèles de référence), puisqu'ils s'appuient sur les données réelles des systèmes opérationnels. Les modèles Tels Que Maintenus sont des modèles basés sur la collecte de données également expérimentales reflétant au plus près la réalité et l'expérience.

En retour, les modèles pour simulation peuvent avoir des impacts sur les modèles Tels Que Maintenus, puisqu'ils permettent d'améliorer en continu et de fiabiliser les systèmes opérationnels par une mise à jour des données (notamment sur le vieillissement des matériaux).

La notion du jumeau numérique prend ici tout son sens : les données des systèmes en exploitation alimentent les modèles de simulation, et ces derniers permettent de piloter ou pilotent les systèmes opérationnels. Les écarts entre ces deux modèles doivent être corrigés en permanence, afin de diminuer les incertitudes liées à des données d'entrée potentiellement non robustes.

Remarque

Les modèles pour simulation Tels Que Maintenus et les modèles pour simulation soulèvent des questions majeures concernant leur traçabilité et leur archivage, puisque ces modèles représentent des données qui sont par nature très « vivantes » et quelquefois éphémères.

**Incertitudes
i2' i3' i4' i5'****Source**

Les incertitudes liées aux modèles pour simulation sont caractérisées par les aspects suivants :

Les sources principales d'incertitudes sont les suivantes :

- Données d'entrée erronées ou non fiables (conditions aux limites des modèles).
- Modèles de simulations choisis (hypothèses et lois de comportement).
- Interaction / Interdépendance entre modèles de simulation.
- Mauvaise interprétation des résultats (par incompetence de l'expert).

Constat

Ces incertitudes sont identifiées par :

- Des systèmes peu ou non performants.
- Des résultats théoriques non conformes à la réalité.
- Le fait que le modèle donnera un résultat théorique localisé alors que la mesure indique une valeur locale¹³.

Degré d'incidence

Le degré d'incidence peut nécessiter :

- Nouveau paramétrage de certaines applications.
- Développement de nouvelles applications.
- Données d'entrée plus fiables ou plus nombreuses.

**Responsabilité du risque
associé**

Les risques de ces incertitudes peuvent être de la responsabilité du :

- Maître d'œuvre de conception.
- Exploitant.
- Mainteneur.
- Intégrateurs de logiciels.

Remarque importante : les Éditeurs de logiciels sont rarement tenus pour responsables des erreurs de résultats de calculs ou de simulations (cela est systématiquement stipulé dans les conditions d'utilisation des logiciels).

**Recommandation pour
la rédaction des pièces
contractuelles**

Afin de pallier ces incertitudes, il est conseillé de spécifier dans les pièces contractuelles l'utilisation de cas d'usage BIM pour répondre aux objectifs métiers nécessitant une attention particulière. Pour cela, se référer à la liste des Objectifs Métiers et Usages du BIM pour la conception (toutes phases) et la réalisation des travaux, issue du livrable 25 de MINnD S1 « Guide d'application du BIM » qui se trouve en Annexe C de ce document.

¹³ Avoir une extraction spatiale de données issues d'un modèle est une indication moyenne, alors que la mesure est une indication ponctuelle. Par exemple : un capteur positionné à proximité d'une fissure indiquera 0 microdéformations, alors que la valeur moyenne attendu du modèle est représentative de la déformée moyenne.

4. INCERTITUDES ET RISQUES ASSOCIÉS

4.1 Définitions

<p>Le concept de risque projet</p>	<p>Avant de définir le risque projet, rappelons la définition du Projet. Le Project Management Institute (PMI®) dans son Corpus de Connaissance (PMBOK) décrit un projet comme : "... une activité temporaire pour créer un produit, un service ou un « résultat <u>unique</u>. »</p> <p>Ainsi, chaque projet est par définition « unique ». Le caractère singulier de chaque projet porte intrinsèquement le concept d'incertitude. L'incertitude affecte classiquement les trois objectifs majeurs qualifiés de « triple contrainte » c'est-à-dire Coûts, Délais et Performance auxquels peuvent s'ajouter par contrat des objectifs tels que l'environnement, l'image médiatique, la sûreté...</p>
<p>Définition de l'incertitude</p>	<p>En référence à la norme ISO Guide 73¹⁴, la norme ISO 31000¹⁵ dans sa première édition de 2009 définissait l'incertitude comme « l'état, même partiel, de carence d'information lié à la compréhension ou à la connaissance d'un événement, de sa conséquence ou de sa probabilité ».</p> <p>Notons que cette définition n'a pas été reprise dans l'édition 2018 de l'ISO 31000. Néanmoins, l'ISO 31010-2019 « Management du risque – Techniques d'appréciation du risque » apporte un éclairage original en reconnaissant la difficulté d'appréhender un terme qui englobe de nombreux concepts implicites.</p> <p>Toutes les incertitudes ne peuvent pas être comprises et l'importance de l'incertitude peut être difficile ou impossible à définir ou à influencer. Toutefois, la reconnaissance de l'existence de l'incertitude dans un contexte spécifique permet de mettre en place des systèmes d'alerte précoce pour détecter les changements de manière proactive et opportune et de prendre des dispositions pour renforcer la résilience afin de faire face aux circonstances inattendues.</p> <p>L'incertitude qualifie ce qui n'est pas certain et qui est donc susceptible de porter un doute.</p>
<p>Incertitudes : Panorama</p>	<p>Pour illustrer la diversité associée à la notion d'incertitude, l'ISO 31010 cite l'incertitude :</p> <ul style="list-style-type: none"> • caractérisant la variabilité intrinsèque de certains phénomènes, et qui ne peut être réduite par des recherches supplémentaires ; par exemple, le lancer de dés (parfois appelée incertitude aléatoire), • résultant d'un manque de connaissances et qui peut donc être réduite en recueillant davantage de données, en affinant les modèles, en améliorant les techniques d'échantillonnage, etc. (parfois appelée incertitude épistémique), • linguistique associant le flou et l'ambiguïté inhérents aux langues parlées, • décisionnelle associant systèmes de valeurs, jugement professionnel, valeurs de l'entreprise et normes sociétales revêtant un caractère stratégique spécifique dans le domaine du management. <p>Les exemples ci-dessous illustrent l'incertitude quant à :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la véracité des hypothèses,

¹⁴ ISO Guide 73 : Management du risque - Vocabulaire

¹⁵ ISO 31000 : Management du risque – Lignes directrices

Les trois types d'incertitudes

- la variabilité des paramètres sur lesquels une décision peut être fondée,
- la validité ou à l'exactitude des modèles établis pour élaborer des prévisions,
- les résultats incertains des problèmes systémiques, tels que les pénuries de personnel compétent, qui peuvent avoir des impacts de grande envergure qui ne peuvent pas être clairement définis,
- le manque de connaissances qui survient lorsque l'incertitude est reconnue mais pas entièrement comprise,
- l'imprévisibilité,
- les limites de l'esprit humain, quant à l'appréhension des données complexes, l'extrapolation de situations entraînant des conséquences à long terme ou de prendre des décisions sans préjugés.

Il est important en cohérence avec l'ISO 31010 de reconnaître que toutes les incertitudes ne peuvent pas être comprises voire difficile ou impossible à définir ou à circonscrire.

À ce stade de la réflexion, il est nécessaire de distinguer risque et incertitude. En effet, si tous les risques incluent la notion d'incertitude, toutes les incertitudes ne se qualifient pas obligatoirement comme risques.

Il est important de distinguer avec l'appui de la norme FD X 50-117 AFNOR 2003 les différents types d'incertitudes dont une seule pourra désigner véritablement un risque projet.

On distingue ainsi, trois types d'incertitudes liés à un événement potentiel :

- **Imprévu** (destin, fatalité...).
- **Aléa** (les questions sans réponses, identifiables mais non mesurables).
- **Risque** (analyses de risques et hypothèses).

À l'inverse de l'incertitude, la certitude s'inscrit dans les bases de connaissance (Exemples : « Le prénom d'Albert Einstein » ou « l'eau bout à 100°C, si elle est pure et se trouve au niveau de la mer »).

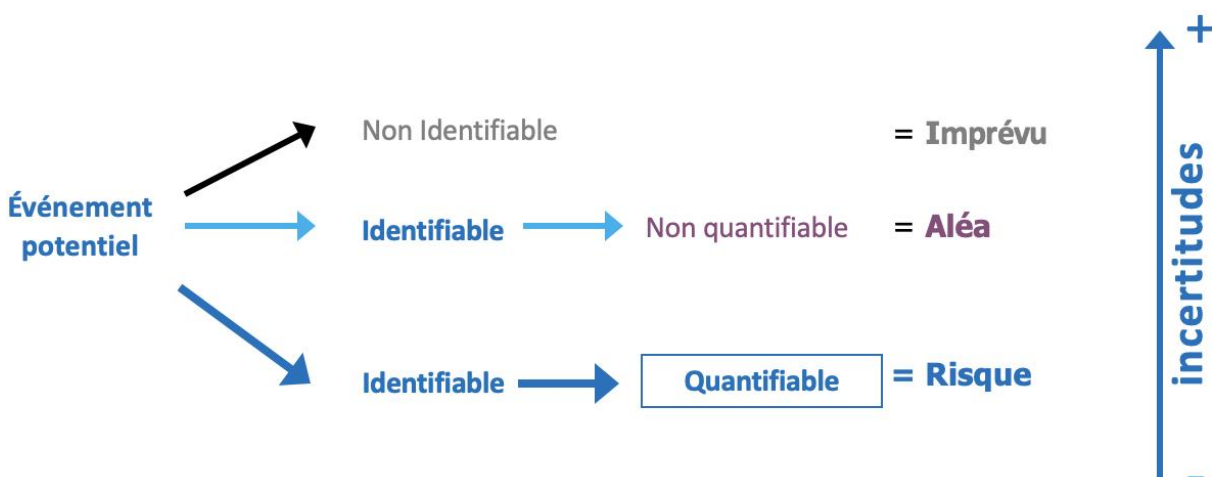


Fig.15 : Les trois types d'incertitudes (Norme FD X 50-117)

Risque : Une incertitude mesurable

Ainsi, la condition sine qua non pour qu'une incertitude se qualifie comme risque, est que l'événement potentiel (porteur d'incertitude) soit identifiable (avec une probabilité d'occurrence non nulle ni maximale : 100%) et que l'impact en soit évaluable (qualitativement ou quantitativement). La mesure de ce risque se nomme « criticité » ou « niveau de risque », « score »... selon une formule pouvant s'exprimer comme :

$$\text{Criticité} = \text{Probabilité} \times \text{Impacts}$$

<p>Étymologie du mot Risque</p>	<p>En résumé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si l'évènement potentiel (incertitude) est non-identifiable, c'est un imprévu. • Si l'évènement potentiel (incertitude) est identifiable mais non évaluable (ni qualifiable ou ni quantifiable), c'est un aléa. • Si l'évènement potentiel (incertitude) est identifiable et mesurable (qualifiable ou quantifiable), c'est un risque. <p>Un historien pourrait probablement retracer l'origine du Risque avec l'invention des Nombres et du calcul mathématique pour mesurer des arpents de terre et gérer des récoltes ou calculer les probabilités de gain en jouant au dé.</p> <p>La maîtrise du risque dessine la frontière entre les temps modernes et l'Antiquité pendant laquelle le destin des hommes était exclusivement soumis aux caprices des dieux. Avec l'avènement de la science, des connaissances et le développement économique, les hommes et les femmes ne sont plus passifs mais sont devenus acteurs devant la nature.</p> <p>Pourtant, dans la gamme des incertitudes qui imprègnent un projet, le concept de risque est souvent encore considéré comme une boîte noire associée à l'idée héritée de son étymologie italienne « rischiare » de danger voire un signe du destin, une fatalité.</p> <p>Cette filiation étymologique est porteuse d'ambiguïtés dont on trouve les traces (danger, sécurité, vulnérabilité...) dans les différentes définitions AFNOR 1993 ou DGA 1995. De telles notions partielles voire « obsolètes » peuvent se retrouver encore comme définissant le mot risque dans de grands projets en cours...</p>
<p>Définitions du Risque</p> <p>La norme ISO 31000 : 2009/2018</p> <p>La norme ISO 9001 :2015</p> <p>Le management des risques</p>	<p>Le PMBOK du PMI®, depuis sa deuxième édition publiée en 2000, définit le risque comme « un événement ou une condition incertaine qui, s'il se produit, a un effet positif ou négatif sur les objectifs du projet ».</p> <p>La modernité de cette définition réside dans la caractérisation des conséquences négatives et/ou positives. Ainsi, des écarts par rapport à des prévisions peuvent être difficilement acceptables, voire inacceptables, mais aussi favorables, à rechercher et à encourager éventuellement.</p> <p>Un risque dans son acceptation moderne est un concept double.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si les effets sont positifs, on parle d'opportunité. • Dans le cas d'effet négatif, le risque se nomme « menace ». <p>Ce changement de paradigme intégrant menace et opportunité, se concrétise en 2009 (1^{ère} Edition) puis en 2018 (2^{de} édition) dans la norme ISO 31000 (Management des risques - Principes et Lignes Directrices qui définit le risque comme « l'effet de l'incertitude sur les objectifs du projet ».</p> <p>Cette évolution se concrétise dans la mise à jour en 2015 de la norme ISO 9001 v2015 et la notion associée « Risk-Based Thinking » : le risque est défini comme un effet de l'incertitude, un écart positif ou négatif par rapport à une attente.</p> <p>L'opportunité est, quant à elle, une circonstance qui survient dans l'environnement de l'organisation, et qui permet une amélioration de sa performance.</p> <p>Le management des risques joue un rôle croissant dans la gouvernance des projets comme des entreprises. Le Management des Risques n'est pas une discipline indépendante mais doit être intégré aux processus opérationnels existants pour en optimiser les bénéfices.</p> <p>Le management des risques est un processus itératif et continu d'"identification-analyse-évaluation-traitement", conjointement avec la réévaluation du contexte et l'analyse des parties</p>

Critères de réussite dans le management des risques

prenantes, appliqué sur l'ensemble du cycle de vie du projet ou dans le cadre de la gouvernance d'entreprise. Ce processus permet de :

- Maîtriser les menaces et leurs potentiels effets négatifs.
- Mettre à profit les opportunités d'éventuels effets positifs.

Le management des risques renforce la prise de décision et facilite l'atteinte des objectifs associés à un projet ou une entreprise.

Notons ici que le management des risques n'est pas une option. Deux projets techniquement « identiques » se distinguent *a minima* par leur contexte (juridique, contractuel, géographique, politique, climatique, les parties prenantes et leur appétence aux risques...).

Des paragraphes précédents, on peut établir les principaux critères de réussite d'un management des risques efficient :

- Tout projet par son caractère d'unicité est par nature porteur d'incertitudes que les acteurs du projet doivent appréhender de manière proactive en évitant si possible toute forme de biais.
- L'effet de l'incertitude sur les objectifs porte une double dimension non exclusive : positive et/ou négative (opportunité / menace).
- Un risque est une incertitude identifiable dont l'impact est mesurable au regard des objectifs.
- Dans un environnement mouvant, les objectifs du projet doivent être documentés, contrôlés et communiqués aux parties prenantes préalablement identifiées et gérées.

Bien identifier les risques et opportunités de son organisation permet de faire du management des risques un véritable outil d'amélioration continue.

4.2 Comment mieux maîtriser les incertitudes ?

La maîtrise des incertitudes

Management des Risques : norme et outils méthodologiques

La maîtrise des incertitudes passe par une approche globale et transversale qui prend en compte les différents lots, les différentes phases et les modes constructifs.

Dans le cadre du Plan de Management de Projet, le management des risques et opportunités s'intègre parfaitement au moyen d'un Plan de Management des Risques (PMR).

Ce plan de management des risques et opportunités décrit les processus des normes utilisées, les outils méthodologiques spécifiques déployés dans le contexte particulier du projet concerné pour appréhender de manière proactive les effets positifs et/ou négatifs des incertitudes liées au projet.

Les processus de la norme ISO 31000

La version initiale de la norme en 2009 ajoutait aux processus « traditionnels » :

- Identification,
- Analyse,
- Évaluation et Traitement,

les processus liés :

- au Contexte (définissant le champ d'application du processus de gestion des risques et les critères par rapport auxquels les risques sont évalués),
- à la Communication et Consultation (...des **parties prenantes internes et externes** selon le cas, à chaque étape du processus du management des risques et concernant le processus dans son ensemble),
- à la Surveillance et à la Revue (Contrôle de l'efficacité de toutes les étapes du processus de gestion des risques dans la perspective de **l'amélioration continue**).

La version de 2018 de la norme introduisait un processus supplémentaire « Enregistrement et Rapport » correspondant à la documentation et l'établissement des rapports liés aux résultats de la démarche.

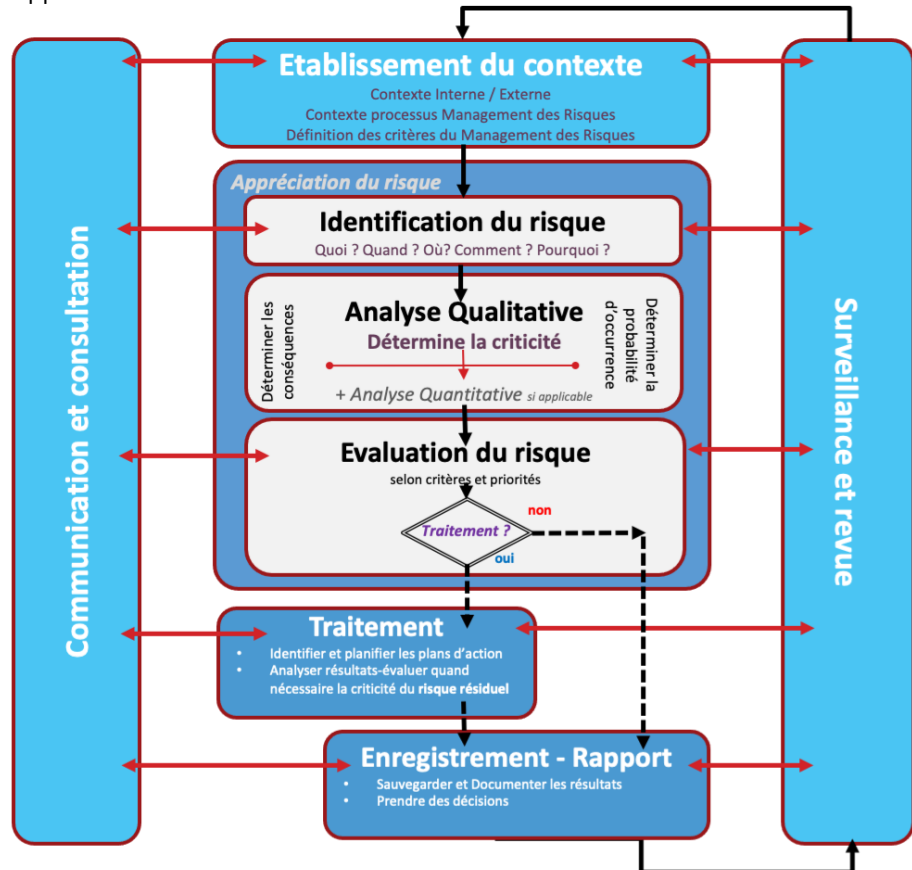


Fig.16 : Les processus de la norme ISO 31000 :2018

Les Outils Méthodologiques

Associés à la mise en place des processus méthodologiques adaptés au contexte interne et externe du projet, des outils méthodologiques appuient la démarche parmi lesquels nous pouvons noter :

- Le Risk Breakdown Structure (RBS) équivaut à l'organigramme des tâches ou Work Breakdown Structure (WBS) permettant de structurer l'appréciation du risque et de regrouper les risques et opportunités en catégories de risque.
- La Matrice des Risques (à ne pas confondre avec le Registre des Risques) est fixée sans dérogation possible dès le début du projet. La matrice Menaces et son équivalent symétrique pour les opportunités sont utiles dans les processus analyse-évaluation et traitement au stade de la mesure de la criticité de la menace ou de l'opportunité. La Matrices Risques intègre un système « feu tricolore » Vert-Orange-Rouge établissant le statut de chaque menace/opportunité et inclus dans les tableaux de bord et le reporting des risques.
- Le Registre des Risques est l'outil méthodologique pivot car il concentre la partie opérationnelle de la démarche méthodologique. Créé au début du projet et défini dans le cadre du processus « Établissement du Contexte), le Registre des Risques adapté aux spécificités du projet permet aux décideurs de documenter, piloter et de traiter par le biais de contrôles préventifs et d'actions correctives. La sauvegarde et la mise à jour régulière du Registre des risques et opportunités sont spécifiées dans la définition du Cycle de Pilotage du projet concerné.

Le registre des risques

Parmi les autres outils méthodologiques utiles, nous pouvons citer :

- Tableau de bord.
- Rapport Mensuel.
- Retour d'Expérience (Projet et/ou Entreprise).

Un registre de risques est un outil à la disposition des chefs de projet pour suivre et examiner les risques susceptibles d'impacter leurs projets. Parce qu'elle constitue une approche proactive pour répondre aux problèmes ou revers éventuels, la gestion des risques est une composante essentielle de la gestion de projet.

Le registre de risques est au cœur de ce processus de gestion des risques. Ils ont pour but d'identifier, d'enregistrer et de piloter les risques d'un projet.

L'écriture d'un registre des risques est un processus collaboratif et itératif (cause/description/conséquence), pour documenter, tracer et communiquer.

Les risques sont parfois liés à un planning, Il existe donc des liens entre les risques. Mais tous les risques ne peuvent pas être représentés sur un planning.

Catégories de risques

De prime abord, certains risques peuvent paraître anodins ou improbables, mais cela ne veut pas dire qu'ils ne sont pas susceptibles d'affecter le projet. Voici quelques exemples de risques à prendre en considération :

- Risques liés à la sécurité/aux données (vol ou consultation non autorisée de documents).
- Risques juridiques (contentieux ou amendements de loi qui exercent une influence sur le projet).
- Événements catastrophiques (incendie, inondation, catastrophe naturelle).
- Perturbations de la chaîne logistique.
- ...

Les risques sont généralement classés en catégories (RBS : Risk Breakdown Structure) :

- Contexte.
- Contrat.
- Données d'entrée.
- ...

Constitution d'un registre de risques

Les colonnes standard incluses dans un registre de risques sont :

- Numéro d'identification unique (code alphanumérique à définir ou défini dans le plan de management des risques), pour rapidement identifier chaque risque et s'y référer ;
- Nom et brève description du risque.
- Catégorie de risque (interne ou externe, lié à l'équipement ou au personnel, etc.).
- Probabilité (les chances que le risque se concrétise).
- Impact (s'il se concrétise : les répercussions qu'il aura sur le projet).
- Note d'évaluation (où se trouve le risque dans une liste de priorités).
- Approche (suivre le risque, essayer de le nuancer, l'éviter, etc.).
- Mesures à prendre (étapes et actions identifiées).
- Personne responsable de la supervision ou de l'atténuation du risque.
- Commentaires.

On peut également ajouter une colonne « opportunités », car, comme on l'a vu, les risques peuvent être menaces pour le projet ou opportunités à saisir.

Généralement il y a deux registres :

Exemple de registre de risques

- Interne (pour ne pas dévoiler au client certains problèmes internes) ;
- Externe (pour les négociations avec le client).

La figure Fig.17 donne un exemple de registre des risques en phase de conception.

Registre des risques en phase Conception																			
N° de la ligne (N° de réf. du risque)	Ouvrage concerné / Catégorie	Incertitude (à l'origine de l'évènement risqué)	Evènement redouté (par rapport aux conditions de réf. du marché, définies notamment dans les cahiers B)	Risques avant traitement intégré au projet				Actions de traitement et surveillance du risque intégrées dans le projet de référence et la conception MP = Mesures préventives MD = Mesure de détection	Risques résiduels après traitement intégré au				Actions correctives et risques résiduels et réalisation du traités intégrés - études complémentaires - reconnaissances complémentaires - auscultation complètes - dispositions constructives						
				Conséquences (en termes de génie civil, d'habitants ou d'environnement ; description qualitative)	Evaluation du niveau de risque (NR) avant traitement	Types de conséquences (C)			Evaluation du niveau de risque résiduel	Types de conséquences (C)									
					Vieillesse (V)	Impact Coût	Impact Délai	Environnement	Image	Sécurité		Vieillesse (V)	Impact Coût	Impact Délai	Environnement	Image	Sécurité	Niveau de risque	NR = max (V, X, C)

Fig.17 : Exemple de Registre des risques en phase Conception

Exemple d'indicateurs de registre de risque

La figure Fig.18 donne un exemple d'indicateurs de synthèses de registre des risques, afin d'avoir une vue complète et synthétique pour assurer le suivi du traitement des risques d'un projet.

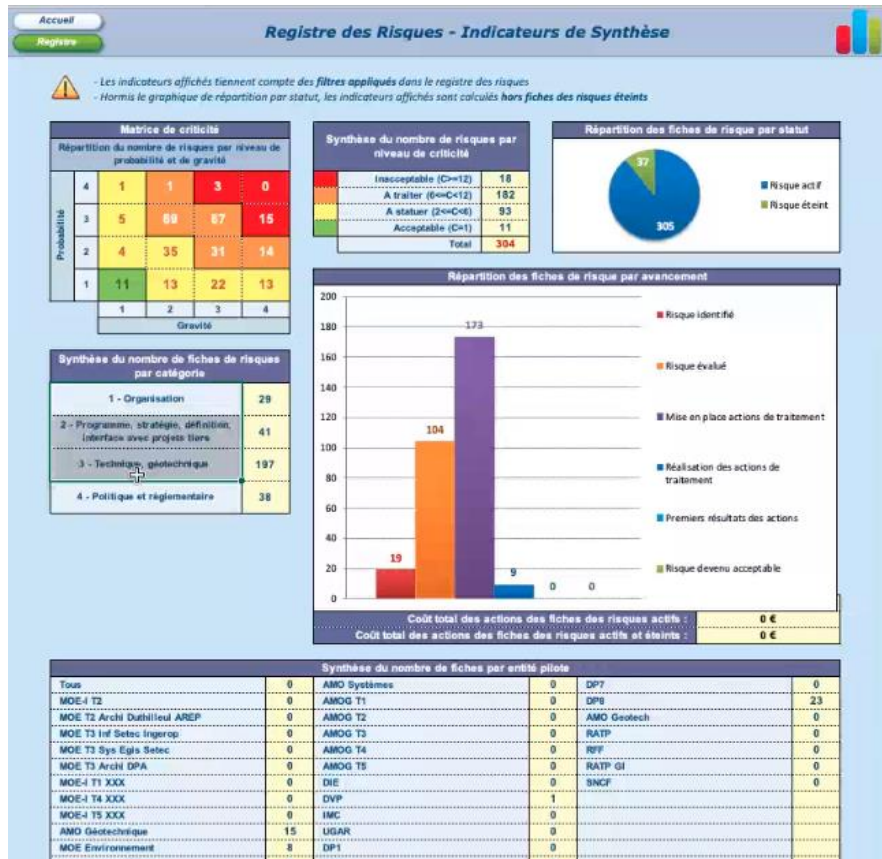


Fig.18 : Indicateurs de synthèse du Registre des risque de la Société du Grand Paris

Gestion de configuration

Méthode

La gestion de configuration consiste à gérer la description technique d'un système, ainsi qu'à gérer l'ensemble des modifications apportées au cours de l'évolution du système. La gestion de configuration permet de borner les incertitudes.

La gestion de configuration est une méthode qui est née dans les industries de l'armement et de l'aéronautique dont l'objectif principal consiste à garantir que

Normalisation

L'on sait identifier de manière efficace et précise l'information relative à un produit (une structure ou un équipement) qui a été construit et ce indépendamment du fait que cet équipement soit réellement déployé ou utilisé.

La gestion de configuration fait l'objet de la norme ISO 10007:2017 (Quality management - Guidelines for configuration management / Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour la gestion de la configuration) dont l'un des objectifs avoués est d'aider les entreprises à satisfaire les exigences exprimées dans la norme ISO 9001:2015 au paragraphe 8.5.2 et qui concernent l'identification et à la traçabilité des produits ou des services. La principale norme dont les entreprises ont adopté les principes et les recommandations reste néanmoins la norme SAE EIA-649C:2019 (Configuration Management Standard), portée par l'Electronic Industries Alliance (EIA) et SAE International.

La popularité et l'acceptation de la méthode dans l'industrie a conduit SAE International à publier des déclinaisons de la norme, sous la forme de manuels d'application destinés à divers secteurs industriels, métiers ou univers contractuels (par exemple : SEA EIA649_1:2020 « Exigences en matière de gestion de configuration dans les contrats du secteur de la Défense », SEA EIA649-2 :2020 « Exigences en matière de gestion de configuration dans les entreprises qui composent ou effectuent des travaux pour la NASA », etc. elles ont aussi provoqué la création de groupes d'intérêt, d'organismes de formation et de certification des compétences dont l'un des plus anciens et des plus renommés est l'IpX (Institute for Process Excellence), dont le parcours de certification, nommé CM2, est souvent présenté comme constituant un standard en lui-même.

Principes

Le principal objectif de la gestion de configuration est de contribuer de manière continue à améliorer la qualité des produits. Pour ce faire elle s'appuie sur cinq disciplines principales.



Fig.19 : Les disciplines de la gestion des configurations

1. La planification et le management des configurations.
2. L'identification des configurations.
3. La gestion des modifications.

Elle s'appuie, sous le contrôle d'une « **commission de contrôle des modifications** » (CCB – Change Control Board) sur les processus définis par la planification des modifications, pour faire réaliser les études et les tâches qui permettent de modifier les produits. Elle comprend deux documents principaux :

- La **demande de modification**, appelée aussi **ECP** (Engineering Change Proposal) ou **ECR** (Engineering Change Request).

- La notice d'application des modifications, appelée aussi ECN (Engineering Change Notice).
- 4. La prise en compte des configurations.
- 5. Audit de la gestion des configurations.

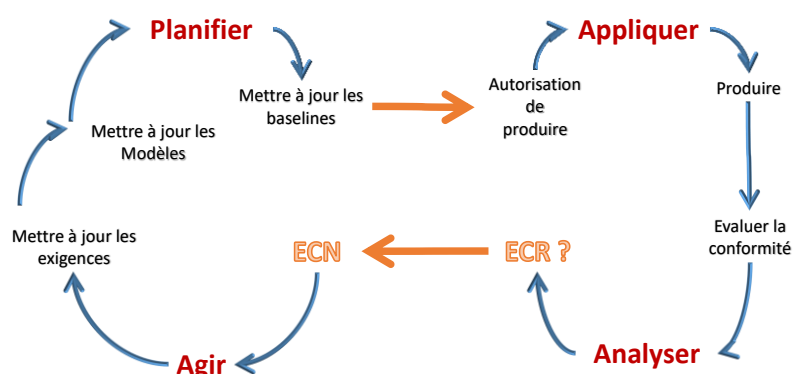


Fig.20 : Principe de la gestion de configuration

Gestion de configuration de type CM2

C'est une méthode améliorée de gestion de configuration qui a été définie par l'organisme de formation **CMII Research Institute** et qui prend en compte les principes de l'ingénierie des systèmes. Les recommandations **CM2** harmonisent en fait les normes et les pratiques de la Gestion des Configurations avec les principes définis dans les **normes ISO ISO/IEC/IEEE 15288** (Ingénierie des systèmes et du logiciel — Processus du cycle de vie du système), et dans les normes de la série **ISO 9000** (Management de la qualité).

4.3 Risque Projet

Le concept de risque projet

Par nature, la notion de Projet porte intrinsèquement le concept d'incertitudes. L'incertitude est liée à la spécificité du produit, service ou résultat unique (définition PMBOK du PMI®¹⁶) spécifié et réalisé qui caractérise tout projet qu'il soit d'ouvrage (construction, système de transport...) ou industriel (automobile, aéronautique...).

L'incertitude se porte classiquement sur les trois objectifs majeurs (la « triple contrainte » : Coûts, Délais et Performance) auxquels peuvent s'adjoindre par contrat des critères tels que l'environnement, l'image, la sécurité... Deux projets techniquement similaires se distingueront *a minima* par un contexte différent sur le terrain.

Incertitude et certitude

Dans la gamme des incertitudes qui affectent un projet, le concept de risque projet est souvent considéré comme une boîte noire associée généralement à l'idée de danger héritée de son étymologie italienne « rischiare ». Cette filiation est porteuse d'ambiguïtés dont on retrouve les traces dans les différentes définitions (AFNOR 1993 ou DGA 1995) apparues depuis l'après seconde guerre mondiale et dont on trouve des traces dans certains esprits quand ce n'est pas sur des témoignages concernant des projets en cours...

¹⁶ PMBOK (Project Management Body of Knowledge) est un guide de gestion de projet, réalisé par le PMI (Project Management Institute). Il est normalisé IEEE 190-2003.

Conséquences négatives et positives

L'incertitude qui qualifie ce qui est susceptible de doute (probabilité ni 0% ni 100%), à l'inverse de la certitude, offre potentiellement une gamme de possibilités.

Le PMBOK du PMI®, dans sa deuxième édition publiée en 2000, identifie non seulement les conséquences négatives mais aussi les conséquences positives liées à la concrétisation éventuelle d'évènements ou de conditions incertains. Ainsi des écarts par rapport à des prévisions peuvent-elles être difficilement acceptables, voire inacceptables, mais aussi favorables, voire à encourager.

Ce changement de paradigme se concrétise en 2008 dans la norme ISO 31000 (Management des risques - Principes et Lignes Directrices) qui définit le risque comme : « l'effet de l'incertitude sur les objectifs du projet ».

Notion de criticité de risque projet

Une incertitude dont il est possible d'établir à la fois une probabilité d'occurrence et une ou des conséquences (impacts) et pouvant faire l'objet d'une mesure (qualitative ou quantitative) permet de définir un niveau (score) ou criticité de risque projet.

Les enjeux

L'anagramme du mot risque est « requis », et malheureusement, trop souvent les risques ne sont pas assez souvent pris en compte ! Au-delà d'un simple jeu de lettres, ce sens caché confirme l'exigence du risque charpentant tout projet depuis l'idée jusqu'à la clôture du contrat.

Les entreprises sont de plus en plus organisées en mode projet dont la concrétisation se traduit par la signature d'un contrat après souvent une procédure d'Appel d'Offres.

La portée du management des risques se traduit sur les 3 phases suivantes :

- Gain du Contrat (Appel d'Offres).
- Exécution du Contrat.
- Clôture du Contrat.

Au stade de la réponse à appel d'offres, l'un des facteurs prépondérant (même si le Code des Marchés publics a évolué du moins-disant vers le mieux-disant) demeure l'offre financière.

Toutes choses égales par ailleurs, l'enjeu est ici d'afficher le prix de vente le plus réaliste possible. Rappelons qu'un prix de vente s'établit par l'addition d'un coût budgété de production, de provisions (de projet et de management) ainsi qu'une marge opérationnelle.

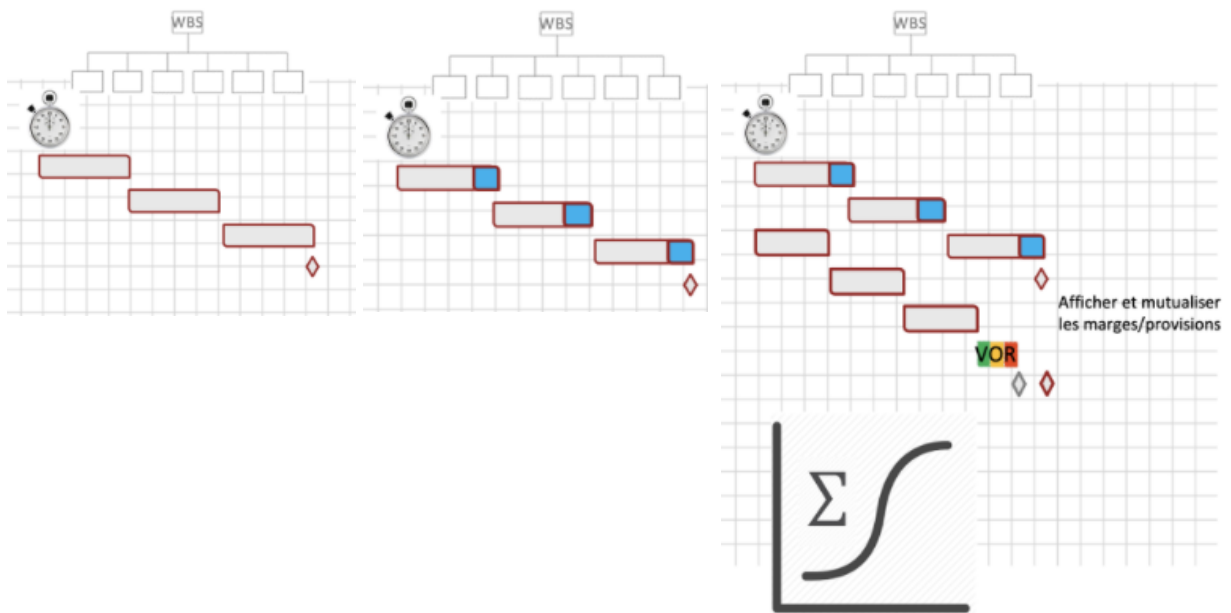
Il existe une double condition à tout établissement d'un prix de vente réaliste :

- un planning robuste,
- une provision pour risques.

Un planning robuste

Un planning robuste est établi sur la base d'un organigramme des tâches solide (exhaustif et cohérent) dans le cadre d'un processus de planification robuste.

Au niveau du planning (voir Fig.21), l'enjeu est d'afficher les marges pour les mutualiser et de les contrôler via un pilotage d'une zone dite « tampon » via un indicateur de type « tricolore VOR » (Vert-Orange-Rouge).



Organigramme des tâches

Zone tampon de chaque tâche

Référence assurée

Fig.21 : Le planning et la mutualisation des marges

Une provision pour risques

La provision pour risques se divise en :

- Provisions de Management sous l'autorité du Parrain ou Sponsor du Projet (ou autorité supérieure).
- Provisions de Projet ou « risques calculés » sous l'autorité du Directeur de Projet.

Ces provisions sont liées aux :

- Risques internes.
- Risques externes (internes clients).
- Risques externes-externes (externes client).



Provision pour risques

Provision de management et de projet

Fig.22 : Les provisions pour risques

Estimer l'incertitude

Pour estimer l'incertitude de la durée et le coût des tâches, il existe plusieurs options telles que le dire d'experts, le consensus de groupe, l'estimation analogique

ou Retour d'expérience ainsi que les techniques d'estimation dites trois points, développées ci-dessous.

L'incertitude associée à la durée d'une tâche est paramétrée selon quatre données :

- Le modèle de distribution de l'incertitude ;
- La technique d'estimation Trois Points :
 - durée minimale,
 - durée usuelle ou la plus probable,
 - durée maximale.

Les modèles de répartition

Il existe beaucoup de modèles de répartition de l'incertitude. Parmi les plus courants :

- La distribution normale, Beta-PERT ou dite en cloche : utilisée lorsqu'une valeur est très probable et caractérise une forte maîtrise de la durée de la tâche.
- La distribution Triangulaire : utilisée lorsque l'on a une idée de la durée d'une activité mais que cette durée n'est pas très fiable. Phase d'intégration par exemple.
- La distribution Uniforme : se caractérise par les limites haute et basse sans aucune valeur la plus probable. Toutes les valeurs de cette distribution ont la même probabilité. Exemple : première phase de conception.
- Absence de distribution : dans le cas d'une valeur certaine, par exemple le séchage d'une pièce, il n'y a pas d'incertitude donc il n'y a pas de distribution.

Note : Le choix du modèle de distribution exerce une grande influence sur la simulation du délai du projet

- Les modèles « Uniforme » et « Triangle » sont pessimistes alors que le modèle normal est optimiste.
- Il est important de s'interroger sur la maîtrise de la durée d'une activité afin d'affecter le bon modèle.
- Affecter le même modèle à toutes les activités n'est à utiliser que pour obtenir une estimation.

Le management des incertitudes

Nous avons vu qu'une des réponses au management des incertitudes sur le déroulement d'un projet est de prévoir une provision calendaire et une provision budgétaire.

La mutualisation des provisions individuelles

Cette réserve disposée au niveau global (projet/système) s'obtient par la mutualisation des provisions individuelles au niveau des éléments composants le sous-système, organe, composants. Ces réserves fonctionnent comme une « épargne coopérative » gérées par la direction du projet ou par le responsable de lot au niveau des lots. Ces provisions « affichées » permettent d'éviter les redondances dans le management des marges sur les différentes activités/tâches. Associées à la Loi de Parkinson (« le travail se déroule de manière à combler le temps disponible pour son achèvement ») et la maîtrise du syndrome de l'étudiant¹⁷ décrit par E.Goldratt¹⁸ (tendance à démarrer une tâche au dernier moment et donc à consommer la marge associée à cette tâche), la mise en commun des provisions permet d'optimiser la durée et donc les coûts du projet/activités/tâches.

Le calcul d'incertitudes

Dans les projets de construction, de nombreux facteurs internes et externes peuvent entraîner des incertitudes liées à la planification et aux processus de construction, ainsi qu'à la qualité attendue en conformité avec les objectifs du projet. Le calcul d'incertitudes est basé sur une logique chronologique pour suivre la charge de travail et sur les interdépendances entre les activités planifiées sur la base de relations probabilistes.

¹⁷ Le syndrome de l'étudiant fait référence à la procrastination planifiée, lorsque, par exemple, un étudiant ne commencera à s'appliquer à un devoir qu'au dernier moment possible avant sa date limite. Cela élimine toute marge de sécurité potentielle et met la personne sous tension et sous pression.

¹⁸ Eliyahu M. Goldratt, "Critical Chain: a business novel", North River Press (1997)

Les paramètres du calcul

Le calcul du réseau prend en considération l'impact de la productivité et de la qualité du travail pour chaque activité, ainsi que la corrélation de ces impacts entre les activités. Le calcul prend également les risques associés à la durée des activités et au retravail (rework). Le résultat de la simulation de type Monte Carlo fournit une distribution de probabilité qui permet au décideur de sélectionner la durée/coût du projet en utilisant la distribution de probabilité cumulative basée sur l'aversion au risque du décideur.

Le management des provisions

Le calcul des provisions pour gérer les incertitudes projet se fait en phase initiale au stade la réponse à l'appel d'offre et constitue une composante clé du prix de vente du projet/mission. Cette provision modélise les incertitudes associées à l'exécution du contrat. Tout changement du périmètre contractuel peut modifier le volume des réserves projet. Le management des provisions est l'un des points durs (culturels et techniques) du management des projets complexes.

La technique d'estimation à trois points

Cette technique d'estimation est utilisée pour l'élaboration d'une distribution de probabilités représentant le résultat approximatif d'événements futurs, dans un contexte d'informations très limitées.

Dans l'estimation E en trois points, trois chiffres sont produits initialement pour les deux distributions (normale ou triangulaire) sur la base de retours d'expérience antérieurs :

- O = la meilleure estimation (valeur Optimiste).
- D = l'estimation la plus probable (valeur Déterministe).
- P = l'estimation la plus défavorable (valeur Pessimiste).

Ces valeurs peuvent être ensuite combinées pour obtenir une distribution de probabilité à laquelle pourra être ajoutée d'autres variables telles que la valeur de la moyenne, de la médiane, l'écart-type et des percentiles de la distribution (P50, P90...).

La distribution normale, Bêta ou PERT

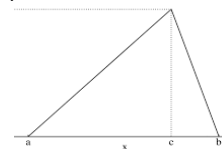
Dans le cas d'une distribution normale



- La valeur escomptée (moyenne pondérée) est calculée suivant la formule : $E = (1 \times O + 4 \times D + 1 \times P) / 6$
- L'écart-type est calculé suivant la formule : $\sigma = (P - O) / 6$

La distribution Triangulaire

Dans le cas d'une distribution triangulaire



- La valeur escomptée (moyenne simple) est calculée suivant la formule : $E = (1 \times O + 1 \times D + 1 \times P) / 3$
- L'écart-type est calculé suivant la formule : $\sigma = \sqrt{[(O - E)^2 + (D - P)^2 + (P - O)^2] / 18}$

Estimation de la durée d'un projet

Dans le cadre d'un projet, chaque tâche est définie par trois valeurs de la technique d'estimation dite trois points selon un type de distribution (normale ou triangulaire, uniforme, sans) sur la base d'un Réseau Logique (ordonnancement) robuste définissant le chemin critique, la durée estimée du projet et écart-type associé.

- $E(\text{Projet}) = \sum E(\text{Tâche})$
- $\sigma(\text{Projet}) = \sqrt{\sum \sigma(\text{Tâche})^2}$

La méthode Monte Carlo

La simulation de Monte Carlo ou méthode de Monte Carlo est une technique mathématique utilisée pour estimer les résultats possibles d'un événement incertain. Le but de la méthode de Monte Carlo est d'améliorer la prise de décision dans des conditions incertaines.

La méthode de Monte Carlo offre aux décideurs de visualiser l'impact des données d'entrée individuelles sur un résultat donné et leurs corrélations, permettant de mieux appréhender les relations entre toutes les données d'entrée.

Une simulation de Monte Carlo construit un modèle de résultats possibles en s'appuyant sur une distribution de probabilité, telle qu'une distribution triangulaire, normale ou uniforme, pour toute tâche présentant une incertitude inhérente. Elle recalcule par un nombre d'itérations de l'ordre du millier en utilisant à chaque fois un ensemble différent de nombres aléatoires entre les valeurs de durée minimales, maximales et probables (cf. Technique d'estimation Trois Points).

Estimation des coûts

Le même principe s'applique également pour l'estimation des coûts.

Six Sigma

La notion Six Sigma désigne à la fois une approche qualité englobant une mesure de performance et une méthodologie visant à améliorer l'efficacité et l'efficience des processus. Cette démarche se structure autour d'un double axe :

- Client (la voix du client).
- Données mesurables (les indicateurs).

En tant que philosophie, Six Sigma s'efforce d'atteindre la perfection pour répondre aux exigences des clients et des entreprises. Six Sigma nécessite d'être proactif et s'appuie sur la prévention. L'idée sous-jacente est de considérer un ensemble d'activités comme des processus qui peuvent être définis, mesurés, analysés, améliorés et contrôlés. Les processus nécessitent des entrées (x) et produisent des sorties (y). En contrôlant les entrées, il est possible de contrôler les sorties.

Ceci est généralement exprimé par une fonction $y = f(x)$, illustrée sur la Fig.23.

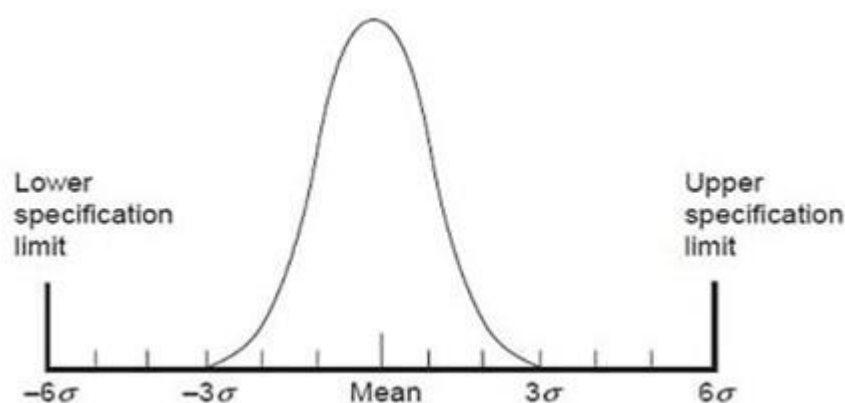


Fig.23 : Notion de SixSigma

En tant que mesure de performance, Six Sigma fait référence à un niveau de qualité proche de la perfection. Sigma est une lettre de l'alphabet grec utilisée pour représenter l'écart-type, mesure de la fiabilité des processus. Le contrôle statistique de la qualité vise un niveau de défaut qui ne dépasse pas 3,4 défauts par million

d'opportunités (DPMO). Un processus Six Sigma avec très peu de variations, présente un très faible écart type. La distance entre la moyenne et la limite de spécification la plus proche équivaut à six écarts types, ou six sigmas (dans les limites du processus à $\pm 3\sigma$ de la ligne centrale d'une carte de contrôle, et dans les limites des exigences/tolérances à $\pm 6\sigma$ de la ligne centrale).

En tant que méthodologie, Six Sigma met l'accent principalement sur l'approche DMAIC de résolution de problèmes pour les processus existants : définir, mesurer, analyser, améliorer et contrôler (Define, Measure, Analyse, Improve, Control).

Les techniques et outils Six Sigma utilisés sont d'ordre qualitatif et quantitatif dans la perspective d'améliorer les processus. Ces outils comprennent le contrôle statistique des processus, les cartes de contrôle, l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), la cartographie des processus...

Notons que l'approche Six Sigma est souvent associée au lean management pour former le Lean Six Sigma dont les objectifs convergent. Quand le Six Sigma se concentre sur la réduction des variations, le lean management cherche à éliminer les processus sans valeur-ajoutée.

4.4 Risques et Contrat

Triptyque : Projet, Contrat et Incertitudes

La notion de Projet de construction sous-tend la création d'un service ou d'un produit unique. Nous avons rappelé précédemment le caractère unique des projets et des incertitudes associées quant à l'atteinte des objectifs (performance, coûts, délais).

- Un projet de construction est un investissement économique et social porté par un Maître d'Ouvrage dont la réalité se concrétise par la signature de contrats entre les principaux acteurs du Projet (MOA, AMO, MOE, Entreprises...).
- Le succès d'un projet se détermine par la satisfaction des parties prenantes (liées ou non par contrat) c'est-à-dire le respect des exigences (implicites et explicites).
- La résilience ou la robustesse du contrat signé, réside dans l'optimisation de la répartition des risques entre les parties stipulée dans le contrat.

Objectif du contrat

Il est important de rappeler que le MOA (le Client) est l'acquéreur et le porteur du projet : tous les risques l'impacteront nécessairement s'ils se réalisent.

L'objectif du contrat est d'apporter clarté et certitude, soit en mitigeant, soit en transférant les risques aux parties les mieux à même de porter les risques.

Tous les documents contractuels DOIVENT être lus et analysés.

Rappel (Article 1101 du code civil) : « Le contrat est un accord de volontés entre deux ou plusieurs personnes, destiné à créer, modifier, transmettre ou éteindre des obligations ».

Un contrat est donc un accord de volonté entre les parties, en vertu duquel certains engagements sont pris. Il n'est pas forcément écrit. Mais certaines règles juridiques rendent l'écrit obligatoire dans certaines hypothèses ou certains domaines. Un élément déterminant du contrat est le consentement, un autre élément en est la preuve.

Objet du contrat

L'objet d'un contrat est de définir les relations entre les parties et les « règles du jeu ».

La gestion des contrats permet d'éviter les litiges (souvent liés aux incertitudes initiales) en traitant les problèmes dès leur apparition ; il répond aux questions suivantes :

- Qu'attend-on des parties ?
- Quelles sont les conséquences du non-respect des règles ?

Le périmètre contractuel

Les documents du référentiel contractuel

La prévention des Risques passe par la connaissance et la traçabilité du référentiel contractuel. Le contrat encadre la relation entre les parties au contrat par le biais d'obligations réciproques.

Les documents applicables au titre du contrat ou « Référentiel Contractuel » sont les suivants :

- Les **contrats** eux-mêmes :
 - contrat de vente,
 - sous-contrats d'achat,
 - accords avec des partenaires,
 - ...
- L'ensemble des **documents appelés par le contrat** :
 - Cahier des Clauses Techniques,
 - Cahiers des Clauses Administratives Générales (CCAG),
 - Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP).
- Les **documents d'environnement du contrat** :
 - accords d'état,
 - accords de non-divulgateion,
 - accords de transferts de savoir-faire,
 - ...

Les échanges d'informations avec l'extérieur

Le périmètre contractuel prend en compte les échanges d'informations avec l'extérieur :

- fichiers informatiques (notes, plans, modèles numériques...),
- courriels,
- lettres et recommandés,
- rapports,
- factures,
- présentations,
- ...

Les documents générés pour administrer le Référentiel Contractuel

Le référentiel contractuel comprend également les documents nécessaires à l'administration du référentiel contractuel :

- documents d'aide à la gestion documentaire du référentiel,
- documents de suivi des évolutions du référentiel contractuel,
- ...

Le processus de gestion contractuelle

Le processus de gestion contractuelle comprend les actions suivantes :

- identifier le référentiel contractuel,
- administrer le référentiel contractuel,
- piloter et interpréter le référentiel contractuel,
- encadrer les désaccords et les procédures contentieuses.

Contrat de sous-traitance

Remarques concernant le contrat de sous-traitance :

- La sous-traitance n'emporte pas le transfert de responsabilité.
- La sous-traitance ajoute une mission de contrôle.

Outils de traçabilité

Il faut apporter les preuves de l'exécution de la mission et de l'effectivité du devoir de conseil par le biais des :

- comptes-rendus de chantier,

- comptes-rendus du Maître d’Ouvrage,
- tableaux de bord,
- ...

Risques identifiables

Le concept de « risque » est souvent entendu de manières différentes. Sa définition peut encore faire débat. Pour lever les ambiguïtés et limiter les interprétations, il est recommandé de s’appuyer sur la norme ISO 31000 qui fait consensus.

Cependant, au nom risque est quelque fois adjoint le participe passé du verbe « identifier » pour former l’expression « risque identifié » voire « risque non identifié » particulièrement pour calculer des provisions pour risques. Dans les deux cas, cela pourrait représenter un paradoxe.

En effet, avec l’appui de la norme AFNOR FD X 50-117 (voir § 4.1), un « risque » est un événement potentiel identifiable et mesurable. Un « risque non identifié » signifierait non pas un risque mais un imprévu. La formulation « risque identifié » est de l’ordre du pléonasmisme car par nature un risque est « identifié », résultat du processus d’identification.

L’alternative proposée à « risque identifié » est « risque identifiable ». Le suffixe « -able » exprimant la capacité, la possibilité voire l’obligation d’identifier au sens de « déterminer la nature d’un événement potentiel » dans le contexte des objectifs du contrat signé.

Enjeux de la méconnaissance dans les différentes phases d’un projet

Selon les phases d’un projet de construction, la fiabilité des informations est variable et s’affine normalement avec l’avancement du projet.

En voici quelques exemples représentatifs :

Phase	Exemples de données d’entrée méconnues
Avant-Projet	<ul style="list-style-type: none"> • Sous-sol (géologie, géotechnique) • Réseaux enterrés • Zones sensibles • Biodiversité
Conception	<ul style="list-style-type: none"> • Exigences et performance à atteindre • Bâti existant (localisation, fondations, réseaux) • Changements climatiques
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Autres travaux en cours • Trafic routier • Logistique / Livraison • Proximité matériaux de construction • Qualification / Efficacité Main d’œuvre locale • Météorologie • Environnementⁱ
Exploitation /Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Localisation / accessibilité équipements • Date mise en service / Vétusté / Usure équipements • Documentation / Fiches techniques équipements • Impacts des systèmes entre eux • Impacts des systèmes entre eux • Climat et Météorologie

Risques des projets de génie civil

Initialement, de nombreux litiges portent sur la responsabilité des conditions du sol. Les conditions du sol présentent un risque majeur pour les projets de génie civil.

La responsabilité de l'entrepreneur

Les entrepreneurs cherchent souvent à s'appuyer sur les conditions du sol et avoisinants pour demander des prolongations de délai et un paiement supplémentaire.

En l'absence de conditions contraires, l'entrepreneur assume le risque de conditions du sol imprévues.

Au stade de l'appel d'offres, la MOA prévoit généralement que l'entrepreneur soit responsable de l'anticipation de toutes les conditions possibles susceptibles d'affecter les travaux.

Il en est de même pour l'impact sur les délais et les coûts, si l'évaluation initiale de l'entrepreneur se révèle erronée.

Les difficultés liées à la méconnaissance

Concernant l'entrepreneur, celui-ci dispose rarement de suffisamment de temps pour effectuer une étude approfondie du site avant l'appel d'offres. Il est donc très difficile pour l'entrepreneur d'inclure un prix précis pour faire face à toutes les conditions qu'il pourrait rencontrer.

Une interprétation parfois hasardeuse

Les entrepreneurs désireux de soumettre des prix compétitifs afin de remporter les marchés de travaux se sentent souvent obligés d'adopter une interprétation des conditions du terrain la plus favorable pour effectuer les travaux à moindre coût et rapidement. Ce biais est renforcé, surtout lorsque les propres consultants géotechniques de l'employeur ont fourni une évaluation optimiste au stade de l'appel d'offres. Dans de telles circonstances, l'entrepreneur imprudent peut très bien adopter aveuglément cette interprétation sans se demander si cette évaluation est juste.

Risques des projets travaux souterrains

Le principal matériau affectant les travaux souterrains est le sol qui est fourni par la nature.

Caractéristiques uniques des travaux souterrains :

- La variabilité des faciès des sols peut s'avérer facilement aller bien au-delà des éléments attendus et conduire à des conséquences majeures en termes de délais et de coûts voire en des pertes totales d'ouvrages et des accidents personnels majeurs.
- C'est également le cas pour toutes les structures avoisinantes.
- Le contrôle de la stabilité du front de taille, la méthode d'excavation et le type de sol sont des facteurs majeurs pour la réussite du projet.
- L'accès aux zones de travaux est souvent limité à quelques endroits ou même à un seul point en particulier dans les centres urbains.
- Les tiers sont généralement propriétaires du terrain sous lequel les travaux sont effectués.
- Les travaux souterrains nécessitent des investissements importants en termes d'équipements de la part des entreprises.
- La logistique et l'approvisionnement sont des éléments particulièrement cruciaux dans le déroulement de travaux souterrains.
- Les travaux souterrains sont généralement longs à réaliser.

Des préconisations

Comme indiqué au chapitre 4.1, la norme ISO 31000:2009/2018 définit l'effet de l'incertitude sur les objectifs du projet.

Dans le milieu de la construction, peu d'autres documents sont disponibles sur ces sujets, si ce n'est le Fascicule 69 du CETU¹⁹, mis à jour en 2019, qui donne des recommandations pour le management des risques techniques dans les projets de tunnels et travaux souterrains, en particulier sur les risques géologiques en trois phases itératives :

- Bilan des connaissances et incertitudes → registre des incertitudes.
- Appréciation du risque → conséquence et évaluation.
- Traitement du risque → registre des risques.

Le registre des incertitudes permet d'identifier les événements redoutés et de les apprécier, selon plusieurs critères :

- **Vraisemblance** (approche qualitative / possibilité que quelque chose se produise) : Possible/Peu probable/Très peu probable/Improbable.
- **Conséquence** (effet d'un événement affectant les objectifs) : Très forte/Fortes/Moyennes/Faible.
- **Niveau de risque** (combinaison Vraisemblance et Conséquences) :
 - inacceptable,
 - important (à surveiller),
 - significatif (mais acceptable),
 - négligeable.

Ces incertitudes sont couvertes par des provisions (PRI : Provision pour Risques Identifiés), et sont traitées par des actions pour réduire l'importance du risque, voire à le supprimer.

¹⁹ CETU (Centre d'études des Tunnels) : organisme du réseau technique et scientifique du ministère en charge des transports, ayant pour champ de compétence l'ensemble des techniques et méthodes relatives à la conception, la construction, l'entretien, l'exploitation et la sécurité des tunnels routiers. <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/>)

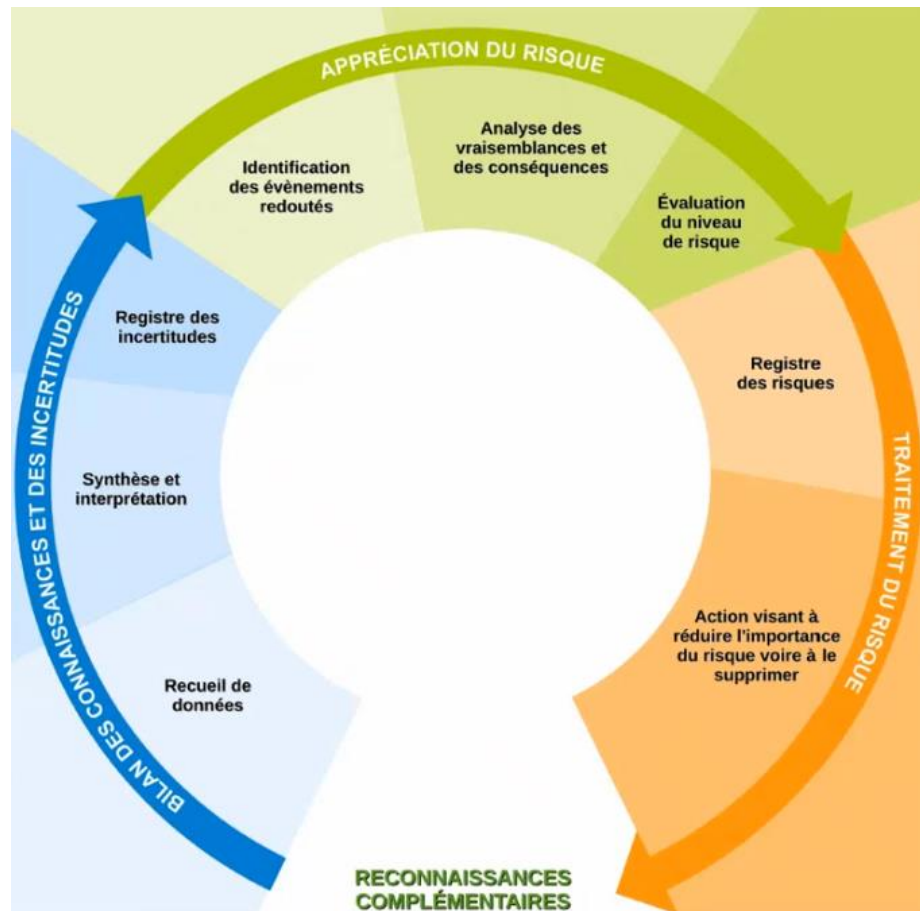


Fig.24 : Démarche itérative de management des risques géologiques (Source CETU)

Risques associés aux désordres des ouvrages d'art

Il faut distinguer les risques liés à la conception/construction et ceux liés à l'exploitation/maintenance qui relèvent uniquement de la responsabilité des gestionnaires (Par ailleurs, des risques liés à l'« exploitation/maintenance » non traités peuvent se concrétiser une fois que le projet est terminé).

Afin d'aider les gestionnaires d'ouvrages de génie civil, le CEREMA (Ex SETRA) a publié depuis 1996 plus de 40 catalogues gratuits²⁰ de désordres applicables aux ouvrages d'art, en fonction du type d'ouvrage (maçonnerie, béton armé, mixte...) et de la partie d'ouvrage concernée (piles, tablier...).

Les désordres sont identifiés après des constats d'inspection ou de visite, et sont consignés dans le dossier de l'ouvrage ou dans un procès-verbal type.

La gravité d'un désordre dépend en général de la présence de désordres complémentaires permettant de formuler un diagnostic.

Les catalogues du CEREMA traitent de l'ouvrage par lui-même, mais également des équipements sur ou sous ouvrage (chaussée, dispositifs de retenue, dispositifs d'évacuation des eaux...).

Les principaux désordres des ouvrages sont les suivants :

- Défauts d'étanchéité du tablier.

²⁰ Boutique en ligne du CEREMA : <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/general?keyword=catalogue+des+d%C3%A9sordres>

- Ruptures d'appuis.
- Rupture de tablier au droit d'un appui.
- Fissures longitudinales ou transversales.
- Fissure d'angle ou d'encorbellement.
- Éclatement de béton ou de parement.
- Oxydation des ancrages.
- Armatures apparentes.
- Tassement d'appui.
- Défaut de verticalité d'appui, faux aplomb ou vrillage.
- Défaut d'horizontalité d'appui.
- Développement de pathologies (corrosion, réactions de gonflements internes RSI et RAG...).

Ces désordres entraînent des problèmes de sécurité et de disponibilité pour les usagers, car ils peuvent conduire à des risques d'effondrement des ouvrages.

L'évaluation des risques porte sur les capacités d'un ouvrage, c'est à dire sur la capacité portante de l'ouvrage. Pour cela, il faut donc assurer le suivi des déplacements relatifs (déformations) au moyen d'indicateurs (déplacement des appuis, tension des câbles, comportement dynamique...) qui donnent une réponse sur la conformité de l'ouvrage à ce qui était attendu.

En France, les ouvrages d'art sont surveillés et évalués régulièrement, pour définir si :

- État de service normal (les opérations de maintenance doivent le maintenir).
- État de service anormal ou risque de le devenir (des mesures doivent être prises pour assurer la sécurité des usagers).

Il existe un classement de l'état des ouvrages d'art IQOA²¹ (de État 1 : Ouvrage en bon état apparent, à État 3U : Ouvrage à la structure gravement altérée nécessitant un programme de travaux urgents).

Entretien courant

L'entretien courant comprend une liste d'actions que la région ou la commune peut assurer, sans faire appel à une entreprise spécialisée :

- nettoyage de toutes les parties de l'ouvrage et de ses abords,
- élimination de la végétation et des amas de corps flottants,
- maintien en état des :
 - dispositifs de retenue,
 - dispositifs d'assainissement et drainage,
 - dispositifs de fixation des équipements à l'ouvrage (signalisation, éclairage...),
 - accès de visite.

Entretien spécialisé

L'entretien spécialisé diffère de l'entretien courant par les moyens particuliers et les techniques spéciales qu'il nécessite.

Il concerne essentiellement la réfection ou le remplacement d'équipements (joints de chaussée, couche de roulement, dispositifs d'évacuation des eaux...) ou d'éléments de protection (peinture, étanchéité, ventilation, enrochements...).

²¹ IQOA : Image de la Qualité des Ouvrages d'Art. http://lagora.setra.developpement-durable.gouv.fr/Fichiers/IQOA-Classification%20des%20ouvrages_Mai1996.pdf

Réparation

Mais aussi des travaux mineurs sur la structure (remplacement de boulons ou rivets, réfection d'un radier, soulèvement du tablier pour recalage des appareils d'appui, ragréages, rejointoiements...).

On entend par réparation toute intervention plus ou moins lourde sur la structure, visant à la remettre en bon état. À titre d'exemples :

- changement d'appareils d'appui,
- confortement de fondations,
- renforcement par tirants,
- réfection d'assemblage d'une structure métallique,
- changement de suspension,
- injection de gaine de précontrainte.

Risques associés aux évènements climatiques, météorologiques

Le risque climatique et météorologique est un risque lié à la vulnérabilité accrue des entreprises et des ouvrages par rapport aux variations des indices climatiques tels que la température, les précipitations, l'ensoleillement, le vent, la neige...

Ce risque ne concerne que les variations ordinaires du temps sur l'impact potentiel sur la performance d'une entreprise ou d'un ouvrage, d'une anomalie météo, c'est-à-dire de la fluctuation autour de sa valeur moyenne. Cette normale est en général calculée sur 30 ans.

Les bouleversements climatiques observés ces dernières années engendrent des incertitudes, voire des inconnues, dans le domaine de la construction, pendant la phase de réalisation, mais aussi pendant la phase d'exploitation.

Certains phénomènes, ou certaines occurrences de plus en plus fréquentes, entraînent également des évolutions de la réglementation (par exemple la réglementation nucléaire « post-Fukushima »).

Vent violent et tempête

Un vent est généralement estimé violent donc dangereux lorsque sa vitesse atteint 80 km/h, et 100 km/h en rafale à l'intérieur des terres.

Les principaux dégâts engendrés par les vents violents sont des toitures et cheminées endommagées, des arbres arrachés, des véhicules déportés sur les routes et des coupures d'électricité et de téléphone. La circulation routière peut également être perturbée, en particulier sur le réseau secondaire en zone forestière.

Pendant la phase de réalisation d'un ouvrage, alors que la structure même n'est pas complète, les impacts peuvent être importants sur les moyens de maintenances (grues, palonniers...), sur les structures provisoires en cours de réalisation, mais aussi sur les matériels entreposés...

Pendant la phase d'exploitation, les impacts portent sur l'usage des ouvrages (fermeture d'ouvrages d'art ou de réseaux routiers ou ferroviaires).

Neige et Verglas

Les régions sont diversement acclimatées à la neige. Les villes, surtout celles situées en plaine, ne sont en général pas conçues pour vivre avec de la neige et en subiront plus lourdement les effets, même pour un enneigement faible.

Une hauteur de neige collante de seulement quelques centimètres peut perturber gravement, voire bloquer le trafic routier, la circulation aérienne et ferroviaire.

La formation de verglas ou de plaques de glace rend le réseau routier impraticable et augmente le risque d'accidents.

Grand froid	C'est un épisode de temps froid caractérisé par sa persistance, son intensité et son étendue géographique. L'épisode dure au moins deux jours, pour des températures nettement inférieures aux normales saisonnières de la région concernée. Par ailleurs, la surconsommation électrique due au froid peut engendrer des coupures du réseau d'électricité.
Canicule	Le mot « canicule » désigne un épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée (pour le sud de la France, plus de 20 °C la nuit et 35 °C le jour). Une forte chaleur devient dangereuse pour la santé dès qu'elle dure plus de trois jours. Les personnes déjà fragilisées sont particulièrement vulnérables. Lors d'une canicule, elles risquent une déshydratation, l'aggravation de leur maladie chronique ou encore un coup de chaleur. Cependant, les personnes en bonne santé (notamment les compagnons sur chantier exposés à la chaleur) ne sont pas à l'abri si elles ne respectent pas les précautions élémentaires
Vague et submersion marine	<p>Les submersions marines peuvent provoquer des inondations sévères et rapides du littoral, des ports et des embouchures de fleuves. Elles sont liées à une élévation extrême du niveau de la mer due à la combinaison de plusieurs phénomènes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité de la marée (niveau marin dû principalement aux phénomènes astronomiques et à la configuration géographique). • Passage d'une tempête, produisant une surélévation du niveau marin (houle, vent, diminution de la pression atmosphérique). <p>La simultanéité des phénomènes aggrave la submersion, accroît les débordements et permet à la mer d'atteindre des zones habituellement abritées.</p>

Risques associés aux évènements sismiques	<p>Le risque sismique désigne la combinaison entre l'aléa sismique, les biens et les populations qui y sont soumises, et leur vulnérabilité face à cet aléa. En fonction des situations géodynamiques, politiques, sociales et économiques, le risque sismique dans le monde est très variable, selon les régions considérées²². Dans les régions les plus exposées à l'aléa sismique, la réduction du risque passe notamment par l'information des populations et la construction de bâtiments aux normes parasismiques.</p> <p>Afin de définir le risque sismique, les sismologues doivent caractériser :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aléa : étude des paléo-séismes enregistrés dans les archives géologiques ou humaines. • Enjeux : populations ou les infrastructures soumises à l'aléa. • Vulnérabilité : dépend des caractéristiques géologiques de la région, de la préparation des populations et de la qualité des infrastructures.
--	---

Risques associés au planning	<p>Le risque associé au planning est constant lorsqu'il s'agit de projets de construction qu'ils soient de tout type et de toute taille. Les variables en jeu sont innombrables, allant d'événements imprévisibles tels que météorologiques, pénurie de main-d'œuvre et interruptions de la chaîne d'approvisionnement aux événements inattendus sanitaires, économiques et géopolitiques mondiaux.</p> <p>Le secteur de la construction a largement adopté une approche de gestion des risques, notamment en ce qui concerne les plannings projet et les délais de livraison.</p> <p>Pour une meilleure gestion des risques liés au planning, il existe un processus en 5 étapes décrites ci-après.</p>
-------------------------------------	--

²² Pour la France, le zonage sismique est défini dans l'Eurocode8 (arrêté du 22/10/2010). Le BRGM a émis en 2012 une synthèse sur la prévention du risque sismique dans 10 pays : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61824-FR.pdf>

Identifier les risques	<p>Au démarrage d'un projet, l'équipe de management identifie les risques potentiels, en tenant compte du fait que les risques peuvent être des menaces ou des opportunités.</p> <p>Puisqu'il est impossible d'identifier et gérer tous les risques, l'équipe de management doit se mettre d'accord sur les événements susceptibles de se produire et avoir le plus gros impact. Ce sont ceux qu'elle surveillera et gèrera.</p>
Évaluer son exposition	<p>L'équipe de management doit ensuite déterminer la probabilité que chaque risque survienne ainsi que l'impact potentiel sur les plannings et coûts, ce qui donne une cote de risque où les risques les plus susceptibles de se produire ou ayant un impact important auront un score élevé.</p> <p>Durant cette phase, l'équipe priorise sa manière de gérer les risques spécifiques, ce qui est particulièrement important pour les projets et programmes conséquents qui peuvent présenter des centaines de risques potentiels.</p>
Déterminer une stratégie de réponse	<p>Après avoir noté chaque risque, l'équipe de management doit déterminer quelles actions spécifiques ils peuvent mettre en place pour atténuer les risques les plus importants. Ce processus exige la capacité de modéliser et évaluer des scénarios de simulation pour déterminer le coût/bénéfice de chaque stratégie d'atténuation de risques.</p> <p>Bien que les responsables projet ne puissent pas modifier le risque de mauvais temps, ils peuvent réduire l'impact sur le projet en prévoyant un planning, une main-d'œuvre et une chaîne d'approvisionnement appropriés.</p>
Communiquer pour la visibilité	<p>À partir du moment où les risques ont été identifiés, évalués et que les stratégies d'atténuation ont été définies, cette information doit être communiquée aux intervenants. Ce processus doit être vu comme une opportunité de faire preuve d'une approche proactive et d'efforts pour maîtriser les risques liés au projet – en respectant même les problèmes qui ne sont pas entièrement contrôlables.</p> <p>Pour les entreprises, une telle communication sert également de forum pour discuter avec la maîtrise d'ouvrage des risques, des stratégies d'atténuation de ceux-ci et de l'impact potentiel sur le planning et les coûts du projet.</p>
Superviser, adapter et répéter	<p>Le risque n'est pas statique ; il continue d'évoluer, parfois rapidement. C'est pourquoi les responsables des projets doivent régulièrement mener des évaluations et adapter leurs stratégies en fonction de l'évolution des conditions.</p> <p>Bien que les risques ne puissent être éliminés, les entreprises générales qui adoptent une approche méthodique et collaborative de la gestion des risques seront mieux équipées pour gérer les menaces ou les opportunités au fur et à mesure qu'elles se présentent pendant le cycle de vie du projet. En disposant de plus d'informations sur chaque risque et sur l'impact des différentes stratégies d'atténuation, les gestionnaires de projet peuvent prendre des décisions plus éclairées sur la meilleure voie à suivre.</p>
Pilotage du risque planning	<p>L'évaluation et la gestion des risques liés au planning nécessitent l'intégration d'ensembles d'informations dynamiques et variées, comprenant des données de budget, de coûts et de planning. Ce n'est pas un processus bien adapté aux environnements cloisonnés. Même basé sur des tableurs il nécessite un bon niveau de collaboration et une gestion des données centralisée.</p> <p>Cela contribuera à garantir que tout le monde a la visibilité nécessaire sur l'ensemble des projets pour identifier les problèmes, comprendre les interactions entre les activités et rapidement prendre des mesures pour atténuer l'impact sur les projets.</p>

4.5 Contrats justes et équilibrés (Exemple FIDIC)

**Allocation
risque/opportunité**

Les conditions de contrat FIDIC²³ (Fédération Internationale Des Ingénieurs Conseils) sont largement adoptées par les Maîtres d'Ouvrage Publics et Privés à l'échelle internationale, ainsi que par les institutions financières telles que la Banque Mondiale.

Dans la famille des contrats FIDIC, dont chaque modèle est caractérisé par une couleur, les plus connus sont :

- Le Livre rouge : contrat de construction de construction pour les travaux de bâtiment et d'ingénierie conçus par le maître d'ouvrage
- Le Livre jaune : contrat de conception-construction pour les travaux de construction et d'ingénierie conçus par le constructeur
- Le livre d'argent : contrat clé en main pour les projets dits EPC/Turnkey²⁴.

Les caractéristiques essentielles d'un contrat FIDIC rendent l'allocation risque/opportunité juste et équilibrée.

La répartition équitable et équilibrée des risques et des bénéfices est largement acceptée comme la base appropriée pour la rédaction des contrats de construction afin de minimiser les risques de litiges, d'augmenter les chances de réussite des projets et de maintenir le prix du contrat à un niveau modéré et optimal. C'est un principe fondamental sur lequel les contrats de la FIDIC sont basés.

Concept de répartition "équilibrée" ou "équitable" des risques et des bénéfices.

Ces principes stipulent que la répartition des risques pour une partie à un contrat doit être déterminée par :

- Quelle partie peut le mieux contrôler le risque et/ou ses conséquences associées ?
- Quelle partie peut le mieux prévoir le risque ?
- Quelle partie peut le mieux endosser ce risque ?
- Quelle partie en fin de compte profite ou endosse le plus si le risque se concrétise ?

**Le Livre Émeraude de la
FIDIC**

Lancé lors du Congrès mondial sur les tunnels en mai 2019, le livre émeraude concrétise une initiative conjointe de la FIDIC et de l'ITA-AITES (International Tunnelling and Underground Space Association / Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain).

Le livre émeraude première édition des « Conditions contractuelles pour les travaux souterrains » est recommandé pour tout projet où « une proportion significative des travaux est réalisée sous la surface naturelle ou artificielle du sol » ou lorsqu'il y a une incertitude géotechnique importante.

Sur le modèle du livre jaune de la FIDIC de 2017, le livre émeraude a étendu l'allocation normalement équilibrée des risques de la FIDIC aux conditions du sous-sol.

Le livre d'émeraude invite les parties à s'entendre sur la responsabilité des conditions de sol imprévisibles et prévisibles.

Les parties conviennent d'un rapport géotechnique de base (GBR) dans le cadre du contrat.

**Mécanismes
d'ajustement du temps
et du prix du contrat**

La responsabilité liée des conditions du terrain (avantages et charges) est partagée entre les parties, ce qui permet la prolongation des délais, le recouvrement des coûts et un ajustement du prix du contrat par l'ingénieur/la maîtrise d'œuvre lorsque les conditions réelles divergent du GBR.

L'entreprise est censée avoir basé son offre sur les conditions énoncées dans le GBR.

²³ La Fédération Internationale Des Ingénieurs Conseil (FIDIC) a été fondée en 1913 avec des membres fondateurs originaires de France, de Belgique et de Suisse ; le Royaume-Uni a rejoint l'Union en 1949, les États-Unis en 1958. Elle est donc considérée comme internationale.

²⁴ EPC/Turnkey : Types de contrat englobant ingénierie, fourniture des équipements et construction (Engineering, Procurement and Construction).

Règles d'or du contrat FIDIC

1. Les devoirs, droits, obligations, rôles et responsabilités de toutes les parties au contrat doivent être, d'une manière générale, conformes aux Conditions Générales, et appropriées aux exigences du projet.
2. Les Conditions Particulières doivent être rédigées de manière claire et sans ambiguïté.
3. Les Conditions Particulières ne doivent pas modifier l'équilibre dans la répartition des risques prévue dans les Conditions Générales.
4. Dans le contrat d'engagement pour les parties au Contrat, tous les délais spécifiés à l'exécution de leurs obligations doivent être d'une durée raisonnable.
5. À moins qu'il n'y ait un conflit avec le droit applicable au contrat, tous les litiges formels doivent être soumis à une Commission de Prévention des Litiges et d'Arbitrage (ou de Règlement des Litiges le cas échéant) pour une décision provisoirement contraignante en tant que condition préalable à l'arbitrage.

4.6 Règles de l'art, Usages et Performances

Introduction

Dans l'acte de construire, les parties aux contrats doivent anticiper les incertitudes et tolérances liées à la partie technique de la conception et de la réalisation, sans omettre le départage des responsabilités qui obligent symétriquement les acteurs de la construction.

Dans le cadre de ces obligations, il faut distinguer les règles de l'art, les usages et les performances.

Règles de l'art

Les règles de l'art réunissent un corpus de pratiques acquises, propres à une corporation dont le respect assure la bonne exécution des prestations et des ouvrages. Les règles de l'art constituent le "savoir-faire habituel" qu'un maître d'ouvrage peut attendre d'un professionnel.

Elles correspondent à l'état des connaissances à un instant donné. Issues des bonnes pratiques et de l'expérience transmises oralement, les règles de l'art sont généralement non écrites.

Contenu

Si les règles de l'art s'imposent à l'ensemble des acteurs de la construction, le périmètre de leur contenu (en partie non écrit) reste imprécis et donc sujet à incertitudes. Les règles de l'art s'appuient sur des normes techniques dont l'homme de l'art améliore le contenu pour répondre aux exigences spécifiques. Ces mêmes règles évoluent au rythme des nouvelles techniques, faisant naître de nouvelles règles de l'art.

Les règles de l'art sont considérées dans leur ensemble comme des obligations contractuelles implicites. À titre d'exemple, il est ainsi tacite qu'un entrepreneur utilise le matériel et la méthode appropriés sans nécessité de mentionner cette exigence dans le cahier des charges.

Depuis plusieurs décennies, les règles de l'art ont vocation à se prolonger par des documents techniques écrits tant pour définir les clauses contractuelles que pour vérifier la bonne exécution des prestations. Leur statut n'est généralement pas celui de l'acte réglementaire de sorte seul le contrat rend ces documents techniques obligatoires.

À cet effet on identifie un riche panorama de textes, textes au titre desquels, on recense notamment les DTU documents techniques unifiés, les avis techniques, les ATEX, les évaluations techniques et appréciations du CSTB...

<p>Enjeux</p>	<p>S'agissant des documents techniques unifiés (DTU), ces documents formalisent sous la qualification de normes AFNOR propres au bâtiment des règles considérées comme étant des composantes des règles de l'art à un moment donné. Les règles de l'art ne se limitent pas aux DTU ou aux autres normes précitées.</p> <p>Les acteurs de la construction (maîtres d'œuvre, architectes, entrepreneurs...) doivent exécuter leurs obligations d'une manière conforme et diligente²⁵. En cas d'inobservation des règles de l'art dans leur domaine d'activité, leur responsabilité peut être engagée. La faute technique s'appréciera en fonction du respect, ou non, des règles de l'art.</p> <p>En cas de litige, il appartiendra à l'expert judiciaire d'établir la vérité des faits techniques.</p> <p>Il peut être souligné que dans le cas d'un non-respect des règles de l'art entraînant une inexécution ou la mauvaise exécution d'une obligation, les coûts de la mise en conformité et d'une éventuelle indemnisation pour préjudice du maître d'ouvrage sont à la charge du titulaire du marché de travaux conformément à l'article 39.2 CCAG Travaux 2009²⁶.</p> <p>Par exemple, la violation des règles de l'art peut être caractérisée par l'emploi de matériaux non compatibles, le sous-dimensionnement de pièces ou des erreurs de conception d'une structure.</p> <p>La clause type des polices d'assurance s'appuyant sur le Code des Assurances²⁷ prévoit une exclusion de garanties en cas de manquement aux règles de l'art définies par les réglementations en vigueur, aux DTU ou aux normes établies sur le marché de travaux concerné.</p>
<p>Usages</p> <p>Contenu</p> <p>Enjeux</p>	<p>Le Larousse définit l'usage comme « fonction de quelque chose, emploi qu'on peut en faire »... Déclarer que quelque chose doit être "adapté à l'usage" signifie qu'un bien ou un service doit répondre aux besoins du maître d'ouvrage ou atteindre un résultat particulier. Il s'agit d'une obligation de résultat selon laquelle l'entrepreneur garantit que l'ouvrage remplit l'usage auquel il est destiné.</p> <p>L'usage doit avoir été préalablement défini en des termes techniques suffisants. Cette responsabilité est celle du maître d'ouvrage. Ensuite, la conception/réalisation pour un usage ou une aptitude à l'emploi doit être établie sur la base des règles de l'art et sur les règles techniques en vigueur. La norme seule peut s'avérer insuffisante pour assurer une conception/réalisation conforme à l'usage. Il est ainsi recommandé aux parties au contrat d'identifier soigneusement les contours de l'obligation de résultat.</p> <p>L'article 1792 du Code civil et suivants, décrit le régime de responsabilité civile, abordant tant la question de la solidité de l'ouvrage que l'impropriété à la destination. C'est une responsabilité absolue (garantie légale) qui ne nécessite pas la preuve d'une négligence de la part de l'entrepreneur.</p> <p>Même lorsque l'entrepreneur n'a pas été négligent, sa responsabilité peut être engagée lorsque l'obligation de résultat par rapport à un usage déterminé n'a pas été honorée.</p> <p>Le maître d'œuvre et le titulaire d'un marché doivent se renseigner auprès du maître d'ouvrage sur la finalité de l'ouvrage et les usages qui en sont attendus. L'entrepreneur doit disposer du temps et des moyens nécessaires pour étudier les informations données par le maître d'ouvrage. Dans le cas des contrats de sous-traitance, une bonne pratique contractuelle consiste à insérer des obligations « contrat adossé ». Les obligations de l'entrepreneur à l'égard du maître d'ouvrage sont transférées de manière analogue à la charge des sous-traitants envers l'entrepreneur.</p>

²⁵ « Traité des contrats administratifs », tome II, 2 e éd. 1984, Ed. LGDJ, n° 802, p. 7. Voir CE 14 juin 1933, « Durin », rec. p. 624).

²⁶ Idem article 39.2 CCAG travaux 2021 issue de l'Arrêté du 30 mars 2021

²⁷ Code des assurances : Titre IV : L'assurance des travaux de bâtiment (Articles A243-1 à Annexe III art A243-1). https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000021340467/

Performance

Contenu

La définition de la performance peut être source d'ambiguïté selon l'optique choisie : exclusivement « ingénierie » ou purement contractuelle. La notion de performance comprend tout à la fois le déroulement d'un processus et la capacité à produire un résultat.

La performance s'évalue au moyen d'indicateurs de résultat par rapport à un objectif initial.

Performance et qualité sont souvent considérés souvent comme synonymes. On notera à cette occasion les définitions de la Qualité : "la qualité, c'est l'aptitude à l'emploi" (Dr Juran) et "la qualité, c'est la conformité aux spécifications" (P. Crosby).

Les règles de l'art participent à la performance des processus, méthodes et outils qui contribuent au résultat conforme à l'usage déterminé par le maître de l'ouvrage.

Le respect des DTU et autres normes écrites est tributaire de leur désignation dans les pièces du marché/contrat, qui les rend opposables. La rédaction des DTU incluent des prescriptions considérées comme étant les règles de l'art à un moment donné.

Le juge judiciaire précise par ailleurs qu'en l'absence de référence à ces DTU, deux cas sont à identifier :

- Soit le désordre pour lequel la responsabilité de l'entrepreneur est recherchée n'est pas lié au non-respect d'un DTU : Dans ce cas, la responsabilité de l'entrepreneur ne saurait être engagée au motif que « l'ouvrage ne serait pas conforme à un DTU ».
- En revanche, si le désordre est la conséquence de la méconnaissance d'une règle inscrite dans un DTU, la responsabilité de l'entrepreneur pourra être recherchée sur le fondement de la responsabilité délictuelle.

Lorsque les exigences ont été figées par les parties, il est recommandé de rédiger une matrice formelle de conformité afin de relier clairement les données d'entrée (les exigences explicites et implicites) aux données de sortie attendues de la phase de conception qui seront vérifiées pendant la phase de construction et d'intégration des équipements.

Enjeux

Dans les contrats tant de droit privé que de droit public, la conception doit se fonder sur l'exécution des « règles de l'art », telles qu'explicitées ci-avant.

Conclusion

Les incertitudes et tolérances s'appliquent à tous les stades de l'élaboration d'un ouvrage. Les parties prenantes à la construction sont soumises à des obligations contractuelles implicites et explicites qui doivent être conformes aux règles de l'art (entrepreneur) pour être propre à l'usage de destination (maître d'ouvrage/utilisateurs).

Pour atténuer les risques découlant d'une obligation de résultat, le titulaire du marché doit confirmer que la finalité de l'ouvrage a bien été détaillée par le maître d'ouvrage.

L'enjeu pour les professionnels est de pouvoir comprendre l'étendue de l'exclusion de garantie à la lecture de chaque contrat.

4.7 Notions de niveaux d'information

Notion de LOD

La notion de LOD (Level Of Detail, ou Niveau de Détail) est un concept difficile à mettre en œuvre dans un projet d'infrastructure. Le principe est de **définir le niveau de détail des informations géométriques et attributaires à atteindre** :

- À la fin d'un jalon ou d'une phase donnée.
- Dans un domaine particulier.
- Pour un objectif particulier.

En effet, un projet est composé d'une collection d'informations. Le niveau de besoin d'information de cette collection se raffine au fur et à mesure de la conception et de la connaissance précise des ouvrages à réaliser et des équipements à installer.

Si ce niveau est définissable pour chaque objet, il ne l'est pas de façon uniforme pour :

- Les objets d'un ouvrage à un jalon donné.
- Les types d'informations attachées aux données.

Niveau de besoin d'information dans la norme ISO 19650

La norme **NF EN ISO 19650-1**²⁸, au chapitre 11, introduit la notion de Niveau du besoin d'information (LOIN – Level Of Information Need) : « Il convient de déterminer le niveau du besoin d'information de chaque information à livrer en fonction de son objectif. Il convient que ceci inclue la détermination appropriée de la qualité, la quantité et la granularité des informations. Ce concept est baptisé « niveau du besoin d'information » et peut varier d'une information à livrer à une autre.

La norme ISO EN 17412

La nouvelle norme **ISO EN 17412-1:2020**²⁹ détaille cette notion de LOIN.

La définition du niveau du besoin d'information proposée par la norme est la suivante : « description des informations à livrer pour atteindre un objectif spécifique pour lequel les informations sont exigées ».

Le LOIN illustré sur la Fig.25 est composé de :

- LOG (Level Of Geometry, c'est-à-dire la description du détail et de l'étendue de la géométrie).
- LOI (Level Of Information, c'est-à-dire la description du détail et de l'étendue de l'information).
- DOC (c'est-à-dire l'ensemble de documents sur un sujet donné, en particulier sur un objet ou sur un système composé d'objets).

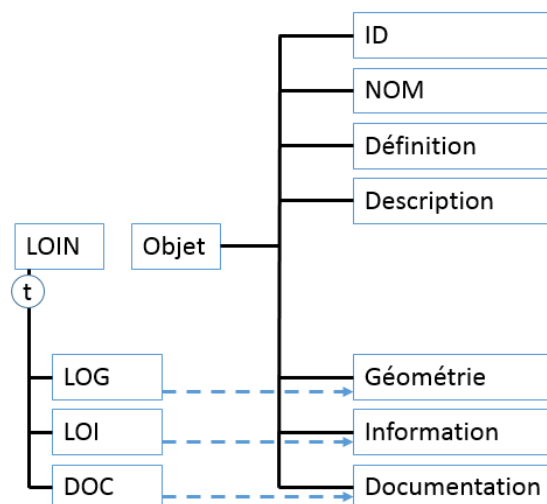


Fig.25 : Principe du niveau de besoin d'information

²⁸ NF EN ISO 19650-1 :2018 - Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) — Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction - Partie 1 : Concepts et principes

²⁹ ISO EN 17412-1:2020 - Modélisation des Informations pour la Construction - Niveau du besoin d'information – Partie 1 : Concepts et Principes

5. TOLÉRANCES

5.1 Principe des tolérances

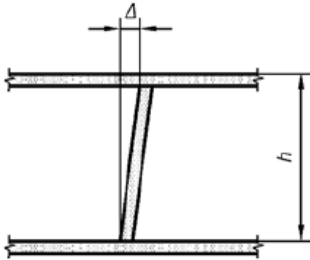
<p>Les différents textes existants</p>	<p>Le respect des tolérances réglementaires, contractuelles comme mécaniques et thermiques, contribue à la qualité et la pérennité des constructions.</p> <p>Ces tolérances sont donc primordiales, et sont documentés dans les textes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normes. • DTU (Documents Techniques Unifiés). • Règles ou recommandations professionnelles. • Règles RAGE (Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012). • Fascicule du CCTG. • Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP).
<p>Les textes applicables aux constructions immobilières</p>	<p>Pour le domaine de la construction immobilière, une norme explique les principes et la terminologie des tolérances :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ISO 1803 : 1997 : Construction immobilière-Tolérances- Expression de l'exactitude dimensionnelle – Principes et terminologie. • NF P 04-101 (Oct83): Tolérances dans le bâtiment - Vocabulaire • NF P 04-103 (Dec85): Tolérances dans le bâtiment - Vocabulaire général – Partie 2, dont les libellés sont adaptés au contexte de la construction française.
<p>Les textes applicables au génie civil</p>	<p>Pour le génie civil, nous pouvons en particulier citer :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norme NF EN 13 670³⁰ sur l'exécution des structures en béton. • DTU 21³¹ sur l'exécution des ouvrages en béton . <p>Ces documents exposent les différents types de tolérances rencontrés. Ils précisent également les valeurs de tolérances dans certains cas.</p> <p>D'autres normes dédiées à des domaines spécifiques précisent des tolérances de fabrication, d'exécution ou d'assemblage (pour les constructions métalliques et les soudures, pour les réseaux, voire même pour les barrières de sécurité en béton). Chacun de ces textes doit être consulté indépendamment, car il n'existe aucun ouvrage récapitulant les tolérances applicables à l'ensemble des métiers concernés par les projets d'infrastructures et de génie-civil.</p>

<p>Définition issue de la Norme NF P 04 101</p> <p>La tolérance dimensionnelle</p> <p>Typologie des tolérances selon la norme NF P 04-103</p>	<p>La tolérance est la « Variation admise de la valeur spécifiée pour une dimension ».</p> <p>La tolérance dimensionnelle est une variation admissible de la valeur spécifiée pour une dimension.</p> <p>Les typologies de tolérances dimensionnelles sont les suivantes :</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Type de Tolérance</th> <th>Définition</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aplomb ou verticalité</td> <td>Distance horizontale maximale admise entre la verticale du point le plus en avant et celle du point le plus en arrière de l'axe ou du nu de l'ouvrage, dans un plan vertical d'observation donné.</td> </tr> </tbody> </table>	Type de Tolérance	Définition	Aplomb ou verticalité	Distance horizontale maximale admise entre la verticale du point le plus en avant et celle du point le plus en arrière de l'axe ou du nu de l'ouvrage, dans un plan vertical d'observation donné.
Type de Tolérance	Définition				
Aplomb ou verticalité	Distance horizontale maximale admise entre la verticale du point le plus en avant et celle du point le plus en arrière de l'axe ou du nu de l'ouvrage, dans un plan vertical d'observation donné.				

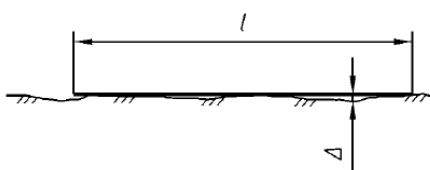
³⁰ AFNOR, 2013, NF P18-450, NF EN 13670 : Exécution des structures en béton.

³¹ AFNOR, 2017, (DTU 21) NF P18-201, NF DTU 21 : Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton – Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types.

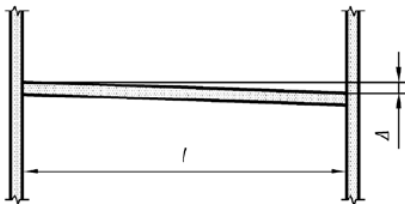
	Planéité	Irrégularité admissible de la forme réellement obtenue pour une surface prévue plane. Les tolérances de planéité générales et locales sont respectivement l'épaisseur de l'espace compris entre la surface de l'ouvrage et une règle de 2 mètres et de 20 centimètres.
	Niveau ou dénivellation	Distance verticale maximale admise entre l'horizontale du point le plus haut et celle du point le plus bas sur plan médian ou d'une face d'un ouvrage, dans un plan vertical d'observation donnée.



Tolérance de verticalité



Tolérance de planéité



Écart de niveau

Constat

Le non-respect des tolérances dimensionnelles est fréquent dans la construction. En effet, sur un chantier, l'application des tolérances dimensionnelles demeure un sujet vague, car la réglementation n'est pas très stricte en la matière. Ceci entraîne des **conséquences néfastes** sur la coordination des corps d'état, sur la mise en œuvre, la qualité et la performance des ouvrages, sur les matériaux et le fonctionnement des équipements, sur les coûts de la construction et le règlement des litiges et contentieux.

Les familles de tolérances

Les tolérances en mécanique peuvent être classées en deux grandes familles :

- Dimensionnelle (dimensions de la pièce).
- Géométrique (forme et position de la pièce).

Dans le monde de la construction, la catégorie dimensionnelle est la plus utilisée.

Application aux différents domaines

Certaines normes définissent la tolérance comme pouvant s'appliquer aux domaines :

Domaine	Exemple
Exécution	Tolérance de l'élément construit sur le chantier
Fabrication	Élément fabriqué en usine
Position	Situation d'un ouvrage dans ou par rapport à une construction.
Espaces libres	Espaces délimités pour la construction

Réalisation et Vérification

Le schéma Fig.26 ci-dessous permet de bien identifier le champ lexical développé dans ces normes. Il permet de distinguer le vocabulaire propre à :

- Conception (ou objectif).
- Réalisation.
- Vérification.

Il illustre également la manière de relier les valeurs d'une même dimension à trois moments de mesure.

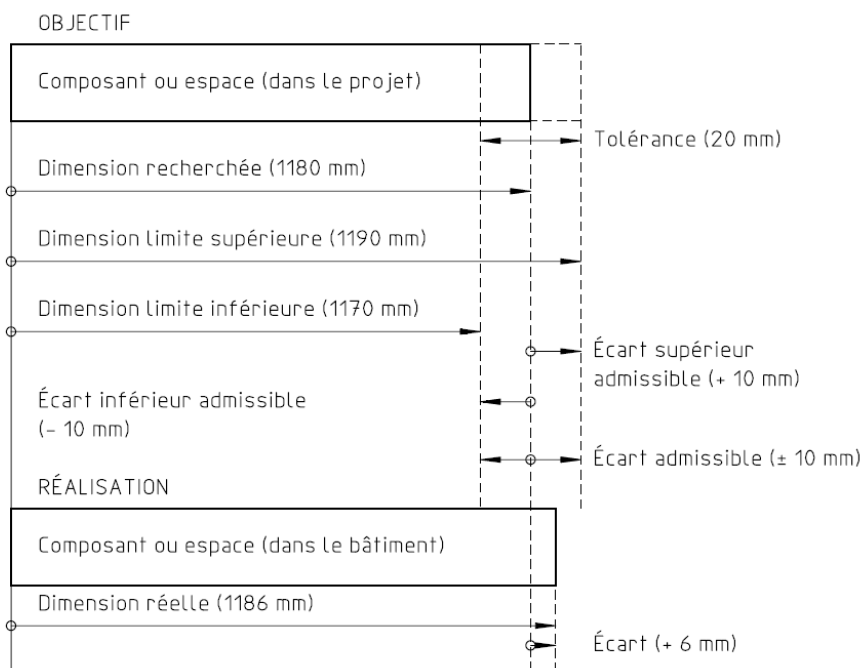


Fig.26 : Relation entre les termes clés de base pour une poutre (ISO 1803 : 1997)³²

5.2 État de l'art de la notion de tolérance

La coordination des tolérances...

... pour la coordination des métiers

Un souci à gérer est celui de la **cohérence des tolérances** propre à chaque matériau et donc chaque discipline. En effet, sur un chantier, plusieurs corps de métiers travaillent successivement et même simultanément avec des **échelles de tolérances différentes**.

C'est l'**exemple classique de la baie et de la fenêtre** :

- Le charpentier travaille en +/-5 mm, voire même 1 mm pour certains artisans.
- Le maçon travaille avec une tolérance de +/- 10 millimètres.

Nous avons donc une fenêtre avec une tolérance d'un millimètre devant entrer dans une réservation de +/- 10 millimètres. On a donc un rapport de 1 à 10 entre les deux corps de métier. Il faut donc prévoir des **systèmes de compensation** (par exemple, un joint de recouvrement de chaque côté de la fenêtre afin d'assurer l'étanchéité).

La cotation fonctionnelle

Explication par l'exemple

Une solution avancée pour le problème de cohérence des tolérances est l'utilisation du principe de cotation fonctionnelle (voir définition au chapitre 7.7).

Ce principe issu de la mécanique permet de définir les **dimensions correctes d'une pièce et leurs tolérances associées**, en tenant compte de l'ensemble du mécanisme **afin que les fonctions techniques soient respectées**.

Étude de la situation où plusieurs éléments sont placés dans un espace limité, où il faut utiliser la méthode de la chaîne minimale de cotes.

Pour résoudre le problème, le conteneur à réaliser (une salle de bain rectangulaire) à laquelle est attachée une tolérance, doit pouvoir s'adapter aux éléments situés

³²ISO 1803 : 1997 : Construction immobilière-Tolérances- Expression de l'exactitude dimensionnelle – Principes et terminologie

dans son intérieur, tout en respectant la condition fonctionnelle attendue pour une personne à mobilité réduite (Voir Fig.27).

Les éléments à positionner possèdent leurs propres contraintes dimensionnelles.

Les dimensions du conteneur avec ses tolérances sont déduites de la condition fonctionnelle et des composants intérieurs au conteneur.

C'est-à-dire que les dimensions de la salle de bain (Longueur L) sont déduites à partir du lavabo, de la baignoire (Largeur L_b) et du lave-linge à ouverture par le dessus (Longueur L_{LL}) et de la condition fonctionnelle qui est le passage d'un fauteuil roulant.

Il suffit donc de vérifier que la condition fonctionnelle est respectée dans le pire des cas, c'est-à-dire lorsque :

- Les éléments contenus sont les plus grands.
- Le conteneur est le plus petit.

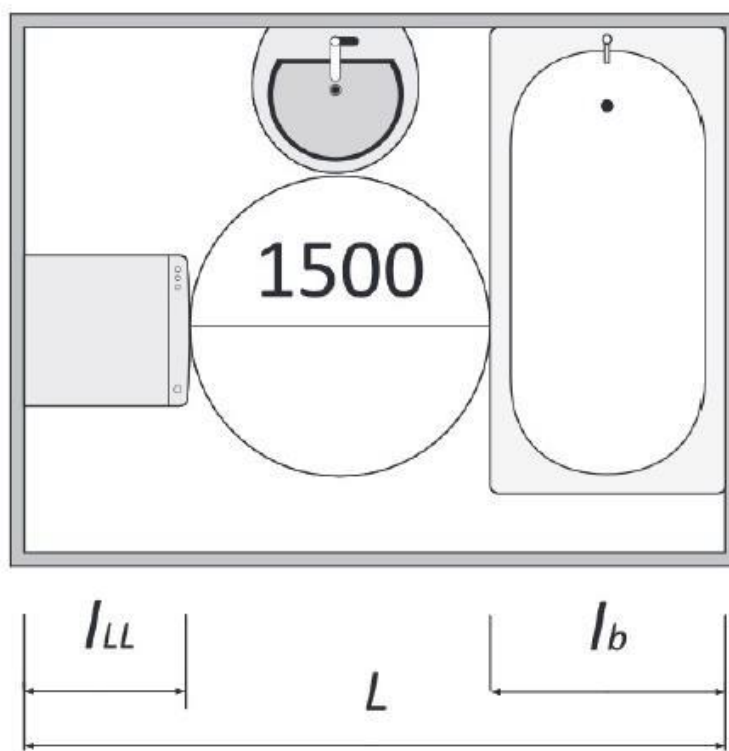


Fig.27 : Chaîne minimale de cotes pour une salle de bain (Savoini & Lafhaj³³)

Conclusion

Cet exemple Fig.27 illustre comment les **principes de la cotation fonctionnelle** sont **adaptés à la construction**. Ils permettent de dimensionner correctement tous les composants en :

- prenant en compte toutes les tolérances (tolérance de la baignoire et du lave-linge),
- respectant des conditions fonctionnelles (cote fonctionnelle PMR).

³³ Savoini, J.-J., Lafhaj, Z., 2017. Considering functional dimensioning in architectural design. *Frontiers of Architectural Research*

5.3 Tolérances prises en compte par les entreprises

La carte des tolérances

La gestion des tolérances en pratique

Les interfaces entre lots

On peut également dresser une vue consolidée des tolérances dans le domaine de la construction.

En pratique, les lots les plus précis corrigent bien souvent les défauts des lots les moins précis car, généralement les premiers succèdent aux seconds. Par exemple, les défauts de planéité d'un voile du lot Génie Civil seront corrigés par le plâtrier, intervenant du lot suivant.

Concernant les problèmes d'interface entre différents lots, des solutions sont à prévoir.

Pour une façade fixée sur le béton, cela peut être la conception de dispositif d'attache pouvant se régler comme des attaches avec des trous oblongs. Le même principe est utilisé pour la fixation de panneau ou de ventilation dans du béton.

Pour les ouvrages provisoires, ce peut être l'application d'une procédure telle qu'une pose d'un gabarit, d'un relevé dimensionnel localisé ou d'un contrôle topographique avant l'exécution.

Vue consolidée des tolérances dans le BTP

Il s'agit d'une représentation qui n'est pas vraie en absolu car les tolérances sont évidemment interreliées. La cartographie Fig.28 a pour objet de présenter le sujet des tolérances du point de vue du constructeur.

Remarque : le schéma précise que les exigences sont de 4 sortes. Les exigences « contractuelles » désignent celles écrites dans les pièces écrites du contrat, mais aussi celles issues des instructions techniques (plans et spécifications) établies par le MOE.

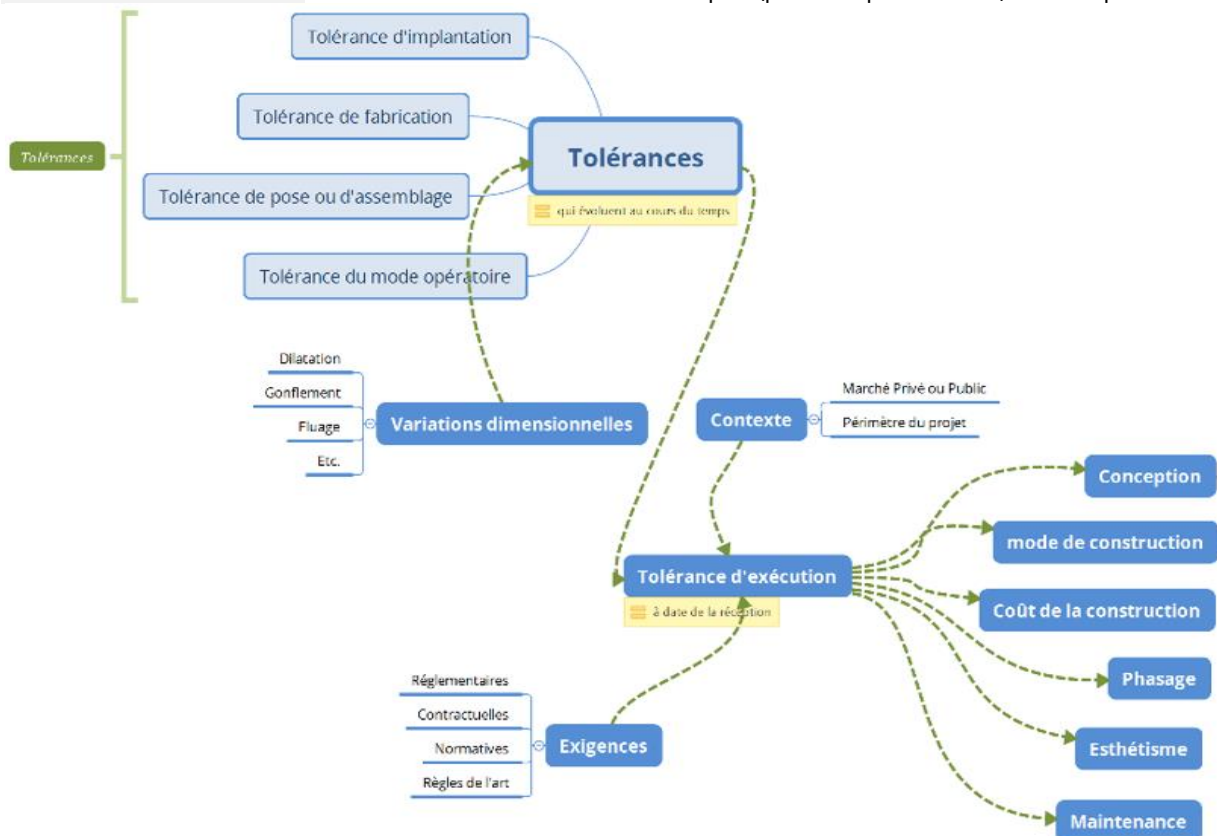


Fig.28 : Vue consolidée des tolérances dans le secteur de la Construction (Paul Masson, 2018)

Le principe de la tolérance d'exécution

L'entreprise de construction doit fournir au client un produit conforme aux exigences. La construction doit respecter la tolérance d'exécution à la date de la réception. Si la construction ne respecte pas les tolérances d'exécution du marché alors la réception est impossible. Elle ne se fera qu'une fois la non-conformité corrigée. Ceci impacte souvent le planning et entraîne des pertes financières.

La tolérance d'exécution et son environnement

La tolérance d'exécution varie selon le contexte du marché.

Dans le cas où l'entreprise principale coordonne tous les corps d'état, ce risque est géré. Cependant, si l'entreprise s'occupe juste d'un lot, et encore plus s'il s'agit du lot Génie Civil, le respect des tolérances est crucial.

La tolérance d'exécution varie également évidemment en fonction de:

- types de projets (pont, tunnel, etc.),
- contexte de ce projet (public ou privé),
- périmètre du projet (organisation du marché, budget financier),
- environnement (individus et organisation).

En effet, certaines dimensions ou caractéristiques de finition sont contractuelles comme le type de parement. D'autres sont réglementaires comme les cotes bloquées pour la sécurité incendie, l'accessibilité pour les personnes à mobilité réduite ou encore la hauteur maximale des marches en ERP (Établissement Recevant du Public).

La tolérance d'exécution est donc à déterminer en fonction de son contexte.

La tolérance d'exécution : un ensemble de tolérances

L'enjeu pour le constructeur est de livrer un produit respectant les tolérances d'exécution à un instant donné (la réception).

Mais la tâche n'est pas aussi simple qu'elle n'y paraît car une tolérance d'exécution est en réalité un ensemble de tolérances.

Tolérance d'implantation

Dans cet ensemble de tolérances, nous trouvons tout d'abord la tolérance d'implantation.

Il s'agit déjà d'un cumul de tolérances.

En effet, un point doit être placé sur le chantier dans un référentiel précis matérialisé par un maillage. Ce maillage peut d'abord contenir des erreurs. Une fois le point d'implantation déterminé, il faut réussir à l'implanter. L'implantation dépend justement du type de sol. Parfois pour des raisons organisationnelles, ce sont les compagnons eux-mêmes qui font l'implantation grâce à une bombe de peinture à partir de repères implantés par le topographe. Cela rajoute une possibilité d'erreur sur la mesure et une nouvelle encore concernant l'imprécision du trait.

Tolérance de fabrication

Ensuite, il peut survenir des tolérances de fabrication, notamment pour tout ce qui concerne les éléments de préfabrication. Une poutrelle métallique a également une tolérance de fabrication. Cette tolérance dépend du processus de fabrication.

Tolérances de pose ou d'assemblage

Les tolérances de pose ou d'assemblage sont également primordiales.

Par exemple, la pose des piles du viaduc de la Nouvelle Route du Littoral à la Réunion en plein océan Indien par la Barge Zourite était complexe. Cette barge ne pouvait atteindre une précision de mise en œuvre de l'ordre du centimètre dans un environnement maritime non maîtrisable.

Tolérance du mode opératoire

Enfin, la tolérance du mode opératoire constitue une partie de cet ensemble de tolérances. Certains modes constructifs sont plus précis que d'autres. Par exemple le type de coffrage influe sur la planéité du voile.

La tolérance d'exécution variable dans le temps

Une autre difficulté pour garantir le respect des tolérances d'exécution à la date de la réception est la **variabilité temporelle des tolérances**.

Ces tolérances varient dans le temps. Les composants subissent des variations dimensionnelles selon le phasage. En voici quelques exemples :

- Dans le cas des IGH (Immeuble de Grande Hauteur) : ils peuvent subir des tassements au cours de leur réalisation. De manière générale, la structure évolue différemment si elle est en charge ou non.
- Pour le béton : c'est le phénomène de fluage.

Ces variations peuvent également être à plus court terme. Il peut s'agir de:

- variations dimensionnelles liées à des effets thermiques qui entraînent des dilatations des matériaux,
- gonflement du matériau à cause de l'humidité,
- retrait du béton.

La tolérance d'exécution : un puissant déterminant

Ces tolérances définissent plusieurs paramètres pour la construction.

La conception est guidée par les tolérances à respecter.

Par exemple, pour les parkings à étages, dans un espace donné, il faut faire tenir un certain nombre de places possédant chacune des tolérances dimensionnelles. Pour assurer le nombre correct de places, il se peut que la conception des poteaux évolue. Les poteaux peuvent changer de forme (devenir cylindrique au lieu de rectangulaire) et leur dimension peut être diminuée. Ceci entraîne de nouveaux calculs de structures et de ferrillages. Les tolérances d'exécutions influent donc sur la conception de l'ouvrage.

Un critère pour la prise de décision des méthodes

Le choix du mode de construction est également fortement imposé par la tolérance.

Si nous reprenons notre exemple de planéité du voile, des objets coffrant spéciaux peuvent être conçus sur-mesure pour respecter un niveau d'exigence du client.

Un autre exemple est une dalle coulée avec un coffrage en contre-flèche pour respecter sa tolérance de planéité. La contreflèche doit avoir été déterminée pour compenser la déformation du coffrage sous charges du béton frais.

La tolérance d'exécution est un critère pour la prise de décision des méthodes de construction.

Un impact sur le coût de la construction

Il est évident qu'utiliser des modes de construction et des outils plus précis a également un coût. Les tolérances d'exécutions sont donc déterminantes pour le coût de la construction.

Les tolérances impactent également le phasage. Pour reprendre l'exemple de la dalle, un autre moyen de respecter l'exigence de flèche de la dalle est de la décoffrer à 28 jours afin que le béton atteigne sa résistance maximale. Une autre solution peut être la pose d'étais. Dans tous les cas, cette tolérance influe donc le phasage.

Un impact sur l'esthétisme

La tolérance d'exécution impacte aussi l'esthétisme. La régularité des joints sur une façade est, par exemple, un critère d'esthétisme.

Un impact sur la maintenance

Un dernier point est l'utilité des tolérances d'exécution pour la maintenance. Elles permettent de localiser approximativement des équipements. En connaissant l'emplacement, la maintenance est organisée de façon plus optimale. En effet, ces tolérances permettent d'évaluer l'accessibilité aux différents équipements.

La qualification et la compatibilité des matériaux

Nous avons vu toute l'étendue des tolérances en construction et les questions qu'elles soulevaient.

Il faut savoir que la gestion des tolérances est plus large encore. Elle peut concerner également la qualification des matériaux (hétérogénéité de la composition des matériaux) et leur compatibilité.

La compatibilité des composants

Les composants d'un ouvrage doivent répondre à des règles architecturales ou structurelles, mais aussi à des règles fonctionnelles de fabrication et d'assemblage. Les composants doivent à la fois être compatibles :

- géométriquement, pour assurer leur bon alignement,
- chimiquement, afin, par exemple, d'éviter l'oxydo-réduction et la corrosion,
- mécaniquement, afin d'anticiper les déformations sous charge et les déformations différentielles entre matériaux pouvant conduire à des augmentations de contraintes préjudiciables car hors des tolérances. .

Performance des composants

De plus, ces composants doivent respecter des critères de performance (étanchéité, isolation, sécurité, stabilité, solidité...), étroitement liés à la qualité des matériaux.

5.4 Deux rôles clés pour la gestion des tolérances

Le service Qualité

Tous ces exemples permettent de comprendre le rôle important du service Qualité qui va s'assurer de la réalisation correcte dès la première construction. Pour cela, il va synthétiser les tolérances d'exécution à respecter. Il va aussi sensibiliser le chantier aux tolérances.

Le topographe

Un autre rôle clé est celui du topographe. Il implante et contrôle l'implantation. C'est par exemple le cas des murettes-guide qui positionnent la tête de la paroi moulée sur le chantier.

5.5 La gestion des tolérances : une source de progrès

Le respect des exigences

Lors de la construction et du mesurage, les variations de dimensions sont inévitables. La prise en compte de la tolérance permet de gérer ces incertitudes et permet ainsi d'atteindre les objectifs.

Nous avons vu que l'intégration de la tolérance est une source de progrès en construction.

La théorie W

Sur la carte Fig.29, on constate que la réduction des incertitudes par l'exécution correcte des tolérances contribue à l'amélioration de la performance. Nous pouvons inscrire la démarche de tolérance dans la théorie W^{34} qui est la capacité à relier l'aspect technique au financier, à l'humain et à l'environnement.

³⁴ Haim, P., 2017. Théories X, Y, Z, ... W ? Différences et apports d'une nouvelle théorie du management. Colloque de l'IP&M et de l'IAE de Lyon sur les « Être et mal être au sein des organisations », Lyon.

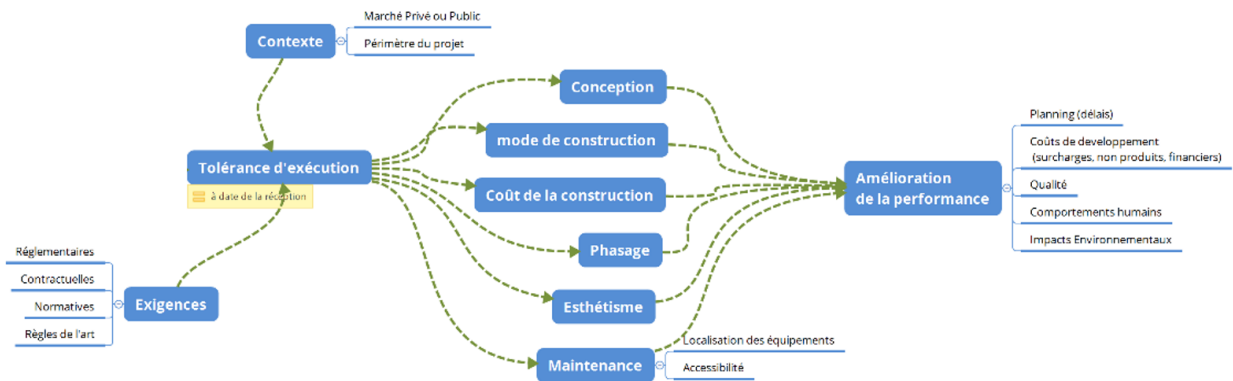


Fig.29 : Vue consolidée des tolérances dans le BTP inscrites dans le processus stratégique systémique de la théorie W (Haim, 2012)

Une évolution nécessaire

Dans le secteur de la construction, les tolérances dimensionnelles sont rarement intégrées dans les plans et les documents graphiques des bureaux d'études, et encore moins dans les maquettes numériques d'où sont issus les plans. Il semble pourtant indispensable de les mentionner, mais aussi de se donner les moyens de les mettre en œuvre, dans un objectif de qualité, de respect des performances attendues, et de réduction des coûts induits par les erreurs.

5.6 Modélisation des tolérances dans les outils de modélisation et d'analyse

La modélisation numérique au service de la modélisation des tolérances

La modélisation numérique d'un ouvrage permet de prendre en compte et d'exposer les notions de tolérances dans la construction.

Elles sont associées aux représentations du futur ouvrage au travers d'informations enrichies, sur les plans 2D, les modèles 3D et les assemblages représentatifs de la future construction.

Des études spécifiques sur des modèles numériques avec des objets paramétrés aux dimensions extrêmes des tolérances, ou sur des modèles physiques réduits, voire même une démarche hybride combinant numérique et physique, sont des moyens de confronter les tolérances définies dans le modèle de conception (Tel Que conçu / As defined / As to be built) avec les cotes, dimensions, positions réellement capturées du modèle physique (Tel Que Construit / As Built / As Maintained).

Ces études spécifiques sont actuellement développées dans l'industrie sous l'appellation « Jumeau Numérique » ou « Jumeau hybride ». Ces concepts seront développés dans le deuxième livrable dédié aux incertitudes et tolérances.

Une hétérogénéité dans les moyens technologiques

Tous les logiciels du marché ne permettent pas de modéliser et de représenter les tolérances avec le même niveau de détail ou de finesse. Cependant la grande partie des outils actuellement utilisés favorise un gain dans l'appropriation des contraintes de tolérancement au travers de fonctionnalités dédiées.

Il appartient au projet de se doter des moyens adéquats pour assurer une bonne prise en compte de ces contraintes et de leurs incertitudes.

On distingue 3 grandes notions dans la modélisation et l'analyse des tolérances (qui sont plus amplement détaillées dans le livrable de MINnD S2 : Incertitudes et Tolérances – Qualification et Recommandations) :

- modélisation statique des tolérances,
- analyse des impacts de tolérances et incertitudes par la simulation,
- analyse d'interférences ou de « clash » par non-respect des tolérances.

Une modélisation « Statique » des tolérances

On peut distinguer tolérances, annotations et incertitudes :

- de fabrication de pièce unitaire ou de composant :
 - ex. les cotes de pièces : Longueur = 100mm +/- 0.03mm ;
- d'assemblage et positionnement :
 - ex. le poteau est à 31m du mur d'enceinte +/- 1m ;
 - ex. fixation par contact...
- de spécification ou d'exigences :
 - couple de serrage à respecter ;
 - plage de température...

Toutes ces représentations nécessitent une :

- modélisation en 2D ou 3D des chaînes de cotes de pièces unitaires,
- modélisation des cotes d'assemblages et de positionnement entre pièces avec les tolérances de montage.

Tolérances de fabrication

En pratique, on a l'habitude de représenter les incertitudes et tolérances de fabrication d'une pièce par les informations suivantes, accompagnées de symboles normés :

- cotation,
- état de surface,
- jeu en 2D ou en 3D.

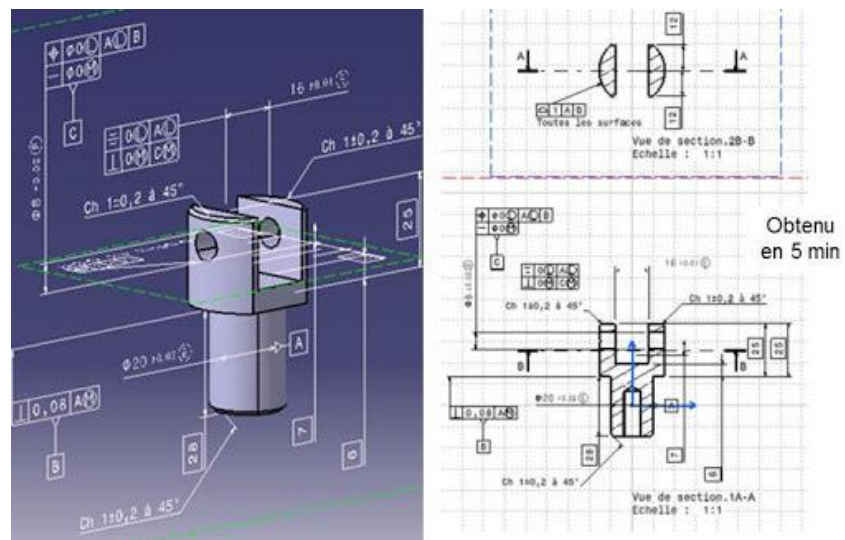


Fig.30 : Représentation des tolérances de fabrication d'une pièce

Tolérances d'assemblage et de positionnement

Pour les incertitudes et tolérances d'assemblage et positionnement

- cotation en 2D ou en 3D,
- contraintes et mécanismes.

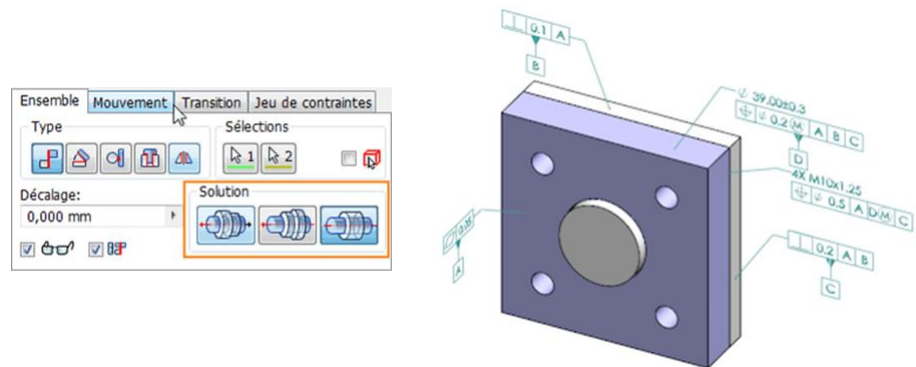


Fig.31 : Représentation des tolérances d'assemblage

Tolérances de spécification

Pour les incertitudes et tolérances de spécification :

- Information additionnelle (métadonnée) en lien avec la pièce ou l'assemblage comme cela est pratiqué dans un PMI (Product Manufacturing Information).
- Ces informations peuvent également être stockées en tant que métadonnées dans un PLM (Product Lifecycle Management).

Comme cela est possible dans un outil ou un autre, il est primordial de le fixer et de s'y tenir, afin de ne pas utiliser parfois l'un parfois l'autre au sein d'un même projet (sauf à en avoir défini les raisons et champs d'application).

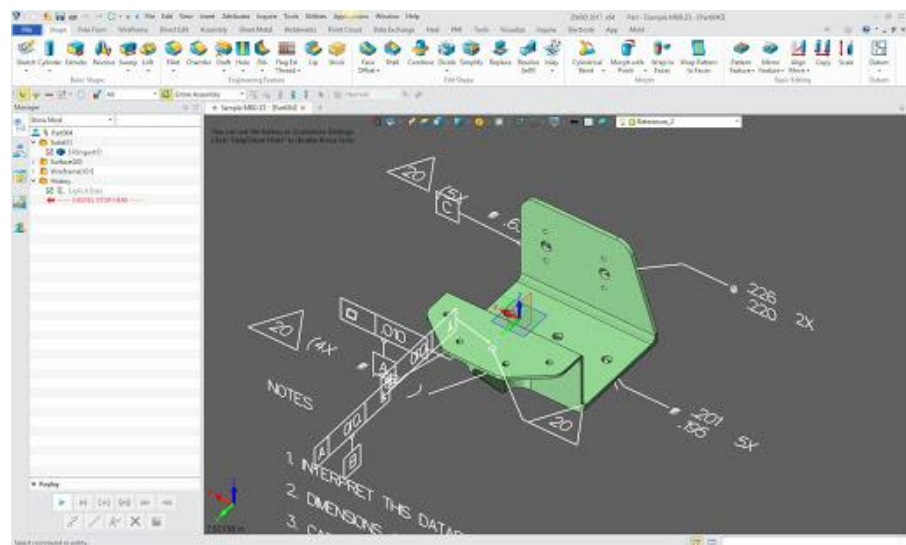


Fig.32 : Représentations des tolérances de spécification (Exemple 1)

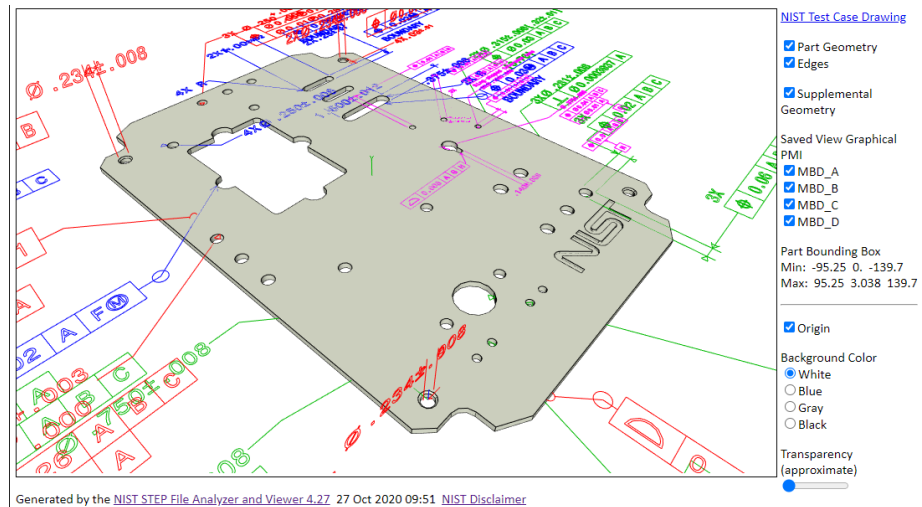


Fig.33 : Représentations des tolérances de spécification (Exemple 2)

Simulation des impacts : Tolérances et incertitudes

L'objectif de la simulation et de l'analyse prédictive des impacts des tolérances sur le produit est de simuler le jeu de fonctionnement ou le jeu de montage en utilisant les tolérances de cotes et les incertitudes de montage.

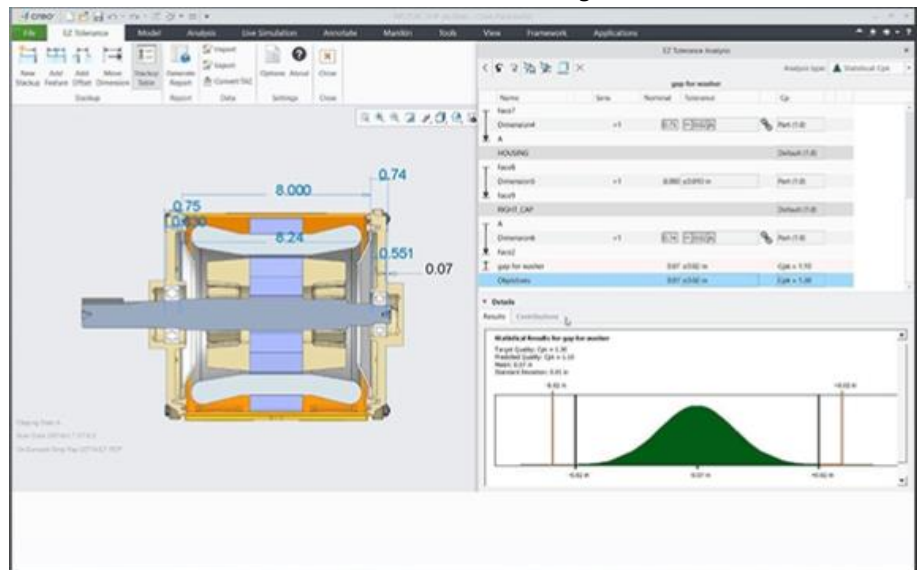


Fig.34 : Analyse prédictive des impacts de tolérances

Types d'interférences et application au BIM

On distingue 3 types d'interférences illustrées sur la Fig.35 :

- **Collision (Clash dur)** : principalement géométrique (pénétration d'un objet dans un autre objet), comme un tuyau de réseau qui passe au travers d'une poutre porteuse en béton.
- **Jeu / dégagement (Clash doux)** : l'espace nécessaire autour d'un objet pour son montage, son mouvement ou son remplacement, comme l'espace pour ouvrir une porte, l'espace libre pour remplacer un équipement dans un faux plafond.
- **Méthodes de construction ou interférences spatio-temporelles** :
 - Logistique et collision spatiale provisoire, comme des interférences d'échafaudage avec des accès.

- Interférence temporelle avec le planning, comme la livraison d'équipement en conflit avec l'avancement général des travaux.

Les deux premiers se rapportent à des interférences spatiales statiques ou dynamiques (cinématiques) et sont en lien avec la localisation et le positionnement des composants constituant le produit.

Le dernier est plus en lien avec des conflits spatio-temporelles et des interférences de planification ou de projet.

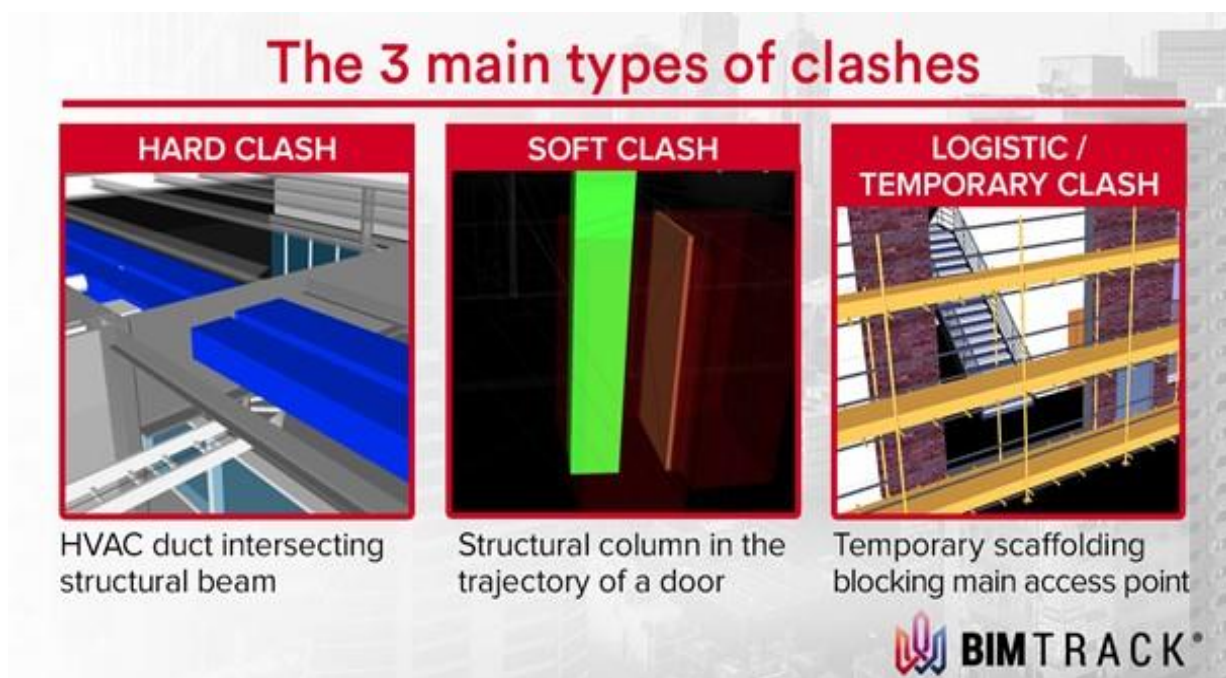


Fig.35 : Trois types d'interférences (Source BIM Track)

Outils de détection d'interférences

Les outils de détection et d'analyse **des interférences 3D** (plus communément appelé Space Analysis dans l'industrie manufacturière) peuvent sur cette base traiter :

- Collision (contact, pénétration).
- Dégagement (distance, séparation).

Un des prérequis est notamment l'existence d'une modélisation 3D du produit et de son assemblage, dans son contexte.

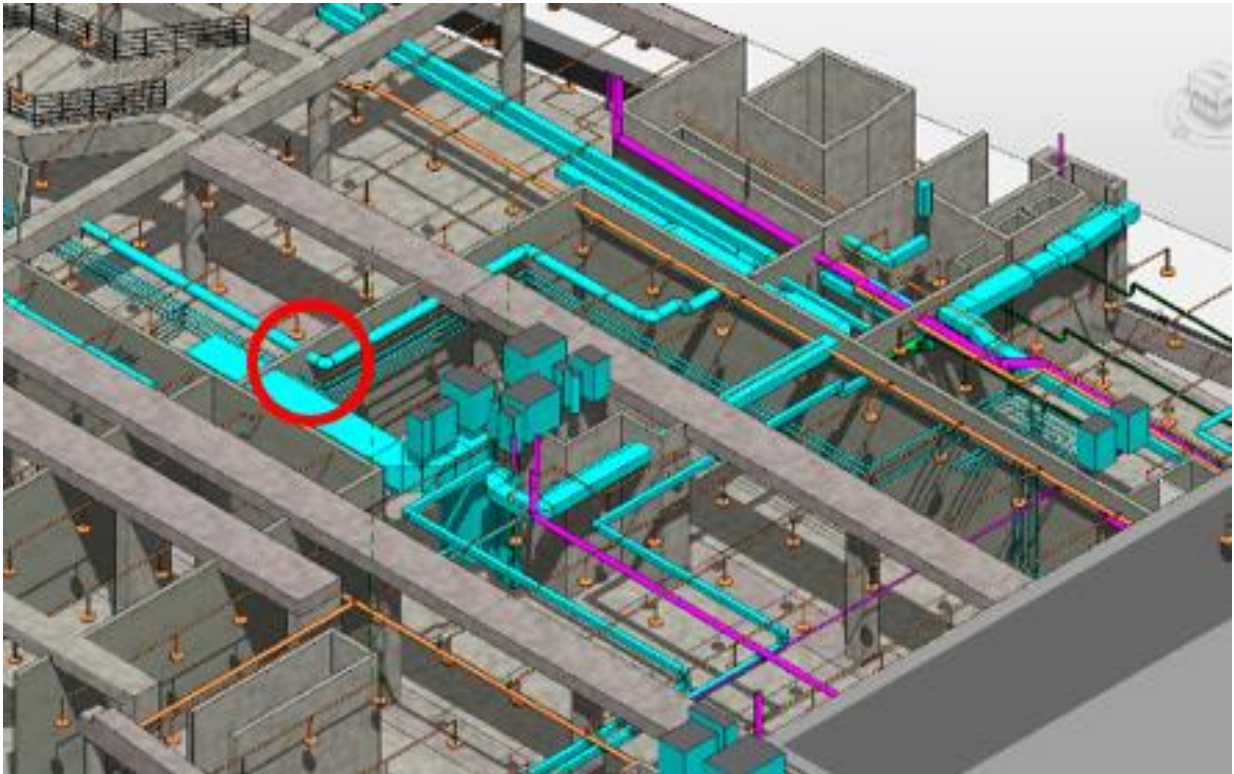


Fig.36 : Détection automatique de collision entre réseaux et éléments en béton

**Méthodes de
construction ou
interférences 4D**

Le traitement des interférences 4D s'appuie sur des données type programme, planning, et séquencements des opérations. Ce sont des outils de supervision, simulation et de planification programme qui permettront de les traiter.

La fusion des analyses 4D est traitée dans des outils spécifiques permettant de visualiser la réalisation des composants du modèle 3D étape par étape en fonction du temps.

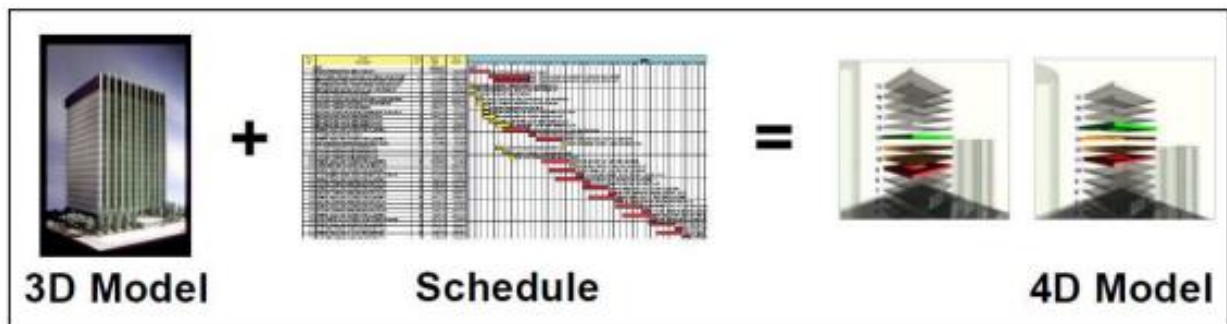


Fig.37 : Génération d'un modèle 4D

6. CONCLUSION

Conclusion

L'ambition de ce livrable « Incertitudes et Tolérances / Enjeux et Définitions » du thème « Qualification des données » du projet de recherche MINnD Saison 2, est de dresser un panorama des concepts et principes d'incertitudes et de tolérances dans le secteur de la construction, et en particulier leurs traitements et leurs représentations numériques dans le cadre d'une démarche BIM.

La définition de ces concepts s'inscrit dans un périmètre large qui concerne à la fois la technique (modélisation et simulation), le management des risques et le management contractuel du projet,

Ces concepts ont des impacts directs sur la vie d'un ouvrage ou d'une infrastructure, que ce soit pendant sa phase de conception, de construction jusqu'à son exploitation et sa maintenance. Les risques associés à ces notions sont actuellement traités par des techniciens expérimentés avec des outils et des processus spécifiques déployés selon des normes internationales et délimités par un périmètre contractuel *sui generis*.

L'apport de la modélisation et des représentations numériques des ouvrages permettent de mieux identifier, évaluer et maîtriser ces risques. Les recommandations seront exposées dans le deuxième livrable « Incertitudes et Tolérances / Qualification et Recommandations » qui proposera des méthodes de représentations adaptées aux enjeux des projets de construction.

7. ANNEXE A – GLOSSAIRE ET NOTIONS ASSOCIÉES

7.1 Exigences

Exigences

Tout projet de construction est défini par des exigences opérationnelles (statement of work) qui constituent le programme du donneur d'ordre. Elles sont traduites en exigences évaluables, afin de pouvoir vérifier qu'elles sont prises en compte pendant la phase de conception et satisfaites à la réception des travaux et à la livraison de l'ouvrage, voire pendant la phase d'exploitation.

Il existe potentiellement autant de manière de classer les exigences que de points de vue sur un sujet, mais en général quatre seulement sont utiles :

- Les exigences fonctionnelles qui décrivent ce que le système doit faire au sens large (on parle bien ici d'un système de systèmes, chaque système répondant à une fonction).
- Les exigences techniques qui précisent comment les composants organiques du sujet réalisent les fonctions.
- Les contraintes fonctionnelles ou techniques qui précisent comment les contraintes de ces catégories respectives peuvent être mises en œuvre.
- Les autres exigences qui peuvent être de toute nature : légales, juridiques, budgétaires, d'approvisionnement, etc.

Les exigences de chacune de ces catégories peuvent présenter un caractère contractuel, c'est-à-dire devoir être vérifiables du point de vue de la livraison. Les autres exigences ne sont évaluées que du point de vue de la conformité et des critères de qualité.

Parce que les exigences techniques sont plus faciles à gérer, à représenter et à vérifier, la plupart des méthodes tendent à réduire toutes les autres exigences en termes d'exigences techniques.

Remarque

les exigences ne peuvent pas toujours être toutes prises en considération, compte-tenu des différents points de vue des parties prenantes. Des compromis sont donc nécessaires, qui doivent être acceptés par l'ensemble des parties prenantes et contractualisés.

7.2 Précision d'une valeur mesurée

Valeur observée et valeur étalon

Les notions de précision et d'erreurs sont liées. En général, on parle de précision en comparaison de la valeur observée par rapport à une valeur étalon qui peut servir de référence. C'est la notion de « fermeture de la mesure ». Elle sert alors à quantifier l'écart entre la valeur observée et la valeur étalon. On entend souvent l'expression d'usage courant : « La mesure est précise à 5 millimètres près, le théodolite à 1 déci-milligrade près, etc. ».

Précision d'une mesure

La précision d'une mesure ne peut se concevoir que par comparaison dans sa détermination à un procédé plus précis ou à des procédés dont les résultats théoriques sont préalablement connus ou quantifiés de manières indépendantes.

Attention, les résultats théoriques peuvent eux-mêmes évoluer, de même que les étalons. À titre d'exemple, on citera l'étalon métrique qui a été défini par une règle en platine, puis par des longueurs d'ondes d'un rayonnement particulier et actuellement spécifié en termes de vitesse de la lumière.

Écarts de mesure

Lors de l'observation d'une valeur quantifiable, l'écart de mesure est la différence observée entre plusieurs résultats obtenus sur cette même observation. L'écart est

<p>Mesure liée à la méthode et aux matériels</p>	<p>dû, soit à une faute de mesure, soit à une erreur. Dans tous les cas l'écart de mesure doit être quantifié et comparé à une valeur maximale autorisée d'indétermination pour l'observation recherchée.</p> <p>On obtient alors un écart entre la valeur théorique (ou valeur vraie) et celle observée. Cependant, la comparaison elle-même utilise nos sens (acuité visuelle, dextérité...) et des appareils eux-mêmes assujettis à de petites erreurs (usinage...) ; l'écart constaté est donc lui-même imprécis.</p>
<p>La recherche des erreurs</p>	<p>Ainsi, la recherche de la précision évolue. Les recherches et découvertes contribuent à augmenter les précisions en diminuant la valeur des erreurs. De manière générale et particulièrement en topographie, on aura toujours le souci, lors d'opération de calculs ou d'observations de terrain d'évaluer la validité d'une mesure ou le résultat d'un calcul en fonction de la méthode mise en œuvre et des matériels impliqués.</p> <p>On cherchera donc à :</p> <ul style="list-style-type: none"> • définir la provenance et les sources des erreurs (bilan des erreurs), • les éliminer et/ou les réduire et/ou effectuer des contrôles par surabondance de mesures, • tester et surveiller les appareils : <ul style="list-style-type: none"> – en assurant la répétabilité des mesures dans diverses conditions, – en vérifiant la fidélité de ces mesures quelles que soient les conditions de mise en œuvre, – en adaptant la résolution de l'appareil (souvent peu synonyme de précision) au besoin de la mesure.
<p>Tolérance et Incertitude</p>	<p>Ces recherches effectuées, on pourra se fixer des limites à ne pas dépasser, c'est-à-dire définir l'erreur maximale autorisée (tolérance) à respecter pour qu'un résultat soit « précis » et à « combien près ». Lorsque l'on souhaitera s'accorder une plage suffisamment large de la précision, on pourra se fixer un majorant important de l'erreur : on parlera alors d'incertitude. Elle est alors caractéristique de la dispersion des résultats de mesurage définie par les erreurs limites.</p>

7.3 Méthode de détermination d'une grandeur

<p>La grandeur</p>	<p>Se questionner sur la précision de la mesure d'une grandeur nécessite avant tout de se questionner sur ce qu'est une grandeur, ce qui est mesurable, les moyens à mettre en œuvre pour le faire et le résultat attendu.</p>
<p>Définition de la grandeur</p>	<p>Une grandeur est définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance chimique, physique ou biologique, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement (tirée de la Norme française NF X 07-001 de décembre 1994 "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie").</p>
<p>Valeur et Unité</p>	<p>La grandeur est caractérisée par une valeur numérique et une unité, qui sont indissociables (valeur quantifiable). Ainsi, attribuer une valeur numérique à une grandeur sans en préciser l'unité n'a aucun sens.</p>
<p>Grandeur mesurable et grandeur repérable</p>	<p>On peut classer les grandeurs en deux catégories : les grandeurs mesurables et les grandeurs repérables :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grandeur mesurable : une grandeur est dite mesurable si on peut lui affecter une valeur numérique à partir d'observations. En outre, la somme et/ou le

produit de grandeurs mesurables a une signification. Parmi les grandeurs mesurables, on peut citer la longueur, la température absolue, la résistance, etc.

- Grandeur repérable : une grandeur est dite repérable si la somme et le produit de cette grandeur n'ont pas de sens. Parmi les grandeurs repérables, on peut citer la température centésimale (°C), la date, etc.

Dimension

A ces deux catégories de grandeur, on associe une qualité supplémentaire, la dimension qui caractérise la nature de la grandeur et définit les unités utilisables.

Qualification de la mesure

Nous avons aussi à distinguer la partie qualifiable de la mesure. En effet, en plus de la partie quantifiable, une grandeur peut être qualifiée en rapport à sa potentialité d'usage ce qui permet de la caractériser sans pour autant être capable de lui attribuer une valeur de référence.

Échelle de qualification

Une mesure pourra donc être qualifiée de :

- **fiable**, si toutes les formes de détermination sont très proches les unes des autres,
- **juste**, si le résultat est exempt de toutes erreurs et fautes,
- **précise**, si le résultat est très proche de la valeur conventionnellement vraie,
- **sensible**, si le résultat diverge pour une très faible variation des conditions de mesure,
- **détectable**, s'il est possible de trouver un résultat malgré la faible valeur de la mesure,
- **rapide**, si l'obtention du résultat se fait à grande vitesse.

Mesure d'une grandeur

Pour déterminer une grandeur, il faut être capable de la mesurer et de la comparer à une valeur de référence préalablement déterminée dans un système de référence (étalon).

On distingue alors deux moyens d'obtenir la valeur quantitative de la grandeur :

- la mesure directe qui consiste à comparer la grandeur recherchée par rapport à une échelle ou un étalon de références comme par exemple un mètre ruban pour déterminer une distance,
- la mesure indirecte qui consiste à déterminer la valeur de la grandeur par transformation mathématique ou physique d'autres grandeurs comme par exemple déterminer une distance grâce à la vitesse de la lumière et au temps de parcours dans un distancemètre laser³⁵.



Odomètre



Distancemètre laser

³⁵ Distancemètre, de son vrai nom IMEL (Instrument de Mesure Électronique de Longueur) est un instrument électronique qui permet la détermination de la distance au moyen de différents systèmes de mesures indirectes.

Validité de la mesure**Précision des instruments de mesure**

Quel que soit le mode d'obtention de cette grandeur, il faut alors se questionner sur la validité de sa mesure et donc la capacité d'usage et d'interprétation que nous en retirons.

Chaque instrument de mesure est caractérisé pour son usage par une précision définie dans une condition d'utilisation spécifique et selon une règle de mise en œuvre. On parle de résolution de l'instrument de mesure ou d'écart type de mesure. Il s'agit de la valeur minimale en dessous de laquelle l'instrument n'a plus la capacité de mesurer (mm pour un distancemètre, dmgon pour une station totale, etc.). Ces informations sont des caractéristiques à prendre en compte dans la qualification, la quantification et la méthodologie à déployer pour déterminer cette grandeur.

Spécifications de Leica RTC360

Double scan	Suppression automatique des objets en mouvement
NUMÉRISATION	
Mesure de distance	Temps de vol haute vitesse ultra-dynamique amélioré par la technologie WaveForm Digitising (WFD)
Classe laser	1 (selon la norme CEI 60825-1:2014), 1550 nm (invisible)
Champ de vision	360° (horizontal) / 300° (vertical)
Portée	De 0,5m jusqu'à 130 m
Vitesse	Jusqu'à 2 000 000 pts / sec
Résolution	3 paramètres sélectionnables par l'utilisateur (3/6/12 mm à 10 m)
Précision*	Précision angulaire 18" Précision de portée 1,0 mm + 10 ppm Précision 3D d'un point: 1,9 mm à 10 m 2,9 mm à 20 m 5,3 mm à 40 m
Interférences dues à la distance**	0,4 mm à 10 m, 0,5 mm à 20 m
IMAGERIE	
Appareil photo	36 MPx (3 caméras) 432 MPx données brutes pour image

Fig.38 : Extrait du tableau des spécifications du distancemètre LEICA RTC 360 ³⁶

7.4 Fautes - Erreurs systématiques - Erreurs accidentelles

Fautes**Mise en évidence des fautes**

La faute est en général un écart grossier (« une bêtise ») par rapport à la précision usuelle d'un procédé ou d'un appareil. Elle est le plus souvent liée à l'individu et au mauvais usage d'un appareil : erreur de lecture de 10 cm sur une chaîne graduée au cm, erreur de 1 cg sur un angle avec un théodolite donnant le mgon ou dmgon. La faute peut arriver par dyslexie, étourderie, maladresse et peut être lourde de conséquences.

La faute est le signe que des contrôles n'ont pas été effectués, car on peut éviter la faute en apportant la concentration nécessaire à la mesure ou en imaginant des processus opératoires permettant de la mettre en évidence et donc la corriger.

Par exemple :

Lors d'une opération de	La faute concerne
chaînage	Le décalage de l'origine

³⁶ <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>

Élimination des fautes	mesure d'angle	La faute de lecture
	nivellement	Le dérèglement de l'axe de visé
	tachéométrie	La confusion dans les stations

L'élimination des fautes doit être un souci permanent car la faute n'est pas démontable ni répétable. Sa grandeur est généralement très supérieure à celle de l'erreur. Elle peut cependant être inférieure, noyée dans l'erreur et donc indécélable et aléatoire.

Erreurs systématiques (ou Biais)	<p>Après avoir éliminé – autant que possible - les fautes, la recherche de la précision impose alors de définir la « valeur » des instruments d'observation, sachant que peuvent subsister des écarts entre la valeur réelle et celle observée donc donnée par l'instrument. On recherche la nature et la grandeur de cette erreur. Pour cela, on procède aux étalonnages des appareils (voire même celui des opérateurs !) ou à la recherche de méthodes et de modèles permettant de pallier l'influence de ces écarts.</p> <p>Exemple d'erreurs systématique :</p> <ul style="list-style-type: none"> dérèglement de l'appareil de mesure, intégration d'une constante fautive dans la mesure.
Correction des erreurs	<p>Ces écarts constatés sont constants et appelés « erreurs systématiques ou sigma ». On peut corriger ces erreurs soit en :</p> <ul style="list-style-type: none"> les mesurant, les éliminant par des processus opératoires, imaginant leur provenance et leur cause. <p>On a alors pour une valeur de référence X vraie : la combinaison de la valeur observée x, modulée de l'erreur systématique e, soit $X_{\text{vraie}} = x_{\text{observée}} + e$.</p> <p>Où e est bien une valeur constante qui s'ajoute avec son sens (plus ou moins). L'étalonnage permet identifier cette constante et donc de déterminer par déduction la valeur X vraie depuis celle observée.</p>
Erreur systématique	<p>L'erreur systématique est dangereuse car en général son signe est constant et elle se cumule. Elle n'est pas éliminée par la répétition de la mesure. On maîtrise assez bien ce systématisme en topographie par des procédés d'étalonnage des instruments de mesures.</p>
Exemple de Composition des erreurs systématiques	<p>Soit A une fonction variable de la position d'un point issue de diverses observations sur les 3 axes X, Y, Z entachées d'erreurs : dx, dy, dz linéairement indépendantes.</p> <p>L'erreur résultante sur cette fonction sera donc la variation de la valeur de positionnement par rapport à la variation de chacune des variables sur les 3 axes.</p> <p>Lorsqu'il est possible de l'identifier, l'erreur systématique se compose algébriquement et l'erreur résultante est alors dA.</p>

Erreurs accidentelles (ou Bruits de mesure)	<p>La répétition d'une mesure ne permet pas d'éliminer les erreurs systématiques. Cependant la répétition d'un grand nombre de mesures permet d'accroître la précision de celle-ci. On constate que pour des causes dues à nos sens, aux conditions de mesures, aux instruments, les valeurs données sont sensiblement différentes : c'est un constat identique avec de nombreuses techniques d'observations.</p>
Exemple du ruban gradué	<p>Mesurons par exemple une longueur au moyen d'un ruban gradué en cm. Le ruban est étalonné, les valeurs obtenues seront différentes. Ces différences sont faibles et leur signe aléatoire ; elles sont dues à des causes accidentelles non décelables.</p>

Combinaison d'erreurs systématiques	Les erreurs (écarts) constatées sont alors dits accidentelles. Les erreurs accidentelles sont interprétées comme combinaison d'erreurs systématiques, très petites, de valeurs identiques, de signes indifférents, mais d'égales probabilités
Surabondance de mesures	On considère que chaque mesure a une précision identique puisque effectuée avec les mêmes instruments, dans des conditions identiques et par des opérateurs aussi compétents. L'erreur accidentelle d'un procédé de mesure ne peut être déterminée que par observation de nombreuses mesures, on parle de surabondance de mesures.
Caractérisation	Les erreurs accidentelles sur des mesures de même précision peuvent se caractériser par : <ul style="list-style-type: none"> leur caractère aléatoire, leur précision identique, leur indépendance. <p><i>A priori</i>, on peut indiquer que sur un grand nombre de mesures :</p> <ul style="list-style-type: none"> les erreurs sont positives ou négatives en quantités égales (symétrie), les écarts les plus importants sont les plus rares, les écarts les plus petits sont les plus nombreux.
Notion de probabilité	On peut intuitivement associer la notion de probabilité à une erreur accidentelle : <ul style="list-style-type: none"> l'erreur infinie à une probabilité nulle, l'erreur nulle, ou petite à la plus grande probabilité, il existe donc une probabilité donnée pour qu'une erreur soit comprise entre zéro et une valeur déterminée.
Identification des sources d'incertitude	Si pour chaque détermination d'une grandeur il est possible d'évaluer les sources d'incertitude et de les traiter, il est donc possible de définir correctement cette grandeur.

7.5 Détermination d'une valeur conventionnellement vraie

Effectuer une mesure	C'est avant tout chercher à déterminer la valeur la plus probable qui sera affecté à cette mesure.
Mesurer	C'est déterminer une série de valeurs de la quantité recherchée qu'il faut alors traiter pour, à terme, obtenir la valeur la plus probable de cette quantité (valeur conventionnelle vraie).
Échantillonner	Nous avons donc affaire à une série représentative de la valeur (échantillon) qu'il faut valider, vérifier et traiter pour passer d'une valeur statistique (par exemple série de mesures de distance entre 2 points) à une valeur unique (la distance horizontale entre ces 2 points).
Précision et Exactitude	L'exactitude est la proximité des mesures à une valeur spécifique. La précision est la proximité des mesures les unes par rapport aux autres.
Exemple de tirs sur une cible	Être précis ne signifie pas pour autant être exact. On peut résumer ces notions de valeurs précises et valeurs exactes (ou vraies) sur le schéma des cibles de la figure Fig.39, qui illustre clairement la différence qu'il y a entre précision et exactitude.

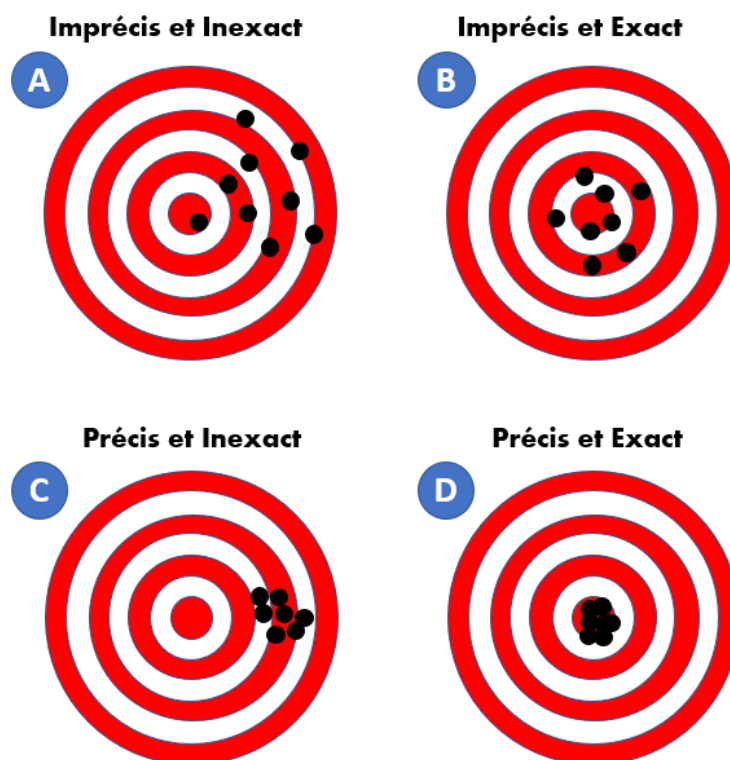


Fig.39 : Représentation de la précision et de l'exactitude

Analyse des cibles

Chaque tir a potentiellement la même précision car réalisé par le même tireur mais avec des viseurs différents. On observe que les impacts sont dispersés et forment un nuage de points. L'impact le plus éloigné est une faute, reste à définir les erreurs.

Nous pouvons analyser ces tirs de la façon suivante :

- Les tirs A et B ont besoin d'être étalonnés et calibrés même si le centre a été touché.
- Le tir C est étalonné mais non calibré.
- Le tir D est à la fois étalonné et calibré : nous avons fait « mouche ».

Analogie avec l'évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points

Appliquons ce concept à la qualité d'un nuage de points issu de relevé topographique.

- La précision décrit la dispersion de mesures autour de la valeur la plus probable de l'échantillon. Le critère statistique correspondant est l'écart-type σ .
- L'exactitude d'une série de mesures par rapport à une valeur vraie est qualifiée par l'erreur moyenne quadratique (emq).

Ces notions appliquées aux traitements de nuages de points de la numérisation d'un bâtiment, conduisent aux représentations de la figure Fig.40 suivante (Schéma issu de l'article de Tania Landes dans la revue XYZ N°171 du 2^e trimestre 2022). Les résultats donnent une idée de la précision et de l'exactitude en fonction des matériels et des outils de traitement utilisés.

La précision du nuage de points est liée à la dispersion des points autour du plan moyen « le plus probable » ajusté au nuage. L'exactitude du nuage définit sa fidélité par rapport à la réalité.

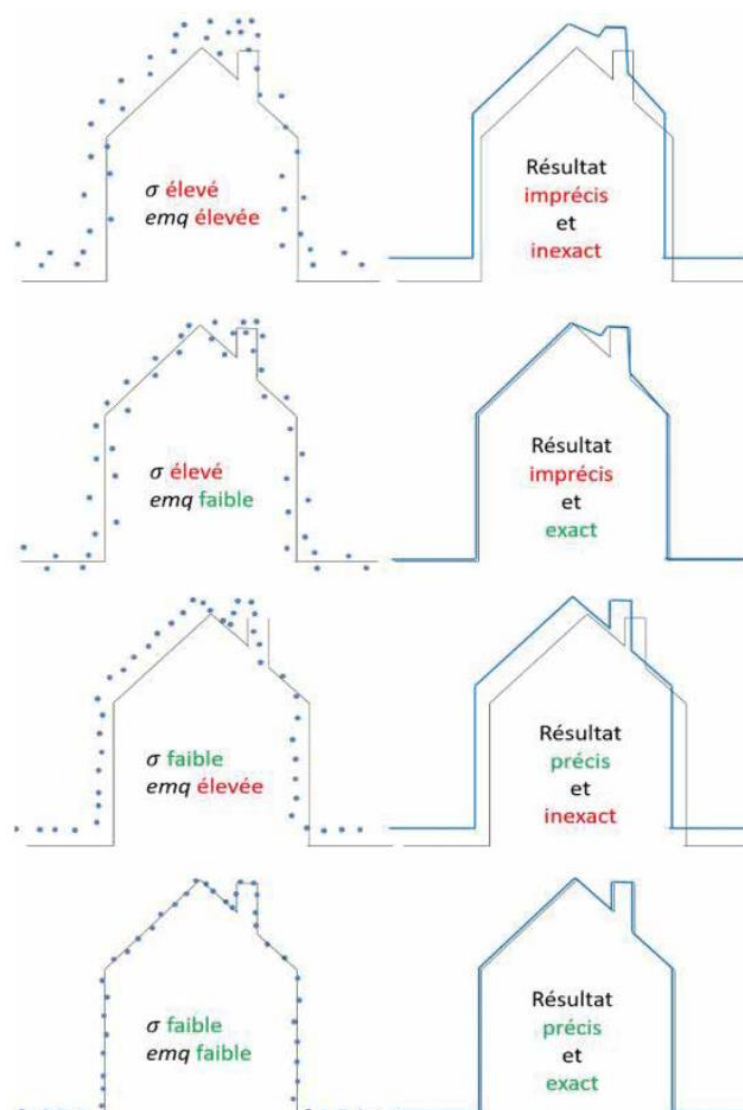


Fig.40 : Analogie appliquée à la qualité de modèles 3D issus de nuages de points (Tania Landes – XYX N°171)

Droite de régression et exactitude

Supposons disposer des n valeurs observées d'une variable 1 en fonction d'une variable 2.

Si l'on reporte cet ensemble sur une droite, on constate une répartition variable de ces valeurs, mais symétrique autour d'une valeur : cette valeur, située au « centre », sera adoptée comme la plus probable, c'est à dire celle qui aura la plus grande probabilité, celle autour de laquelle sont groupées en grand nombre de valeurs. On parle alors de « droite de régression » (Fig.41). Les valeurs vraies seront donc celles interpolées sur cette droite.

Ce systématisme décelé, les impacts se regrouperont autour de la valeur vraie : on parlera d'exactitude.

Variable 2

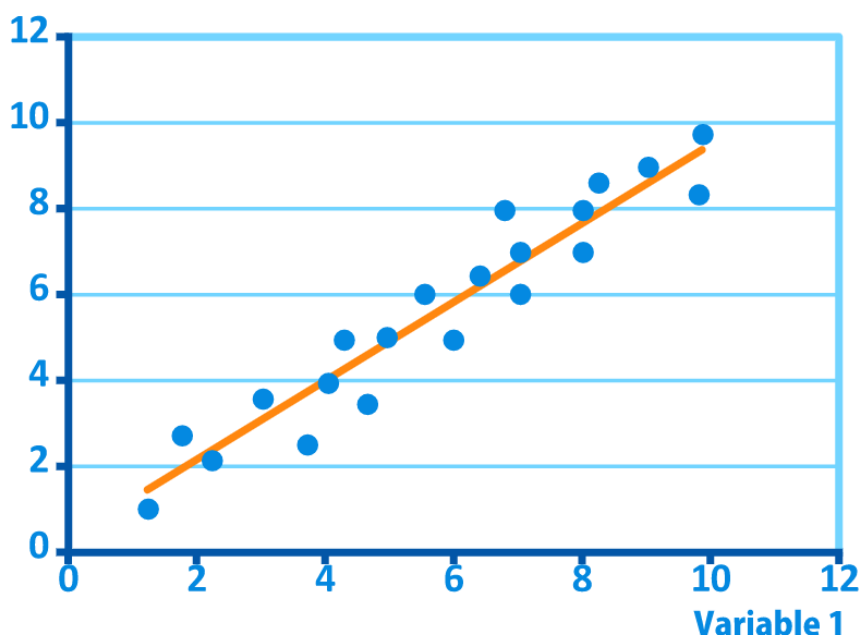


Fig.41 : Schéma type d'une droite de régression

Valeur vraie

Donc, il faut bien considérer que, même si les erreurs de mesures sont inévitables lors de l'acquisition de données, il est possible de les minimiser, voire de les faire disparaître en choisissant un instrument plus précis (« *precise* » en anglais) et/ou plus exact (« *accurate* » en anglais). Pour définir la « valeur vraie » d'une grandeur, il faut donc **utiliser le bon instrument avec la bonne méthode** !

Validité d'une mesure

Comme nous venons de la voir, toute prise de mesure est entachée d'une incertitude. Pour autant, il est possible de certifier une mesure en utilisant à la fois des méthodes de détermination qui feront disparaître les erreurs et fautes, mais aussi en s'assurant de l'usage approprié de l'instrument de mesure répondant aux besoins réels.

Fautes et erreurs

Il est possible de redéfinir les fautes et erreurs de façon plus pratique :

- **Faute** : manquement aux normes, méthodes, consignes de réalisation qui provoquent un écart de résultat. En général, l'attention de l'opérateur en est la cause et donc son expérience et son attention permet de les annuler.
- **Erreur systématique** : valeur qui se répète et se cumule à chaque mesure. Elle est souvent due à l'imprécision interne de l'appareil et peut se définir ou s'annuler par une calibration de ce dernier.
- **Erreur accidentelle** : valeur aléatoire en quantité et en signe qui a diverses sources, mais qui est quantifiable.

Notion de fermeture

La prise de mesure sera donc systématiquement soumise à l'influence de ces 3 variables, mais l'attention et l'usage de méthodes précises peuvent généralement annuler les 2 premières. Nous pouvons donc considérer que l'écart entre la valeur théorique vraie et la valeur mesurée (fermeture) n'est donc provoquée que par l'erreur accidentelle.

Fermeture et tolérance des mesures	On ne peut valider une mesure que si elle est potentiellement vérifiable par rapport à une valeur préalablement connue de cette grandeur (valeur étalon). La fermeture est l'écart entre la valeur observée de la grandeur et sa valeur théorique. Par exemple en comparant la somme de distances partielles avec la distance totale, prises dans les mêmes conditions.
Tolérance et cumul d'incertitudes	Pour être valide, cet écart de mesure ne doit pas dépasser une valeur maximale de référence appelée tolérance. Cette tolérance représente le cumul d'incertitudes maximum acceptable sur la détermination de la valeur en tenant compte des méthodes de détermination et de l'instrument utilisé. C'est la limite de l'écart à partir de laquelle il y a présomption de faute.
Calcul de la tolérance	<p>En pratique, la tolérance se détermine soit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • par un calcul faisant intervenir à la fois les probabilités d'erreurs issues des instruments de mesure mais aussi des méthodes utilisées et de la répétabilité des opérations qui ont permis de la déterminer, • soit par rapport à une valeur extérieure donnée à l'opérateur (CCTP, réglementation). <p>Dans tous les cas, cette tolérance doit clairement être connue et applicable.</p>
Compensation des mesures	Chaque mesure présentant une fermeture, il est nécessaire de proposer une répartition de cette valeur d'écart pour en affiner sa détermination, c'est la compensation.
Répartition de la compensation	<p>Il existe plusieurs méthodes de compensation mais globalement elles partent globalement de l'hypothèse que les sources d'erreurs sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • soit équiprobables, • soit avec une répartition pondérable. <p>Nous pouvons donc proposer des répartitions de la compensation du plus simple (répartition proportionnelle) au plus complexe (méthodes des moindres carrés). Il est à noter que la compensation totale doit toujours être égale et opposée en signe à la fermeture pour ne pas introduire de fautes.</p>
Conclusion	En tenant compte de toutes ces incertitudes et en appliquant des méthodes rigoureuses de mesures, il est raisonnable de considérer que nous serons certains de « connaître avec une grande précision la valeur de la grandeur recherchée ».

7.6 Auscultation et monitoring

Définition du terme Auscultation	« Ensemble de mesures destinées à surveiller le comportement d'un ouvrage » (dictionnaire en ligne des termes du BTP proposé par les Éditions Eyrolles ³⁷). Dans le domaine du génie civil, il fait référence à une intervention ponctuelle et spécifique complémentaire à l'instrumentation qui, elle, reste en permanence sur l'ouvrage.
Lien Auscultation / Monitoring	Ce terme est souvent associé à celui de Monitoring (ou en français : Monitoring) qui est défini par le Centre National des Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL ³⁸) comme l'ensemble des techniques permettant d'analyser, de contrôler, de surveiller soit, en électronique, la qualité d'un enregistrement, soit, en médecine, les réactions

37 <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/>

38 <https://www.cnrtl.fr/>

Notion d'instrumentation

physiopathologiques d'un patient. Par extension, dans le domaine de la construction, nous appliquons ce concept à des moyens de contrôle (indicateurs) des bâtiments, des ouvrages d'art et/ou au contexte proche des lieux où ils sont construits.

Dans le milieu de la construction, il faut bien distinguer la géométrie et les méta-données :

- Le contrôle du dimensionnement (déformations, déplacements relatifs...).
- Le contrôle des autres caractéristiques (composition chimique...).

L'auscultation est ponctuelle dans le temps et peut être uniquement visuelle, réalisée par un inspecteur qui applique l'ITSEO³⁹.

L'Instrumentation est une chaîne de capteurs mise en place sur un ouvrage. Elle permet le monitoring sous forme de SHM (Structural Health Monitoring). La surveillance de la santé structurelle implique l'observation et l'analyse d'un système au fil du temps à l'aide de mesures de réponse échantillonnées périodiquement, pour surveiller les changements apportés aux propriétés matérielles et géométriques des structures techniques telles que les ouvrages d'art et les bâtiments.

Usages de l'auscultation

De ces définitions, plusieurs usages de l'auscultation ou de l'instrumentation dans la construction peuvent être envisagés et cela, à toutes les phases du projet :

- Avant tout démarrage de chantier, un réseau de points topographiques est positionné sur l'emprise du futur chantier et à sa proximité, pour mesurer la position avant toute intervention des éléments significatifs qui pourraient subir une modification durant le chantier. Le but recherché est de déterminer l'impact du chantier sur son milieu avoisinant. Ces informations correspondent au temps T0 qui servira de base de référence pour fixer l'état initial.
- Au démarrage de chantier, les marqueurs des points initiaux seront mesurés régulièrement pour évaluer leurs mouvements et seront comparés de façon différentielle par rapport aux données initiales T0.
- À l'avancement du chantier, les points de démarrage seront complétés par de nouveaux marqueurs pour densifier la connaissance et le suivi des mouvements induits par la construction.
- À la réception des travaux, un état des lieux final de tous les marqueurs sera réalisé pour évaluer les incidences de la construction de l'ouvrage sur lui-même et sur son milieu avoisinant.
- Durant la phase d'exploitation de l'ouvrage, les marqueurs serviront à évaluer sa stabilité dans le temps.

Compléments à l'auscultation / instrumentation : le monitoring

Le monitoring est mis en œuvre pour suivre l'« état de santé » de l'ouvrage et de son contexte direct, afin d'en garantir la sécurité par les exploitants pour les usagers. Ces techniques de mesures continues sont complétées par l'ajout de capteurs (IoT⁴⁰ connectés par exemple) pour analyser les données enregistrées au fil du temps par des procédés de traitements (science des données) en vue d'évaluer et d'interpréter les comportements et les mouvements potentiels.

La localisation du capteur au sein d'un matériau est parfois une source d'incertitude, qui peut avoir un impact sur la précision du résultat de la mesure.

³⁹ ITSEO : Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art

⁴⁰ IoT : Internet of Things (Interconnexion entre Internet et des objets, permettant une communication entre les biens physiques et leur existence numérique)

7.7 Cotation fonctionnelle et chaîne de cotes

<p>Cotation fonctionnelle</p>	<p>Les assemblages de mécanismes sont constitués de composants assemblés en contact les uns avec les autres. Tous les composants possèdent une plage de tolérance sur leurs dimensions, liée à leurs contraintes de fabrication industrielle.</p> <p>Lorsque l'on empile des composants pour les assembler, leurs tolérances géométriques s'ajoutent. Il est nécessaire de vérifier que les jeux fonctionnels du mécanisme restent conformes dans le cas des conditions extrêmes d'utilisations (mini et maxi des intervalles de tolérances).</p> <p>Les chaînes de cotes interviennent dans la cotation fonctionnelle d'un assemblage mécanique. Elles permettent de vérifier les jeux de montages, la compression d'un élément dans les conditions extrêmes des spécifications géométriques de chaque composant d'un assemblage.</p> <p>La chaîne de cotes s'appuie donc sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Géométrie de l'assemblage et des zones de contact entre les composants. • Dimensionnel et le tolérancement géométrique de chaque composant. • Jeux fonctionnels et les conditions d'usage d'un composant.
<p>Définitions</p> <p>Jeu mécanique</p> <p>Déformation</p> <p>Jeu fonctionnel</p> <p>Cote fonctionnelle</p>	<p>En mécanique, le jeu est l'espace laissé entre deux pièces assemblées imparfaitement. Comme il est impossible de réaliser des pièces avec une géométrie parfaite, le jeu est une nécessité dans l'assemblage des éléments d'un mécanisme.</p> <p>La déformation (déplacement relatif) des matériaux est caractérisée la manière dont réagit un matériau donné quand il est soumis à des sollicitations mécaniques. Cette notion est primordiale dans la conception (aptitude de la pièce à réaliser sa fonction), la fabrication (mise en forme de la pièce), et le dimensionnement mécanique (calcul de la marge de sécurité d'un dispositif pour éviter une rupture).</p> <p>La capacité d'une pièce à se déformer et à résister aux efforts dépend de trois paramètres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forme de la pièce. • Nature du matériau. • Processus de fabrication : traitement thermique, traitement de surface, etc. <p>Le jeu fonctionnel est une dimension à l'intérieur de l'assemblage qui permettra à l'assemblage de fonctionner et de se monter correctement.</p> <p>Exemple : Jeu nécessaire à une liberté de mouvement entre 2 pièces, compression (jeu négatif) d'un joint.</p> <p>Élément d'un plan d'un composant d'un assemblage, une cote fonctionnelle est la cote tolérancée d'une pièce entre 2 surfaces d'appui ou une surface d'appui et une surface terminale (Voir Fig.42).</p>

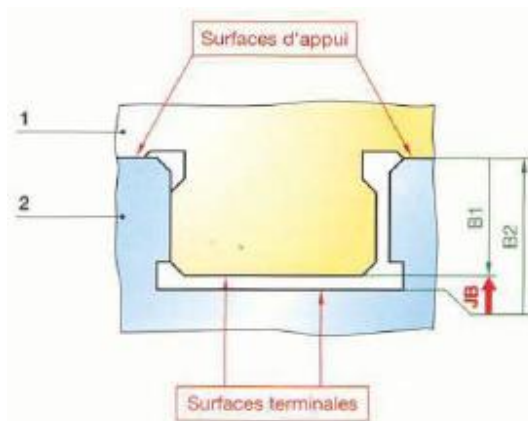


Fig.42 : Chaîne minimale de cotes JB / Surface d'appui et surface terminale
(Source « Guide du dessinateur industriel » – André Chevalier)

Surface terminale Surface appartenant à un composant d'un assemblage qui constitue l'une des 2 extrémités d'une cote condition.

Surface d'appui Surface appartenant à un composant sur laquelle va s'appuyer un autre composant dans un assemblage.

Chaîne de cotes Chaîne vectorielle qui va relier toutes les cotes fonctionnelles afin de vérifier la ou les cotes conditions.

Conditions d'utilisation Les conditions d'utilisation ont pour rôle de définir ce qui est autorisé de faire avec un objet ou un équipement :

- Conditions météorologiques : vitesse vent, température, hygrométrie...
- Limites d'utilisation : charges autorisées, vitesse de déplacement maximale...

Au-delà de ces conditions, les jeux nécessaires pourraient ne pas être respectés, des déformations pourraient intervenir, des dysfonctionnements pourraient se produire...

7.8 Vocabulaire complémentaire

Terme	Définition
Fidélité	Différence entre les valeurs mesurées d'un même objet (dispersion)
Justesse	Différence entre moyenne des mesures et la valeur de référence (erreur systématique)
Exactitude	Différence entre une valeur mesurée et la valeur de référence (erreur d'exactitude)
Résidu	Moyenne – mesure
Variance	Somme des carrés des erreurs / Nombre de données
Variance échantillon	Somme des carrés des erreurs / Nombre de données - 1
Écart Quadratique Moyen	Racine (Variance)
Écart Type	Racine (Variance échantillon)
Poids	1 / variance

Terme	Définition
Degré de liberté	Nombre de mesures – Nombre d'inconnues
Voxel	Le voxel est à la 3D ce que le pixel est à la 2D (Fig.43). Il stocke une information physique (couleur, densité, intensité, etc.) d'un point d'un volume sur un maillage régulier. Ses coordonnées spatiales, voire temporelles, ainsi que sa taille ou d'autres informations telles qu'une matière sont stockés parfois avec sa valeur, parfois en parallèle. Le voxel s'inscrit plus généralement dans des espaces matriciels bien que les espaces vectoriels lui soient également favorables.

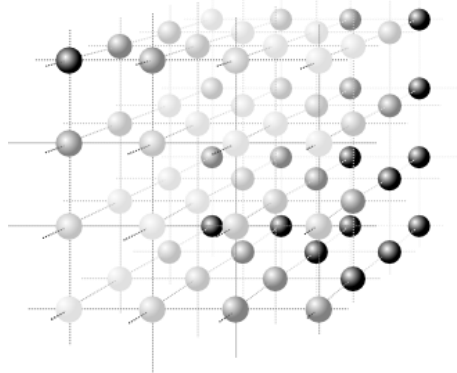


Fig.43 : Schématisation d'une matrice de voxels en nuances de gris

Boîte à moustache	<p>Dans les représentations graphiques de données statistiques, la boîte à moustaches (box-and-whiskers plot, aussi appelée diagramme en boîte) est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative.</p> <p>La boîte à moustaches (Fig.44) résume quelques indicateurs de position du caractère étudié (médiane, quartiles, minimum, maximum ou déciles). Ce diagramme est utilisé principalement pour comparer un même caractère dans deux populations de tailles différentes.</p>
-------------------	---

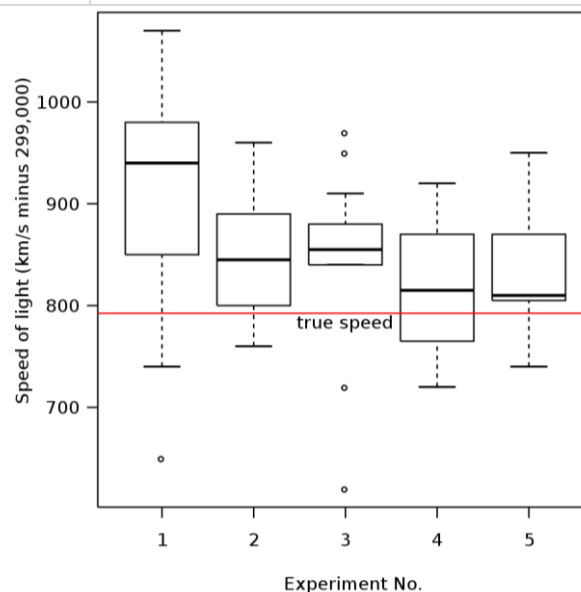


Fig.44 : Représentation graphique d'une boîte à moustaches

8. ANNEXE B – LISTE DES NORMES PRINCIPALES TRAITANT DU SUJET DES TOLÉRANCES

Normes ISO	<p>Certaines normes sur les tolérances existent depuis 1920, et on dénombre à ce jour plus de 150 normes à l'ISO qui adressent la notion de tolérance.</p> <p>Cette multiplicité montre que le sujet est complexe. Il dépend du métier considéré. De plus, il faut tenir compte de l'évolution :</p> <ul style="list-style-type: none"> • des méthodes mathématiques ; • des matériaux ; • des besoins. <p>Les normes adressent généralement la géométrie et les processus.</p> <p>Ci-après, on trouvera la liste des principales normes ISO applicables au tolérancement géométrique dans l'industrie manufacturière.</p>
ISO 1101:2012	Norme chapeau pour la spécification géométrique des produits (geometric product specification – GPS) principale. Elle définit les informations et spécifie les exigences de base qui permettent de spécifier le tolérancement géométrique des pièces. La mise à jour 2017 est récente et n'a pas encore été largement adoptée par tous les métiers
ISO 1101:2017	
ISO 16792:2015	Spécifie les pratiques de définition de produits numériques et les règles de présentation des annotations sur le modèle de conception
ISO 8015:2011	Définit le principe d'indépendance.
ISO 2768:1989	Définit les tolérances géométriques générales, les tolérances linéaires et angulaires générales, l'exigence d'enveloppe et les conventions de notation suivantes : · Indication de la classe de tolérance (H, K ou L), · Indication de la classe de tolérance linéaire et angulaire (f, m, c ou v), · Indication de l'exigence d'enveloppe E).
ISO 286:2010	<p>Établit un système de codification à utiliser pour les tailles des entités dimensionnelles des types suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cylindre. • Deux surfaces parallèles opposées. <p>Définit les concepts fondamentaux et la terminologie relative à ce système de codification. Elle fournit une sélection normalisée des classes de tolérances pour usage général parmi les nombreuses possibilités que la norme générale prévoit. Elle définit la terminologie de base pour les ajustements entre deux entités dimensionnelles sans contrainte d'orientation et de position et explique les principes «d'alésage normal» et «d'arbre normal».</p>
ISO 10579:2010	Spécifie les règles de cotation et de tolérancement des pièces non rigides qui nécessitent la mise sous contrainte de certains éléments lors du contrôle des dimensions et des tolérances spécifiées sur le dessin.
Autres normes ISO	<p>Les autres normes ISO applicables au tolérancement géométrique sont des documents courts dont chacun s'applique à un sujet donné. Ainsi, il existe des normes ISO distinctes pour les profils, une autre pour le tolérancement de position, une autre à propos des références, etc.</p> <p>Une entreprise qui entend les appliquer doit prêter attention aux mises à jour dont elles font l'objet. Malheureusement, il est assez difficile de synchroniser la mise à jour d'un sous-ensemble de ces normes. Lorsqu'une norme est modifiée, elle peut définir, utiliser ou remplacer des termes qui étaient utilisés dans une autre norme ISO. Pour compliquer davantage la situation, les nouvelles versions des normes référencent parfois d'autres normes qui ont été retirées.</p>

Normes ASME**ASME Y14.5-2009**

Principales normes ASME⁴¹ applicables au tolérancement géométrique dans l'industrie manufacturière.

Établit des pratiques uniformes pour indiquer et interpréter la cotation, le tolérancement et les exigences associées à utiliser sur les dessins d'ingénierie et les documents associés.

ASME Y14.41-2012

Décrit les exigences et documents de référence applicables à la préparation et à la révision des données de définition des produits numériques (appelées jeux de données) et définit des exceptions et des exigences complémentaires aux normes ASME existantes pour l'utilisation des jeux de données numériques de définition des produits ou des dessins au format numérique.

ASME Y14.8-2009

Couvre les définitions des termes et fonctions propres aux technologies de fonderie et de forgeage avec des recommandations pour leur description uniforme et leur inclusion sur les dessins d'ingénierie et les documents associés.

⁴¹ ASME : American Society of Mechanical Engineers

9. ANNEXE C – LISTE DES OBJECTIFS MÉTIERS ET USAGES DU BIM (MINnD S1 – LIV25)

Objectifs Métiers et Usages du BIM

Le **livrable 25 de MINnD S1** intitulé « **Guide d'application du BIM Infra** » destiné aux BIM Managers, et qui fait suite au livrable 24 intitulé « **Recommandations de mise en place du BIM pour les infrastructures** » destiné aux décideurs, liste les Objectifs Métiers pouvant être traités à l'aide d'une démarche BIM.

Ces objectifs sont rappelés ici Fig.45. Ils sont détaillés dans le livrable 25 de MINnD S1.

Il est nécessaire de rappeler également que les objectifs métiers sont souvent interdépendants au regard du cycle global de développement d'un projet. **Aucun objectif métier n'est autoporteur.** Par conséquent, viser à satisfaire un objectif métier donné implique de s'être préoccupé des objectifs en amont qui deviennent des prérequis (voir Livrable 25 – Figure 6).

PRG	Programmation (MOA)	ETU	Conception (toutes phases)	TVX	Réalisation des travaux	UV	Livraison de l'ouvrage	GEM	Exploitation-Maintenance
01	Connaissance du patrimoine existant	01	Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConçu	01	Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueConstruit	01	Documentation du TelQueRéceptionné	01	Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du TelQueMaintenu
02	Instruction et approbation du projet	02	Développement concourant des études multi-métiers (AVP/PRO/EXE/Méthodes)	02	Suivi (MOA) de l'avancement et de la qualité de la réalisation	02	Opérations préalables à la réception	02	Optimisation des processus de l'exploitant et du mainteneur
03	Concertation et acceptabilité du projet	03	Prise en compte des exigences de l'exploitant et du mainteneur	03	Développement et validation des dispositions constructives	03	Production des livrables et pièces graphiques	03	Alimentation de la BD Patrimoine et des processus GMAO
04	Elaboration du dossier de consultation MOE	04	Gestion de la temporalité du projet (séquençage, ouvrages temporaires)	04	Gestion du séquençage des opérations	04	Récèlement du TelQueConstruit	04	Formation et Immersion
		05	Synthèse générale, analyse et suivi des interfaces	05	Gestion du séquençage de la préfabrication	05	Alimentation DOE-DIUO		
		06	Production des métrés et des quantitatif	06	Production des plans BPE				
		07	Maîtrise des coûts	07	Alimentation consignes de guidage des engins				
		08	Alimentation des outils de simulation	08	Préparation chantier & maîtrise du risque en réalisation				
		09	Revue de satisfaction des exigences de performance de l'ouvrage	09	Logistique (hors site / sur site)				
		10	Revue de satisfaction des exigences réglementaires de l'ouvrage	10	Contrôle Externe / Contrôle Extérieur				
		11	Revue de développement du projet (délai / coûts / moyens)	11	Accessibilité et Ergonomie du poste de travail				
		12	Revue des études techniques						
		13	Revue des études de phasage						
		14	Gestion de configuration des variantes						
		15	Gestion des Ordres de Modification (Change Order)						
		16	Contrôle Externe / Contrôle Extérieur						
		17	Consolidation (MOA) de la définition des travaux à réaliser (pré-DCE)						
		18	Elaboration dossier de consultation des entreprises						

Fig.45 : Liste des Objectifs Métiers et Usage du BIM (MINnD S1 – Livrable 25)

Programmation

- **PRG01** Connaissance de l'existant naturel et anthropique
- **PRG02** Instruction et approbation du projet
- **PRG03** Concertation et acceptabilité du projet
- **PRG04** Élaboration du dossier de consultation MOE

Conception (toutes phases)

- **ETU01** Constitution d'une base de connaissance unifiée, actuelle et partagée du Tel-QueConçu

Réalisation des travaux

Livraison de l'ouvrage

Exploitation -
Maintenance

- **ETU02** Développement concourant des études multi métiers (AVP/PRO/EXE/méthodes)
- **ETU03** Prise en compte des exigences de l'exploitant et du mainteneur
- **ETU04** Gestion de la temporalité du projet (séquençage, ouvrages temporaires)
- **ETU05** Synthèse générale, analyse et suivi des interfaces
- **ETU06** Production des métrés et des quantitatifs
- **ETU07** Maîtrise des coûts
- **ETU08** Alimentation des outils de simulation
- **ETU09** Revue de satisfaction des exigences de performance de l'ouvrage
- **ETU10** Revue de satisfaction des exigences réglementaires de l'ouvrage
- **ETU11** Revue de développement du projet (délai/coûts/moyens)
- **ETU12** Revue des études techniques
- **ETU13** Revue des études de phasage
- **ETU14** Gestion de la configuration et des variantes
- **ETU15** Gestion des ordres de modification (Change Order ou CO)
- **ETU16** Contrôle externe/contrôle extérieur
- **ETU17** Consolidation (MOA) de la définition des travaux à réaliser (pré-DCE)
- **ETU18** Élaboration dossier de consultation des entreprises
- **TVX01** Constitution d'une base de connaissance unifiée et partagée du TelQueConstruit
- **TVX02** Suivi (MOA) de l'avancement et de la qualité de la réalisation
- **TVX03** Développement et validation des dispositions constructives
- **TVX04** Gestion du séquençage des opérations
- **TVX05** Gestion du séquençage de la préfabrication
- **TVX06** Production des plans BPE
- **TVX07** Alimentation consignes de guidage des engins
- **TVX08** Préparation chantier et maîtrise du risque en réalisation
- **TVX09** Logistique (hors site/sur site)
- **TVX10** Contrôle externe/extérieur
- **TVX11** Accessibilité et ergonomie du poste de travail
- **LIV01** Documentation préparatoire à la réception
- **LIV02** Opérations préalables à la réception
- **LIV03** Production des livrables et pièces graphiques
- **LIV04** Récolement du TQC
- **LIV05** Alimentation DOE-DIUO
- **GEM01** Constitution d'une base de connaissance unifiée et partagée du TelQueMaintenu
- **GEM02** Optimisation des processus de l'exploitant et du mainteneur
- **GEM03** Alimentation de la BD Patrimoine et des processus GMAO
- **GEM04** Formation et Immersion