



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

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

Auteurs / Organismes

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

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

Relecteur / Organisme

Vincent COUSIN (Processus & Innovation)

Thème de rattachement : Qualification des données

MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_qualification_recommandations_025_2022
LC/21/MINNDS2/028-029-030-032-099 & LC/22/MINNDS2/161-197
Avril 2023

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	3
1.1 Abréviations / Glossaire.....	4
2. INTRODUCTION.....	7
2.1 Enjeux du Groupe de Travail GT2.2.....	7
3. ÉTAT DE L'ART ET REPRÉSENTATIONS DANS L'INDUSTRIE.....	9
3.1 Enjeux dans l'industrie.....	9
3.2 Normes.....	10
3.3 Types de représentations 2D.....	15
3.4 Types de représentations 3D.....	19
3.5 Analyse de tolérance sur des assemblages.....	24
3.6 Propriétés des objets.....	26
3.7 Gestion de configuration.....	31
3.8 Ingénierie système.....	39
4. APPORT DU JUMENT NUMÉRIQUE DANS LA GESTION DES INCERTITUDES ET DES TOLÉRANCES	45
4.1 Jumeaux Numériques.....	45
4.2 Les stades du Jumeau Numérique.....	47
4.3 Usages du Jumeau Numérique.....	51
4.4 Jumeau Numérique dans le domaine de la construction.....	52
5. MODES DE REPRÉSENTATION DES INCERTITUDES	56
5.1 Rappels des enjeux.....	56
5.2 Plan du corps de rue simplifié.....	57
5.3 Relevés physiques des données du sous-sol.....	58
5.4 Relevés numériques / Traitement des données.....	62
5.5 Représentation graphique.....	67
5.6 Gestion des incertitudes.....	73
6. MODES DE REPRÉSENTATION DES TOLÉRANCES.....	80
6.1 Rappels des enjeux.....	80
6.2 Informations attributaires des IFC.....	80
6.3 Représentation graphique.....	85
6.4 Quelques exemples significatifs.....	89
7. NIVEAUX D'INFORMATION NÉCESSAIRE	97
7.1 Rappels des enjeux.....	97
7.2 Augmentation de la précision pendant le développement.....	97
7.3 Sobriété numérique.....	101
8. NOTIONS DE QUALIFICATION ET DE VALIDATION D'ATTRIBUTS	106
8.1 Contrôles automatiques.....	106
8.2 Critères d'acceptation.....	107
9. RECOMMANDATIONS POUR LA FILIÈRE INFRA	109
9.1 Modes de représentation dans un modèle IFC.....	109
9.2 Exigences et Modèles dans le contexte de la norme ISO19650.....	110

9.3	Prérequis pour gérer les Incertitudes et Tolérances	112
9.4	Recommandations d'architecture logicielle du projet.....	114
9.5	Réalités augmentée, virtuelle et mixte	119
9.6	Nouvelles technologies d'analyses de données.....	120
9.7	Recommandations et perspectives pour la filière	123
10.	IMPACTS SUR LA GESTION DES RISQUES	125
10.1	La gestion des risques.....	125
10.2	Représentations des risques dans un modèle BIM	128
11.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	130
12.	ANNEXE A – FLOU DE L'INFORMATION	135
13.	ANNEXE B – Jumeaux Hybrides	137
14.	RÉFÉRENCES	139

I. RÉSUMÉ ABSTRACT

Résumé

Ce document est le second livrable 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.

Le précédent livrable « Incertitudes et Tolérances : Enjeux et Définitions »¹ présente l'ensemble des définitions des principes liés à la gestion des incertitudes dans un projet d'infrastructure, mais aussi le vocabulaire nécessaire pour exprimer les tolérances et leur mesure. Il précise la notion d'incertitude à chaque étape d'un projet, pendant l'ensemble du cycle de vie des informations nécessaires à la conception, la construction et à l'exploitation des ouvrages. Enfin, il précise les risques associés et leur gestion.

Ce second livrable « Incertitudes et Tolérances : Qualification et Recommandations » est particulièrement vaste et aborde de nombreux concepts nécessaires pour comprendre la complexité du sujet. Il expose les besoins et les enjeux de la profession, et trace des pistes de progrès dans un environnement instable sur les plans économique, écologique, culturel, politique et technologique.

Il aborde les sujets suivants :

- Chapitre 3 : l'ensemble des techniques de représentation des incertitudes et des tolérances dans le milieu de l'industrie, c'est-à-dire les types de représentations graphiques des objets et de leurs assemblages, mais aussi les notions de gestion de configuration.
- Chapitre 4 : les notions de Jumeau Numérique et ses apports potentiels dans la gestion des incertitudes et tolérances.
- Chapitres 5, 6 et 7 : les modes actuels de représentations des incertitudes et des tolérances dans le secteur de la construction, ainsi que les niveaux d'information nécessaires. Le domaine du sous-sol est particulièrement abordé puisqu'il représente un des enjeux les plus conséquents de la conception et de la construction d'un projet d'infrastructure. Les classes IFC et les PropertySets dédiés à ces notions sont également traités dans ces chapitres.
- Chapitre 8 : les notions de qualifications et de validation d'attributs d'objets, permettant de proposer quelques possibilités pour représenter l'état de complétude d'un modèle numérique dans le but de prendre des décisions au regard de la fiabilité des informations.
- Chapitre 9 : des préconisations à destination du secteur de la construction des infrastructures, concernant les prérequis et l'architecture logicielle recommandée, ainsi que des perspectives de progrès.
- Chapitre 10 : l'impact des représentations des tolérances et incertitude sur la gestion des risques, afin de mieux identifier les menaces et les opportunités induites par l'identification, l'analyse et le traitement de ces incertitudes.

Enfin, ce document propose au Chapitre 11, une conclusion et des perspectives pour mieux appréhender ces sujets et motiver le secteur de la recherche afin de trouver de nouvelles solutions opérationnelles à partir des constats et besoins exprimés dans ce document.

¹ MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022 (sur le site www.minnd.fr)

Abstract

This document is the second deliverable of the MINnD research project concerning the concepts of uncertainties and tolerances in the construction sector, and in particular their processing and digital representation in a BIM process.

The previous deliverable "Uncertainties and Tolerances: Issues and Definitions" presents all the definitions of the principles linked to the management of uncertainties in an infrastructure project, but also the vocabulary necessary to express the tolerances and their measurement. It specifies the notion of uncertainty at each stage of a project, throughout the life cycle of the information necessary for the design, construction, and operation of infrastructures. Finally, it specifies the associated risks and their management.

This second deliverable "Uncertainties and Tolerances: Qualification and Recommendations" is particularly extensive and addresses many concepts necessary to understand the complexity of the subject. It outlines the needs and challenges of the profession, and traces tracks for progress in an unstable environment on the economic, ecological, cultural, political, and technological levels.

It addresses the following topics:

- Chapter 3: all the techniques for representing uncertainties and tolerances in the industrial environment, i.e. the types of graphic representations of objects and their assemblies, but also the notions of configuration management.
- Chapter 4: the notions of Digital Twin and its potential contributions in the management of uncertainties and tolerances.
- Chapters 5, 6 and 7: the current methods of representing uncertainties and tolerances in the construction sector, as well as the levels of information required. The domain of the subsoil is particularly addressed since it represents one of the most significant challenges in the design and construction of an infrastructure project. IFC classes and PropertySets dedicated to these notions are also covered in these chapters.
- Chapter 8: the notions of qualifications and validation of object attributes, allows to propose some possibilities to represent the state of completeness of a digital model in order to take decisions with regard to the reliability of the information.
- Chapter 9: recommendations for the infrastructure construction sector, concerning prerequisites and recommended software architecture, as well as prospects for progress.
- Chapter 10: the impact of representations of tolerances and uncertainty on risk management, in order to better identify the threats and opportunities induced by the identification, analysis and treatment of these uncertainties.

Finally, this document offers in Chapter 11, a conclusion, and perspectives to better understand these topics and motivate the research sector to find new operational solutions based on the findings and needs expressed in this document.

I.1 Abréviations / Glossaire

Abréviation	Signification
AGS	Association of Geotechnical and Geo-environmental Specialist
ASIN	Amazon Standard Identification Number

Abréviation	Signification
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AVP	Études Avant-Projet
BOM	Bill Of Materials
bSDD	buildingSMART Data Dictionary
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
DICT	Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DMU	Digital Mock-Up
EAN	European Article Numbering - appelé aussi IAN International Article Number
EP	Études Préliminaires
FT&A	Functional Tolerancing & Annotation
GDC	Gestion de Configuration
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing
GMAO	Gestion Maintenance Assistée par Ordinateur
GPE	Grand Paris Express
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Geometrical Product Specifications
GTC	Gestion Technique Centralisée
GTIN	Global Trade Item Number
HMI - IHM	Human Machine Interface – Interface Homme Machine
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IFD	Industry Foundation Dictionary (désormais appelé bSDD)
IMGC	Ingénierie de Maintenance du Génie-Civil (www.imgc.fr)
ISSMGE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
LOD	Level Of Detail / Level Of Development
LOIN	Level Of Information Need
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MES	Manufacturing Execution System
MOM	Manufacturing Operations Management
MSG	Mémoire de Synthèse Géologique, Hydrogéologique et Géotechnique
MVD	Model View Definition
NTF	Nouvelle Triangulation de la France (laisse place aujourd'hui au RGF93)

Abréviation	Signification
OPR	Opérations Préalables à la Réception
PBS	Product Breakdown Structure
PEO	Plan d'Exécution des Ouvrages
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product Manufacturing Information
PPP	Partenariat Public Privé
PRO	Études de Projet
RGF93	Réseau Géodésique Français 1993
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SPLM	Smart Product Lifecycle Management
STEP	STandard for Exchange of Product
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
UML	Unified Modelling Language (Langage de Modélisation Unifié)
UPC	Universal Product Code

Glossaire

Un glossaire des mots du BIM est disponible sur le site internet www.minnd.fr, dans l'onglet « Livrables Saison1 ».

On pourra également se référer au lexique « Lexicon300 » de l'ISSMGE (1981) :

<https://www.issmge.org/lexicon/1981-version>

Définitions

Toutes les définitions principales concernant les notions d'incertitudes et de tolérances ont été caractérisées dans le précédent livable « Incertitudes et Tolérances : Enjeux et Définitions »².

Notions complémentaires

Un glossaire spécifique des mots et concepts utilisés dans les développements de ce présent livable se trouve en Annexe A du précédent livable « Incertitudes et Tolérances : Enjeux et Définitions ».

Mots clés principaux

Mots clés du livrable

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

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 MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022 (sur le site www.minnd.fr)

2. INTRODUCTION

2.1 Enjeux du Groupe de Travail GT2.2

Ce chapitre est commun avec le premier livrable « GT2.2 - Incertitudes et Tolérances dans le domaine de la construction Enjeux et Définitions »³ du groupe de travail GT2.2 du projet national de recherche MINnD Saison 2.

Le premier livrable décrit les enjeux du traitement des incertitudes et les tolérances dans le domaine de la construction, en commençant par rappeler les définitions du vocabulaire et des concepts traitant ces sujets, puis en exposant les techniques actuelles de gestion des risques pour les gérer.

Ce second livrable expose les types de représentations des incertitudes et des tolérances et recommande des méthodes de représentation adaptées aux projets de construction.

La nécessité de trouver des méthodes de représentation...

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

D'autres données peuvent être parfaitement connues mais leur intégration interfère avec d'autres données préalablement établies dans une phase antérieure. C'est le cas par exemple, d'une étude amont incorporant une signalisation verticale ou des équipements manufacturés définis dans une phase d'avant-projet.

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,
- l'incertitude associée à la mesure du paramètre et au capteur utilisé,
- le positionnement du point de mesure et des limites 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 ou données mécaniques (matériaux) vers les outils de conception constitue un enjeu.

³ MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022

... 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.

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

Incertitudes et tolérances, deux concepts liés

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. Elle fait majoritairement référence à une mesure géométrique ou dimensionnelle.

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.

3. ÉTAT DE L'ART ET REPRÉSENTATIONS DANS L'INDUSTRIE

3.1 Enjeux dans l'industrie

Enjeux de la gestion des tolérances et incertitudes

Rappel types de tolérances

Les données de tolérances et d'incertitudes sont des éléments spécifiques. En effet ces informations ne sont pas le cœur-même du produit à concevoir, à fabriquer et à opérer, mais elles en permettent une définition complète. Elles sont donc strictement nécessaires pour l'ensemble du cycle de vie du produit, mais aussi pour sa réplification.

Dans le cadre de la cotation fonctionnelle utilisée en conception 3D, il y a deux types de tolérances :

- Les **tolérances dimensionnelles** comprenant les tolérances linéaires et angulaires. Ces tolérances ne mesurent qu'une limite entre deux points sans prendre en compte des déformations de forme.
- Les **tolérances géométriques** comprenant les tolérances de forme, d'orientation, de position et de battement. Ces tolérances peuvent être calculées à partir de plusieurs bases : perpendicularité, co-axialité, planéité, localisation, symétrie, circularité...

Toutes ces bases différentes permettent de définir autant de contraintes qui peuvent être imposées au produit.

Rappel types d'incertitudes

Contrairement à une mesure physique, il n'y a pas d'incertitudes sur le dessin industriel et le produit numérique/virtuel est considéré comme « parfait ». Cela ne veut pas dire que l'incertitude sur le produit n'existe pas mais qu'elle est prise en compte dans le tolérancement. Ainsi, le but de la cotation fonctionnelle est de permettre un choix raisonné de tolérance en prenant en compte les différentes incertitudes futures établissant un compromis entre précision requise pour un fonctionnement satisfaisant et les contraintes techniques et économiques de fabrication.

Cas d'emploi et domaines

Les tolérances sont directement en lien avec plusieurs cas d'usage de l'industrie :

- Pendant les phases de Conception (description des tolérances et incertitudes prévues et attendues).
- En lien avec la validation et le contrôle qualité (conception et fabrication) pour certifier la bonne adéquation de la pièce avec ses spécifications.
- Durant les analyses de simulation (analyse et tests simulés pour valider le « contenu » – bonne valeurs à prendre en compte pour respecter les exigences fonctionnelles de la pièce).

Des temporalités différentes sur les tolérances dans l'industrie

Les tolérances interviennent tout d'abord dans la phase de conception des produits, c'est-à-dire durant la création des données. Les tolérances sont donc considérées et créées à partir de l'élaboration de modèles 3D CAO en suivant des règles issues du cahier des charges : c'est une phase de description.

Deuxièmement, la gestion des collisions (hard clash and soft clash) s'applique sur les assemblages et les chaînes de montage. Cette fois, la notion de tolérance intervient non pas sur les pièces mais sur l'assemblage et son comportement en tant qu'entité évoluant dans un environnement de produits. Les tolérances vont donc être modélisées à partir de données de simulation. En fonction des résultats de simulation et de leur analyse, les produits seront validés ou non par cette phase de simulation et de contrôle.

Le tolérancement répond donc à deux besoins distincts, puisque les enjeux sont de concevoir le produit (pièce et/ou assemblage) en s'assurant qu'il répond à ses propres normes, besoins et spécifications. Tout en transmettant correctement les informations nécessaires aux intervenants successifs du projet (par exemple manufacture, fabrication et ingénieurs produits) pour qu'eux aussi puissent respecter leurs spécifications.

Enjeux autour des Jumeaux Numériques

Les cas d'usage Jumeaux Numériques (voir le chapitre 4) apportent de nouveaux enjeux sur la représentation et modélisation des incertitudes et tolérances.

Les Jumeaux Numériques ont pour rôle de décrire le produit réel (à venir ou déjà existant) de la manière la plus proche de la réalité afin d'anticiper le comportement de ce dernier avant même qu'il existe ou de suivre son état pendant son exploitation afin de se prémunir de toute déviation à l'usage dans son spectre de tolérance.

Pour cela, le Jumeau Numérique du produit est utilisé notamment à des fins de simulation. C'est en ce sens que la modélisation des tolérances et incertitudes sur le jumeau numérique présente un enjeu d'intérêt. Il permet d'analyser les écarts entre les mesures de tolérances prévues dès la conception (sur le Jumeau Numérique) et celles mesurées en situation réelle sur le produit physique.

Il permet ainsi de lever, corriger ou valider les incertitudes de conception, de comportements ou environnementales.

Les outils de modélisation 3D permettent de les représenter et les formats de données permettent de les sauvegarder à ces fins. On peut notamment parler des notions de PMI (Product Information Management), ou des normes comme STEP, ASME et ISO.

3.2 Normes

Normes permettant de cadrer la modélisation des incertitudes et tolérances dans l'industrie

Il existe plusieurs normes qui donnent les orientations et les règles en termes de gestion, définition et applications des règles de tolérances et incertitudes.

Nous pouvons distinguer 2 familles de normes présentes et diffusées dans l'industrie : Les normes ASME et les normes ISO.

Norme ASME Y14.5

Elle appartient à l'ensemble des normes gérées par American Society of Mechanical Engineers, une société savante destinée aux professionnels de l'industrie et, à l'origine, orientée surtout sur la recherche en mécanique. Son intérêt est aujourd'hui multidisciplinaire.

Trois versions au moins de ces normes ont été adoptées par l'industrie.

- ASME Y14.5 1994
- ASME Y14.5 2009 (la plus fréquemment utilisée dans les outils)
- ASME Y14.5 2018 (officialise le fait que certaines dispositions de la version précédente n'ont jamais été ou ne sont plus utilisées par les entreprises)

Norme ISO 1101

Elle s'inscrit dans le cadre de la spécification géométrique de produit (GPS - Geometrical Product Specification) dont la vue d'ensemble est décrite par la norme ISO 14638.

Près de 150 normes actives contribuent à définir la GPS dans le cadre de la norme ISO 14638:1995, et leur nombre a triplé depuis 2010.

Le corpus des normes a évolué rapidement en 2009 : l'adoption d'un nouveau principe par le comité ISO/TC 213 a provoqué l'obsolescence de 26 normes et engendré la mise en chantier de 26 nouvelles spécifications.

En octobre 2019, 22 normes étaient en chantier ou en cours de révision.

Le foisonnement des normes a un impact important sur la formation des étudiants et des personnels des entreprises et engendre un besoin de formation et de mise à niveau des cursus et des moyens dédiés à la formation.

La plupart du temps, jamais plus de trois normes sont nécessaires pour un même projet et s'appliquent vraiment en phase de conception.

Représentations des tolérances

Principe de Taylor

Les tolérances géométriques constituent un moyen complet d'indiquer où se trouvent les surfaces critiques d'une pièce, comment elles dépendent les unes des autres et la manière dont la pièce doit être contrôlée pour déterminer si elle est acceptable. Les tolérances géométriques permettent de contrôler la position, la forme, le profil, l'orientation et le battement des fonctions.

Dans l'industrie, on considère plusieurs types de tolérances et d'exigences.

Le principe de Taylor a pour objectif de limiter la « tolérance de forme », c'est-à-dire la déviation d'une pièce par rapport à sa forme idéale qui ne requiert pas de référence par rapport à son usage. Il servait, à l'origine, à contrôler la forme des vis par calibres.

Le « Principe de Taylor » s'énonce :

- La **dimension au maximum de matière d'une pièce** doit être contrôlée au moyen d'un calibre « ENTRE », correspondant précisément à la dimension au maximum de matière de la pièce.
- La **dimension au minimum de matière d'une pièce** doit être contrôlée au moyen d'un calibre « N'ENTRE PAS », correspondant précisément à la dimension au minimum de matière de la pièce et conçu pour contrôler individuellement chaque élément de la pièce.

Par exemple, pour contrôler les mesures intérieures d'un alésage :

- La pièce est « **dans la tolérance** » (Fig.1) si le calibre « ENTRE » pénètre dans l'alésage et si le calibre « N'ENTRE PAS » ne peut pas s'insérer.
- La pièce est considérée « **hors tolérance** » (Fig.2), si le calibre « ENTRE » ne peut pas s'insérer dans l'alésage ou si le calibre « N'ENTRE PAS » y pénètre.

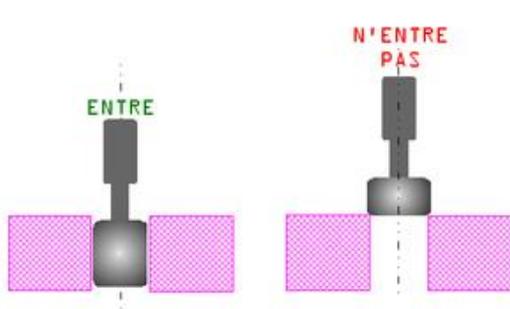


Fig.1 Les mesures intérieures d'alésage
« Pièce dans la tolérance »

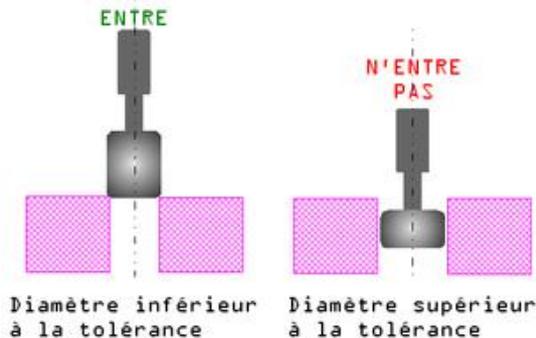


Fig.2 Les mesure intérieures d'alésage
« Pièce hors tolérance »

**Tolérance de forme et
tolérance de position**

Après cette première normalisation, de longs débats se sont ouverts sur l'indication des tolérances de forme et des tolérances de position, puis sur l'adoption du tolérancement géométrique destiné à remplacer les descriptions anciennes.

La « tolérance de position » détermine la position de l'élément par rapport à une référence. Elle permet de donner des indications précises sur les tolérances de mise en position et d'orientation de pièces entre elles et dans des niveaux de côtes, de symétrie, de concentricité, de débattement ou encore de localisation spatiale dans un repère (absolu ou relatif).

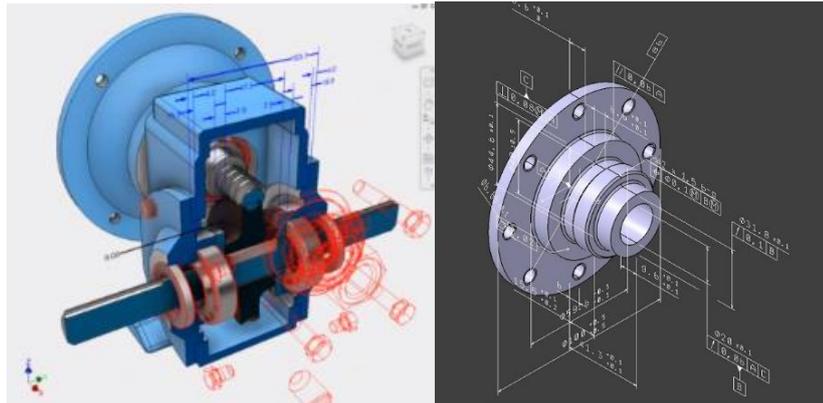


Fig.3 Représentation des tolérances de position (SolidWorks et Catia)

Le tableau ci-dessous Fig.4 illustre les différents types de tolérances s'appliquant à la définition géométrique d'une pièce et à son positionnement et son orientation.

Famille de tolérance	Type de tolérance	Symbole	Description	
Tolérances de forme	Elles permettent de contraindre la forme d'une géométrie			
	Rectitude	—	Elle permet de contrôler la rectitude d'un plan ou d'un cylindre	
	Planéité	□	Elle permet de contrôler la planéité d'une surface.	
	Circularité	○	Elle permet de contrôler la circularité d'une arête, d'un cylindre ou d'une section de cylindre convexe ou concave.	
	Cylindricité	∅	Elle est similaire à la circularité, mais elle s'applique à un cylindre entier.	
	Profil de ligne	∩	Elle permet de contrôler une forme non standard ou une forme gauche.	
Tolérances d'orientation	Elles permettent de spécifier les contraintes d'orientation d'un plan, d'un axe, d'un cylindre, d'un alésage... Elles nécessitent systématiquement une référence.			
	Parallélisme	//	Elle permet de contrôler le parallélisme entre deux éléments.	
	Perpendicularité	⊥	Elle permet de contrôler la perpendicularité de deux éléments.	
	Inclinaison	∠ ou ∩	Elle permet de contrôler l'angle entre deux éléments.	
Famille de tolérance	Type de tolérance	Symbole	Description	
Tolérances de position	Elles permettent de positionner un élément par rapport à un ou plusieurs références, mais aussi de définir des notions de symétrie, de concentricité et de coaxialité.			
	Concentricité	⊙	Elles permettent de contrôler l'alignement des axes de deux éléments.	
	Symétrie	≡	Elle permet de simplifier la représentation de la symétrie.	
Tolérances de battement	Localisation	⊕	Elle permet de contrôler le positionnement d'un élément par rapport à un autre. Elle est différente d'une cotation car elle intègre la tolérance et l'ordre de priorité des références.	
	Elles permettent de spécifier le voile d'un élément cylindrique (la variation de hauteur dans une direction d'une surface lors de la rotation d'un élément cylindrique autour de son axe).			
	Battement circulaire	Radial	↗	Le battement circulaire radial permet, par exemple, d'exprimer que le battement d'un élément autour d'un axe doit être contenu à chaque révolution entre deux cercles coplanaires et concentriques qui sont séparés par une certaine distance.
		Axial	↖	Le battement circulaire axial permet, par exemple, d'exprimer que chaque cercle effectué par un élément autour d'un axe de référence doit se trouver entre deux cercles qui sont séparés par une certaine distance.
		Oblique	↗↖	Le battement circulaire oblique permet, par exemple, d'exprimer des battements obliques selon un angle spécifié.
Battement total	↗↖	Le battement total spécifie en même temps le battement axial et radial d'une surface de révolution.		

Fig.4 Les différents types de tolérances

Tolérances autour du principe d'indépendance

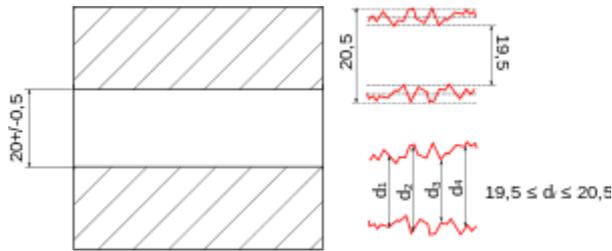
En 1985, la norme ISO 8015 a défini le « Principe d'indépendance » :

- Chaque exigence dimensionnelle ou géométrique spécifiée sur un dessin doit être respectée en elle-même, sauf lorsqu'une relation particulière est spécifiée.

Conséquences du principe d'indépendance :

- Les tolérances dimensionnelles ne limitent pas les déviations de forme.
- Les déviations de forme sont limitées par les tolérances géométriques.
- Une tolérance linéaire limite uniquement les dimensions locales réelles d'un élément.

L'ANSI et l'ASME ont adopté « l'exigence d'enveloppe » qui a souvent pour effet de limiter les caractéristiques géométriques si l'élément considéré est de nature dimensionnelle. L'ASME a adopté le principe d'indépendance en 2009 qui doit être appliqué lorsque l'exigence d'enveloppe ne l'est pas.



En cotation traditionnelle (haut), la tolérance dimensionnelle introduit une tolérance de parallélisme.

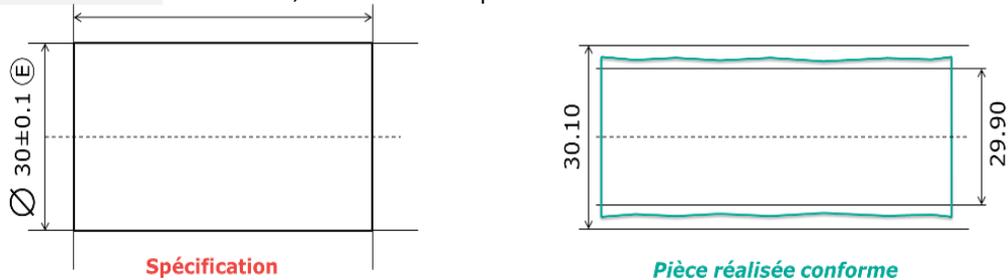
Dans le système ISO/GPS (bas), on détermine les distances localement, indépendamment du parallélisme.

Fig.5 : Principe d'indépendance

Exigences et Tolérance d'enveloppe

L'exigence d'enveloppe spécifie que la surface d'un élément dimensionnel isolé (surface cylindrique ou élément établi par deux plans opposés parallèles) ne doit pas sortir de l'enveloppe imaginaire de forme parfaite (géométriquement idéale) à sa dimension au maximum de matière (ou au minimum de matière).

Elle implique que les dimensions maximales (ou minimales) admissibles de la pièce ne doivent pas être supérieures (ou inférieures) aux limites de taille maximales (ou minimales) de cette forme parfaite.



(E) → Exigence d'enveloppe

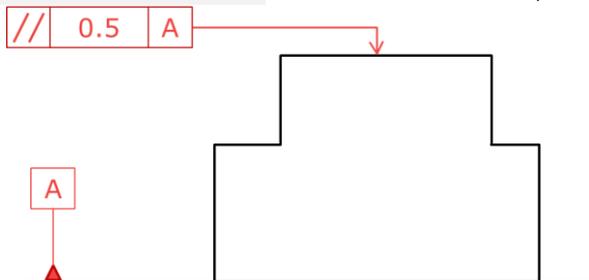
Fig.6 : Exigences et Tolérances d'enveloppe

Tolérancement géométrique

Le tolérancement exprimé en termes de + et de - par rapport à des dimensions ne permet pas de couvrir tous les cas d'utilisation du tolérancement.

Le tolérancement géométrique permet d'exprimer des tolérances relatives à des élément de référence (« datum » en anglais) qui sont potentiellement eux-mêmes sujets à des exigences de tolérancement, et offre plus de flexibilité.

Dans certaines situations, l'interprétation de la spécification prend un caractère complexe.



La zone de tolérance de parallélisme est l'espace compris entre deux plans distants de 0.5 mm.

Fig.7 : Interprétation complexe de spécification

Format d'une annotation de tolérancement

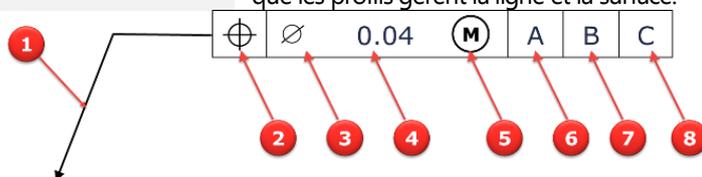
Les tolérances géométriques présentent un écart acceptable pour la forme, le profil, l'orientation, l'emplacement et le battement d'une fonction.

Elles sont inscrites dans un cadre de tolérance. Ceux-ci contiennent toutes les indications de tolérance d'une côte.

Un cadre de tolérance comporte au moins deux éléments.

- Le premier cadre de tolérance contient un symbole représentant la caractéristique géométrique à laquelle s'applique la tolérance (par exemple, la localisation, le profil, la forme, l'orientation ou le battement). Dans la figure Fig.8 suivante, le symbole représente une tolérance d'emplacement.
- Le deuxième cadre contient :
 - un symbole lié à l'objet concerné (ici un cylindre)
 - la valeur de la tolérance géométrique, exprimée en millimètre
 - une exigence de matière (ici M signifie un état au maximum de matière)
- Les derniers cadres sont facultatifs et permettent de hiérarchiser les parties utilisées pour référence.

Les tolérances de forme gèrent la rectitude, la planéité, la circularité et la cylindricité, tandis que les profils gèrent la ligne et la surface.



- | | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Désignation de l'objet auquel la spécification s'applique. | 5 | Facultatif : modificateur de la tolérance ou propriété relative à la taille |
| 2 | Type de la tolérance géométrique. | 6 | Facultatif : première surface de référence. |
| 3 | Symbole diamètre obligatoire pour les Tolérances qui s'appliquent à un cylindre. | 7 | Facultatif : seconde surface de référence. |
| 4 | Valeur de la tolérance. Son unité est celle qui A été définie pour le modèle ou pour le plan. | 8 | Facultatif : troisième surface de référence. |

Fig.8 : Annotations de tolérancement dans un cadre de tolérance

3.3 Types de représentations 2D

Objectif de la représentation 2D

Une pièce a une existence réelle. Elle occupe trois dimensions. Lorsque l'on veut évoquer son existence, l'idéal est d'avoir la pièce réelle en main, mais cela n'est pas toujours possible. En effet, la pièce évoquée peut n'être qu'un projet (idée) ou bien encore ses dimensions ne permettent pas sa manipulation (maison, avion, machine-outil).

Afin de faciliter la communication entre les différents secteurs concernés (conception, fabrication, maintenance...), on utilise une représentation normalisée basée sur les projections orthogonales de la pièce.

Ces représentations tendent à se faire en 3D mais la représentation 2D correspondante est non seulement encore bien présente mais souvent obligatoire en lien avec les autorités de certification.

Les représentations 2D (plans) sont normalisés, avec des dimensions de papier, la présence d'un cartouche et des principes de projection.

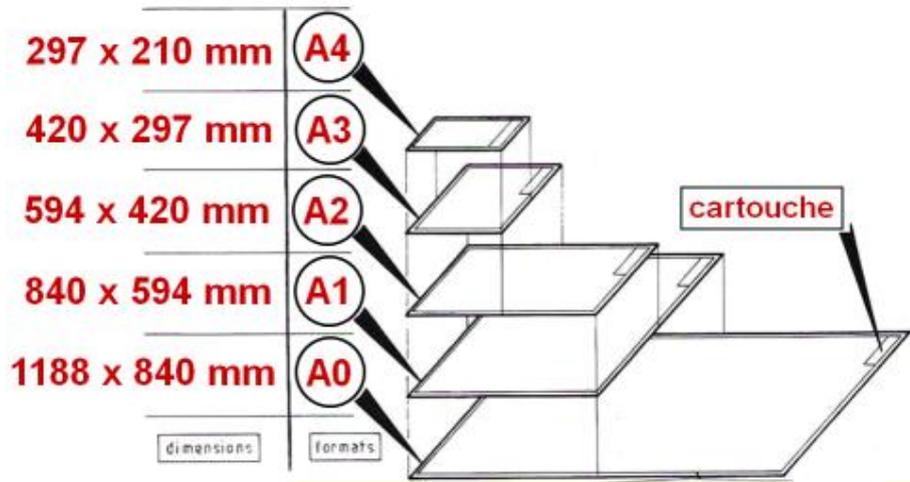


Fig.9 : Formats normalisés des plans

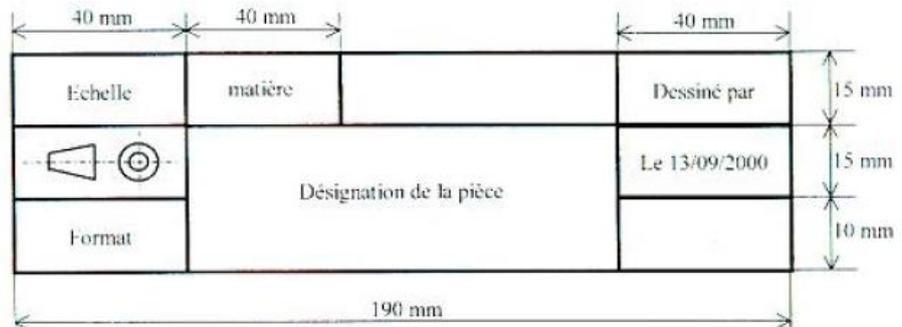


Fig.10 : Exemple de cartouche normalisé

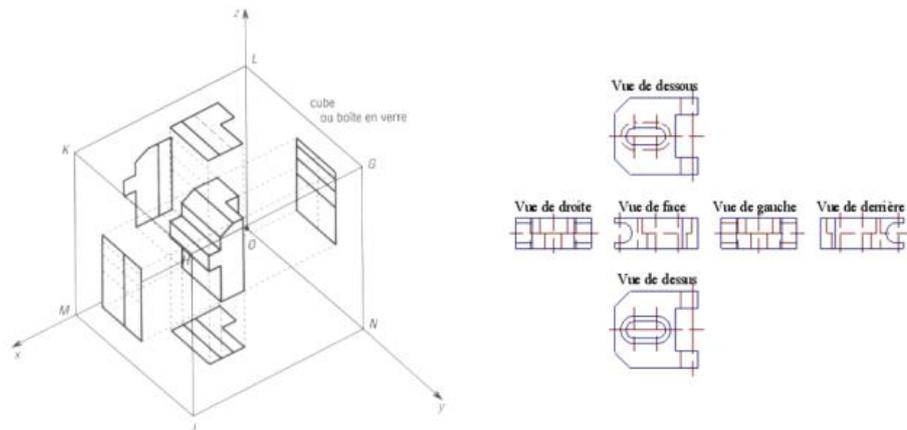


Fig.11 : Principe de projections orthogonales

Ces plans ont pour vocation de représenter en détail les éléments de construction, leurs localisations et repères, les cotes et les tolérances prévues (de montage, de fabrication, de dilatation, de jeux de fonctionnement...).

Ils constituent la base de référence normalisée pour tout dossier de fabrication, d'assemblage ou d'interfaçage et permet de donner un même un cadre aux différents acteurs de la chaîne produit : les dessinateurs-projeteurs, les ingénieurs, les monteurs-régleurs, les opérateurs de fabrication,

Plans d'exécution des ouvrages

les opérateurs de maintenance, les qualificateurs, les autorités de certification et de contrôle, etc. Ils respectent ce qu'on appelle le système GD&T (Geometric Dimensioning & Tolerancing).

Ils permettent par ailleurs de retrouver de manière codifiée tous les éléments nécessaires à la description des éléments à produire mais également des paramètres à atteindre pour les réglages des machines.

Ces éléments sont certes de plus en plus souvent inclus dans les représentations 3D correspondantes, mais pour de nombreux secteurs, les réglementations imposent encore de fournir aux autorités des dossiers de certification en format 2D.

Les PEO (Plan d'Exécution des Ouvrages) sont des plans qui définissent sans ambiguïté, concurremment avec les **spécifications techniques détaillées**, les travaux des divers corps d'état à exécuter. Ils sont éventuellement accompagnés de nomenclatures et d'instructions techniques.

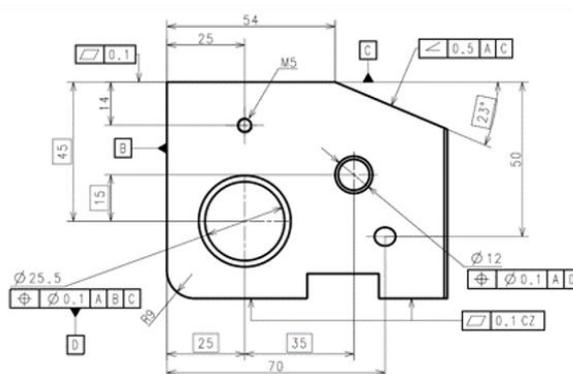


Fig.12 : Exemples de Plans d'exécution des ouvrages

Exploitation et modélisation des incertitudes et tolérances en 2D

La représentation des incertitudes et tolérances autour d'un produit, d'un équipement ou d'un ouvrage est régie, nous l'avons vu, par un ensemble de normes, de règles et de codes. Dès lors, le respect de ces éléments devient primordial pour assurer une bonne compréhension des différents acteurs contribuant à la définition, la fabrication et la maintenance du produit.

Afin d'éviter des divergences de modélisation entre les outils, la plupart des logiciels de modélisation 2D/3D du marché proposent des modules dédiés à la modélisation et la visualisation de ces tolérances et incertitudes.

Les GD&T (Geometric Dimensioning & Tolerancing) se retrouvent donc, pour exemple, dans les modules :

- FTA (Functional Tolerancing and Annotations) des outils CATIA de Dassault Systèmes
- DIMXpert, TOLAnalyst, Geometric Dimensioning & Tolerancing des outils SOLIDWORKS de Dassault Systèmes
- 3D Annotation and Model-based Definition, Inventor Tolerance analysis dans les outils AutoCAD, Revit... d'Autodesk
- GD&T des outils CREO de PTC
- NX Geometric Dimensioning Module des outils NX de Siemens
- 3DCS Variation Analyst de la société DCS, s'intégrant aux outils SIEMENS.

Ces fonctions sont disponibles à la fois pour la modélisation des GD&T dans une vue plan 2D ou dans une vue intégrée à la 3D. Les annotations de tolérance peuvent, en fonction de leur type, être plus faciles à exprimer dans un contexte 2D ou dans un contexte 3D.

Le logiciel attache les informations relatives aux tolérances géométriques directement aux éléments du modèle. Ceci lui permet, lors de l'affichage des vues (vue de face, vue de droite...) du modèle 3D ou d'une projection 2D de celles-ci, de proposer un ensemble d'annotations pertinentes et de proposer à l'utilisateur d'en ajouter ou d'en retirer de la présentation en appliquant des filtres aux données GD&T. L'utilisation de ces informations n'est pas obligatoirement réservée au cas d'usage des processus de bureaux d'études. Elles peuvent être réutilisées lors de la construction, fabrication ou assemblage du produit. Elles font partie du dossier de définition qui documente celui-ci, indépendamment de la représentation que l'on en préfère utiliser au cours de telle ou telle phase de son cycle de vie.

Ces PMI (Product Manufacturing Information) sont alors remontées au niveau des objets en base de données de gestion (au niveau des « métadonnées »). On les retrouve exposées jusque dans les systèmes PLM (Product Lifecycle Management).

La représentation par cote pour la création de la donnée

Historiquement, le moyen le plus classique de représenter une tolérance sur un plan est de définir des cotes auxquelles sont ajoutées les tolérances par le système Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T). Cela n'est pas très représentatif de ces dernières mais permet de garder la cohérence et la clarté du plan tout en les prenant en compte. Ces plans en 2D sont limités car ils ne permettent pas d'avoir une bonne représentation du produit dès que celui-ci devient trop complexe. C'est pour cela que c'est principalement utilisé par la fabrication aujourd'hui afin d'avoir une granularité fine pour chaque pièce et assemblage.

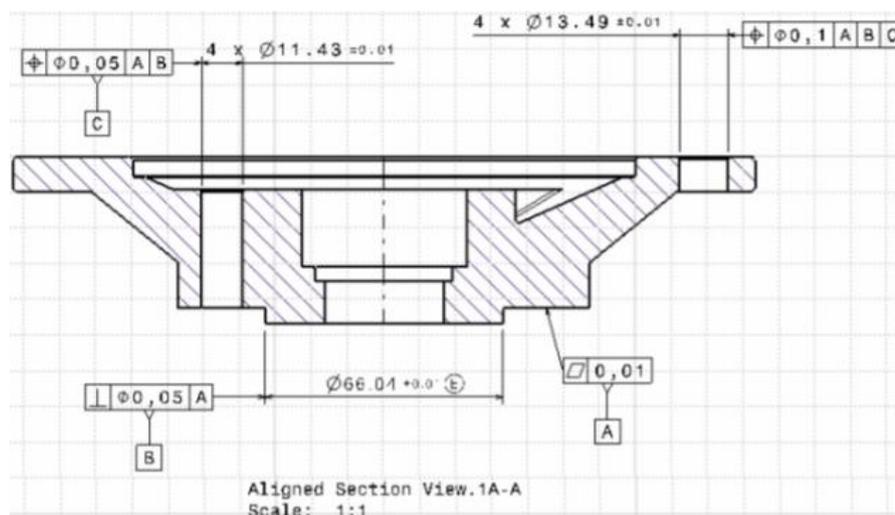


Fig.13 : Tolérances intégrées aux côtes d'une pièce sur un plan 2D – Catia V5

Désormais, depuis le développement des logiciels de CAO et de la 3D, ce type de représentations s'insère également directement sur les modèles 3D. Il est alors possible d'obtenir le plan 2D de fabrication avec annotations à partir du modèle 3D auquel sont liées les cotes.

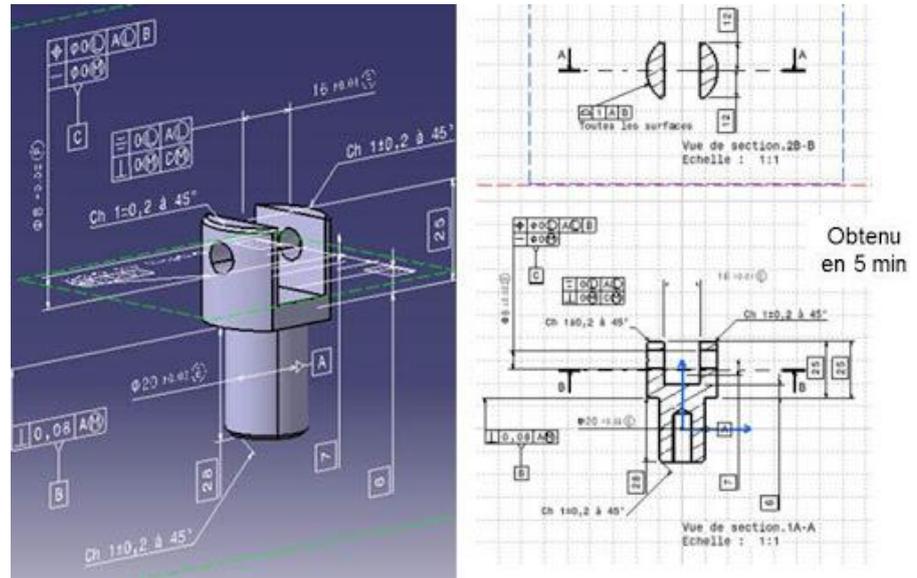


Fig.14 : Exemple de l'outil DIMXpert dans SolidWorks

Le « mesure between »

Ce type de représentations garde les mêmes inconvénients que précédemment, cela devient vite illisible et le but n'est pas d'obtenir une représentation globale des tolérances mais de pouvoir créer et enregistrer cette information.

La technique du « mesure between » intervient non pas sur la création du produit et aux pièces en elles-mêmes mais à leurs positions relatives. Définissant une distance minimale ou maximale entre deux surfaces, elle s'applique ainsi aux produits déjà cotés. Le processus se tourne ensuite peu à peu vers la considération d'un assemblage et de son articulation autour de contraintes. Les représentations sont très similaires à la cotation par annotation 3D mais ne répondent pas exactement au même besoin.

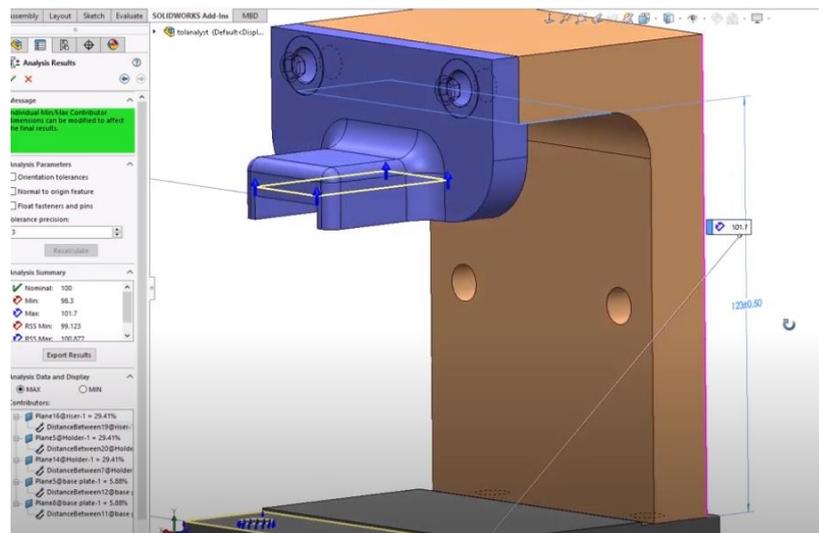


Fig.15 : Fonctionnalité Measure Between sur SolidWorks

3.4 Types de représentations 3D

Objectif de la représentation 3D... un peu d'histoire de la perspective

Le besoin de disposer d'une représentation 3D des produits est plus ancien que la formalisation de leur représentation 2D. L'invention de la perspective conique était le produit des réflexions de maîtres d'œuvres ou de maîtres d'ouvrages en architecture comme Leon Battista Alberti et Filippo Brunelleschi. Les acteurs impliqués dans la production de représentations visuelles de Giotto à Léonard de Vinci, l'ont déclinée sous la forme de la perspective atmosphérique qui traitait avant tout du bossage et de l'ombrage des objets ou des personnages qu'ils représentaient. Un autre type de perspective, la perspective cavalière fut inventée par les architectes militaires pour répondre aux interrogations des stratèges et n'a trouvé que des applications limitées dans l'art de l'Europe occidentale (l'un de ses principaux usages, la série des « Cartes des Chartreuses », initiée par le prieur de la Grande Chartreuse, dom Innocent Le Masson et continuée en application de ses directives par ses successeurs. Ces cartes finirent par collectionner environ quatre-vingts représentations en 3D. La série avait une intention narrative et pour but de rendre compte au prieur de l'aboutissement de travaux ou de l'ampleur d'un projet. Un commentateur des statuts de l'ordre religieux, a résumé la justification l'existence de ces dispositions par la sentence « qui bâtit... ment »).



Fig.16 : Vue cavalière de la Chartreuse du Val Saint Martin par Raquelli (1784) - Musée de la Grande Chartreuse (photographie: Elena Tartaglione, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons")

La multiplicité des concepts de perspective met en évidence deux faits.

- Premièrement, une représentation 3D s'appuie sur un langage de formes (par exemple : « un cube en perspective a deux points de fuite ») qui vient combler les lacunes du vocabulaire de formes, très limité de la géométrie euclidienne qui est la principale base des représentation 2D.
- Deuxièmement, la représentation 3D est en quelque sorte une résultante de l'incertitude : les généraux de l'ordre des Chartreux voulaient se rassurer à l'égard de l'achèvement des chantiers ou du budget des travaux et faisaient régulièrement effacer les fioritures qu'avaient ajoutées les peintres locaux auxquels la réalisation

avait été commise⁴. Les représentations 3D que les systèmes CAO utilisent, reposent principalement sur la perspective axonométrique, une famille des langages visuels, dont la perspective cavalière fait partie, au côté de la perspective isométrique, dont les principales propriétés consistent à conserver les rapports de grandeur et à normaliser la représentation des angles.

L'intérêt contemporain pour les représentations 3D virtuelles, renvoie assez paradoxalement aux préoccupations de l'organisateur de chantiers de l'époque romaine Vitruve, dont l'œuvre constituait une référence pour Leon Battista Alberti, qui a été l'auteur des premières recommandations en matière de normalisation des dimensions en tuyauterie. Les modèles numériques 3D permettent avant tout de traiter les aspects de l'incertitude dans le cadre de la réalisation de produits de plus en plus complexes et pour l'essentiel constitués sous la forme de « sous-systèmes » qui correspondent, d'un certain point de vue, à des produits conçus, développés, fabriqués et livrés par des acteurs différents.

Dans des contextes de ce type, la spécification des incertitudes et des tolérances et leur vérification prennent un relief particulier : un produit qui a été fabriqué de manière conforme par son fabricant, peut subir des déformations ou des altérations indirectement perceptibles, irréversibles pendant ses processus d'acheminement ou de montage.

En résumé, les modèles 3D permettent de résoudre un ensemble de problèmes managériaux, techniques et relatifs au contrôle de la qualité, traditionnels dans la réalisation de projets et de produits.

L'intégration de données géographiques dans les modèles 3D constitue un aspect important mais relativement classique des problématiques relatives à ce type de représentation puisqu'il s'agit d'incorporer à d'autres représentations des données issues d'autres langages de description, souvent à deux dimensions, mais qui n'utilisent pas nécessairement toutes les conventions de la géométrie euclidienne. La représentation numérique à trois dimensions vient aussi suppléer à des besoins assez traditionnels de traitement des incertitudes : la vue cavalière des fortifications dans les pratiques militaires a longtemps coexisté avec le « plan en relief » (une maquette physique) et la maquette approximative du champ de bataille.

⁴ La collection appartient aujourd'hui à l'État, et ce sont les études de la Conservation régionale des monuments historiques, dans l'objectif de sa restauration qui ont mis au jour ces aspects



Fig.17 : Vue cavalière Plan relief de Bouchain (1715) - Palais des Beaux-Arts de Lille, Domaine Public, via Wikimedia Commons

Modélisation des tolérances en 3D

Le passage d'une représentation à deux dimensions à une représentation à trois dimensions nécessite certaines adaptations et des constructeurs linguistiques et mathématiques supplémentaires. La représentation d'un cône ou d'une sphère est purement conventionnelle en 2D. En 3D, en revanche, on ne sait pas définir une forme comme une pyramide régulière sans évoquer son sommet et sa base. Il en vient naturellement que les représentations 3D favorisent naturellement la représentation de certaines tolérances géométriques de nature référentielles (comme le parallélisme d'un axe par rapport à une surface de référence).

La représentation 3D d'un bâtiment ou d'un équipement permet, lorsqu'elle devient suffisamment complète d'éliminer de manière quasi instantanée des incertitudes qu'engendre l'assemblage de modèles qui sont développés de manière indépendante par des métiers différents (par exemple : assurer que des erreurs de cotation ne font pas passer un câble électrique à l'intérieur d'un conduit destiné à des liquides ou à des gaz).

Modélisation des incertitudes en 3D

La modélisation par tout outil (dessin, plan 2D, représentation 3D), par essence, introduit des incertitudes dites de représentation. Elles sont souvent liées à la qualité du modèle utilisé sur lequel les tolérances, cotes et incertitudes sont calculées. Une modélisation précise des formes et entités géométriques, et permettra d'obtenir un haut niveau d'exactitude tant sur les valeurs des cotes que sur les incertitudes induites par ces mesures. À l'inverse des prises de mesures ou des indications de cotes sur des modèles simplifiés (tessellation, vectorisation, transformation d'entités géométriques comme point, lignes, arêtes ... en surface ou peau) continueront d'être valides pour projeter une valeur calculée sur le modèle exact mais induiront de facto des incertitudes, s'ils sont la source de la mesure.

Néanmoins, dans les cas d'usage autour d'infrastructures linéaires et de construction, les attentes en termes de précision de représentation sont en général bien couvertes par les outils en place, que ce soit sur des modèles exacts ou simplifiés. Dans des cas, concernant des pièces et assemblages de haute précision, comme on peut le trouver dans l'industrie, ces éléments sont cependant à prendre en considération.

D'autres notions d'incertitudes sont également à prendre en considération. Il s'agit des incertitudes de calcul et de comportement. On peut citer comme exemple :

- les incertitudes sur la constitution d'un matériau (béton, couche de soubassement, terrain et roche...),
- le comportement d'une pièce d'ouvrage (pile de soutien, fondation, mur ...) en situation,
- l'homogénéité de mise en œuvre ou d'un environnement,
- l'influence d'un paramètre externe (vent, vibration, humidification ...).

Elles sont prises en compte au travers d'opérations de simulation sur les pièces modélisées afin d'en mesurer le comportement sous contraintes et de prédire le comportement en exploitation notamment.

D'autant que les modèles utilisés pour jouer des simulations sont rarement les modèles source 3D, mais principalement des modèles modifiés et simplifiés, tant d'un point de vue des données d'entrée pour les ingénieurs simulation, que d'un point de vue des retouches et simplifications effectuées par ces derniers pour isoler des comportements en lien avec les calculs voulus (maillages retravaillés sur certaines parties des modèles, allègement de formes, suppression de caractéristiques géométriques considérées comme non pertinentes pour le calcul...).

La modélisation de ces simulations peut induire des biais d'incertitudes liés à plusieurs facteurs :

- Maîtrise des valeurs au niveau d'un matériau.
- Existence ou non d'un modèle de calcul mathématique permettant la définition de sa valeur ou le calcul de son comportement sous simulation.
- Connaissance de l'impact de la mise en œuvre de matériaux multiples influant sur les valeurs de calculs (béton coulé autour de ferrailles, présence de corps étrangers dans le béton, fissures localisées visibles ou invisibles...).
- Exactitude des paramètres environnementaux...

Ces incertitudes sont d'autant plus importantes qu'elles vont avoir un impact sur la représentativité du modèle digital généré dans le cas du Jumeau Numérique d'un ouvrage en exploitation. La question est alors de savoir comment indique-t-on ou modélise-t-on les incertitudes créées entre le modèle 3D source et le modèle simplifié pour la simulation.

L'enjeu sera plus de documenter les hypothèses de travail retenues pour préparer et effectuer la simulation, que de chercher à modéliser les incertitudes de calculs. Néanmoins certains paramètres sont à figer dans le modèle et à documenter pour pouvoir rejouer ces simulations ultérieurement.

La représentation 3D de tolérances n'offre pas grand avantage au niveau de la pièce ou d'un assemblage simple, la représentation par vecteurs (développée ci-après) peut aider à obtenir une meilleure visualisation et interprétation mais cela est tout de même limité. La modélisation en 3D des tolérances n'est pas une finalité (ni quasiment un moyen), en revanche l'exploitation de résultats et d'analyse de simulation en 3D est un bon moyen pour avoir une vision autant macro que micro et permet d'optimiser le temps de traitement de « clash detection » par exemple.

La représentation par champ de vecteurs

Les tolérances sur une pièce 3D dans un outil CAO peuvent être représentées par un champ de vecteurs comme c'est le cas ci-dessous dans l'outil TOLAnalyst de SolidWorks.

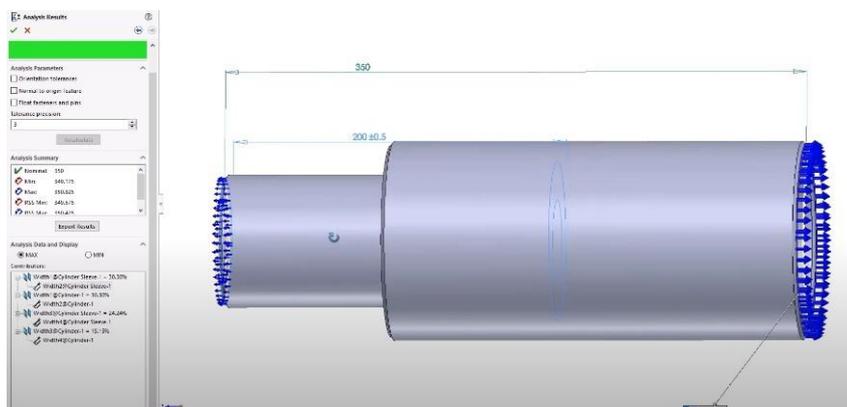


Fig.18 : Modélisation par champ de vecteurs – outil TOLAnalyst de SolidWorks

Cet outil permet de modéliser en trois dimensions les tolérances liées à l'interaction entre plusieurs pièces à partir des tolérances fixées sur chacune des pièces. De plus, dans le résultat de l'analyse il est possible de consulter quelle pièce ou contrainte est le plus responsable de la variation de cote et donc de la tolérance (onglet « contributors »). Ce mode de représentation est fortement couplé à une utilisation en simulation de dynamique des pièces.

3.5 Analyse de tolérance sur des assemblages

Détection de collisions : un outil de simulation

Il existe plusieurs types de problèmes qui peuvent intervenir tout au long du processus d'un projet. Un vocabulaire et des définitions spécifiques ont été définis : les « clashes » couvrent l'ensemble des conflits qui interviennent sur le produit. Par exemple le clash dit « 4D » est un conflit dans la fabrication et l'ordre de montage des assemblages, des outils sont donc utilisés pour les prévoir, les trouver, les analyser et résoudre le conflit. Ici, le type de clash qui nous intéresse sont les collisions dites « 3D » représentant des types de collisions entre pièces et assemblages de manière statique ou le plus souvent dynamique.

Types de collision 3D :

- **Hard clash** : collision réelle entre deux ou plusieurs pièces, les surfaces rentrent en contact voire se traversent alors qu'elles ne le devraient pas. Notion utilisée en statique et en dynamique.
- **Soft clash** : conflit détecté entre des pièces et un espace de dégagement (ou « clearance ») et/ou entre deux espaces de dégagement. Par exemple, autour de pièces électriques un espace de sécurité peut être défini où d'autres pièces ne doivent pas violer cet espace. C'est donc une collision avec un espace de tolérancement prédéfini. Cette notion utilisée uniquement en simulation (dynamique donc) fait écho au « measure between » décrit au chapitre 3.3 définissant un certain espace entre deux surfaces lors de la création de la donnée.

Plusieurs analyses sont souvent requises en fonction des besoins, types de clashes 3D et du choix d'analyse statique ou dynamique. En revanche, les outils sont capables de couvrir quasiment tous ces besoins.

La différenciation, exception faite des performances, se fait dans les capacités d'analyses et la production de rapports de ces outils.

Les différentes méthodes d'analyses de détection de clashes

L'outil « DMU » pour Digital Mock-up présent dans Catia V5 permet de faire de l'analyse de détection de hard clash et de distance (soft clash) sur une simulation. Il permet notamment de faire un nouveau jeu de cette simulation comme illustré ci-dessous.

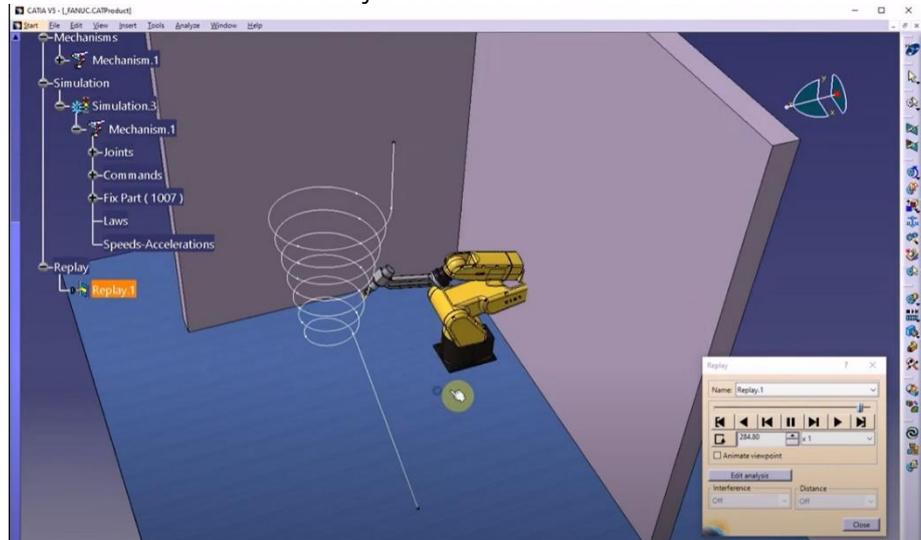


Fig.19 : Collision d'un bras articulé avec un mur lors d'une simulation dans Catia V5

Ici, la production finale est un fichier csv⁵ répertoriant les niveaux d'interférences en fonction du temps. Sur ce [lien](#)⁶ est décrit un exemple d'utilisation de l'outil « check clash » et des possibilités d'une utilisation couplée Catia et Excel (format csv).

Le format de sortie le plus répandu est un rapport sous forme de liste/tableau, d'où une exploitation possible dans Excel par la suite, avec des possibilités de filtres en fonction du type de clash d'objet ou de pertinence.

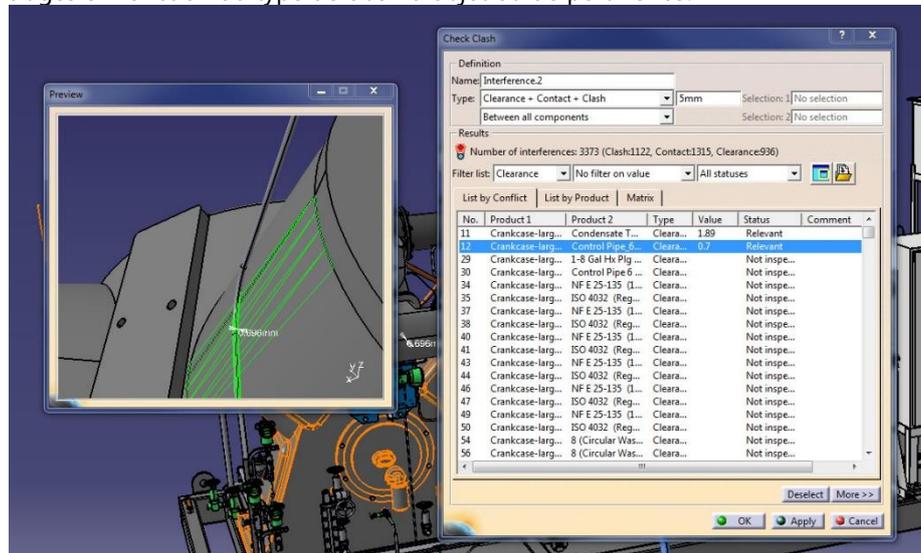


Fig.20 : Rapport d'analyse de détection de collision entre deux produits dans Catia V5

⁵ csv : comma-separated values (format texte ouvert représentant des données tabulaires sous forme de valeurs séparées par des virgules)

⁶ <https://www.linkedin.com/pulse/clash-detection-catia-john-rogers/>

3.6 Propriétés des objets

Stockage et rétention d'information

Les propriétés liées aux informations de tolérancement et d'incertitudes sont modélisées et stockées au travers de mécanismes propre aux outils d'édition ou de stockage.

Elles peuvent être stockées en conteneur dans le fichier géométrique 2D ou 3D suivant les normes ISO en vigueur, mais également être « explosées » en base de données structurée, dès lors que les outils de gestion de données (PLM, SPLM) sont en mesure de lire, stocker et exploiter cette information. Pour ce faire ils doivent être compatibles avec les mêmes normes que ces dernières.

On distingue ainsi le rôle du conteneur et du contenant.

Le **conteneur** a en charge la rétention de l'information dans un format propriétaire ou standard. C'est à ce niveau que les fonctionnalités des outils comme les GD&T, FT&A ou encore PMI, interviennent.

Le **contenant** est une représentation souvent propriétaire ou spécifique à une technologie qui offre une interface qui permet à divers conteneurs de trouver dans un modèle, construit à des fins spécifiques, les informations qui les intéressent ou les concernent.

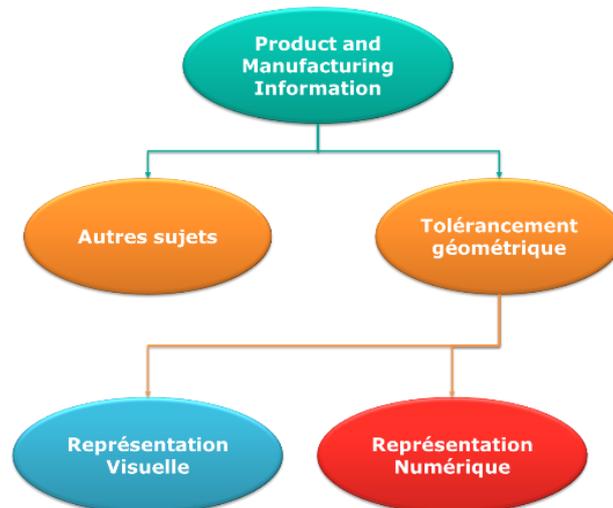


Fig.21 : Structure du conteneur information PMI

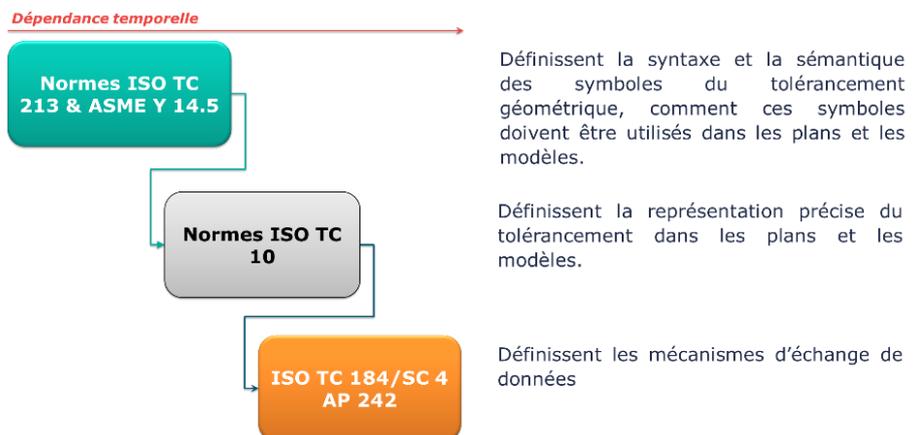


Fig.22 : Cascade d'appartenance normative ISO et STEP AP242

La problématique réside dans la capacité d'exposition et de relecture de ces conteneurs fonctionnels par des outils tiers.

On observe deux tendances majeures :

- Les mécanismes basés sur des conteneurs de gestion et répondant aux contraintes normatives ou standards comme le STEP, Ces derniers sont ainsi capables de dématérialiser l'information en exposant les paramètres et les valeurs au sein du modèle de données de l'outil de gestion ou de l'outil d'exploitation tiers (simulation, visualisation ...). Les informations sont accessibles et exploitables directement dans ces derniers (cas d'analyse de clash ou ségrégation par exemple) ;
- Les mécanismes propriétaires fermés qui stockent l'information dans le fichier lui-même et ne l'expose pas à un outil de gestion comme un PLM.

Le tolérancement géométrique est destiné à être représenté sous forme d'annotations dans le modèle 3D ou dans les plans qui en sont dérivés. FreeCAD, par exemple, peut afficher les annotations dans le modèle 3D, mais oblige à passer par une « vue » 2D pour les spécifier.

Certaines tolérances font référence à des surfaces ou à des formes (et à priori leur nombre peut être très nombreux) qui appartiennent à une même pièce. Par voie de conséquence, ces surfaces et ces formes ont une représentation dans le modèle 3D, mais n'en ont pas dans la nomenclature de conception (BOM Design).

A priori, seules les spécifications de tolérances qui correspondent à des exigences client ou à des exigences prises en compte par le catalogue standard des produits ont un sens dans la nomenclature de conception (BOM Design) et sont naturellement associées à une pièce. Mais beaucoup d'annotations de tolérance sont destinées à être introduites en phase d'industrialisation ou de production. Elles sont attachées aux pièces dans les diverses nomenclatures établies selon la phase de développement :

- **Nomenclature d'industrialisation** (BOM As-Planned): Contient les tolérances liées au processus de fabrication ou d'assemblage du produit, tel que prévu.
- **Nomenclature de fabrication** (BOM As-Built): Contient les tolérances réellement mises en œuvre lors de la fabrication ou de l'assemblage et est le reflet de l'exécution des opérations de fabrication. On peut observer des divergences entre les tolérances de mise en œuvre prévues et celles réellement appliquées (caractéristique de l'outil de coupe, usure de la machine, précision ou matériau du foret...).
- **Nomenclature de livraison** (BOM As-Delivered): Contient les tolérances du produit et des composants au moment de la livraison, incluant ses caractéristiques de conditionnement, de mise en opération et de transport.
- **Nomenclature de suivi en opération** (BOM As-Maintained): Contient les tolérances observées et recueillies aux différentes étapes de maintenance, agrémentées des modifications de constitution de pièces ou de réparations effectuées (ajout de matière, ponçage, rectification, remplacement de composants par d'autres de rechanges ...).

A priori, les tolérances introduites en phase d'industrialisation sont surtout destinées à limiter les coûts d'assemblage. Dans la plupart des métiers, leur impact sur le calcul de besoin est marginal, voire inexistant. Mais c'est avant tout une question de magnitude et de métier (ainsi il n'est pas certain que les tolérances sur le sciage des wafer bruts n'ont pas d'impact sur le calcul de besoin en micro-électronique,

Contraintes liées au format des objets

ou que les tolérances relatives aux quantités de silice sont neutres pour le calcul de besoin dans les souffleries de verre).

Le tolérancement géométrique n'est, *a priori*, pas le seul qui est susceptible d'être représenté par des PMI.

La gamme de normes Geometrical Product Specifications (GPS) de l'ISO⁷ définit un langage symbolique que les industriels peuvent utiliser pour exprimer les tolérances géométriques sur les dessins et les modèles techniques. Il permet de définir la géométrie des composants d'un produit et les tolérances qui quantifient les écarts acceptables par rapport à la géométrie nominale attendue pour le produit.

Le langage ISO-GPS a été conçu comme un langage de spécification utilisable à l'échelle globale. Il permet à un concepteur et à un fournisseur, qui ne parlent éventuellement pas la même langue de partager des spécifications applicables. Il est conçu comme un langage basé sur des règles plutôt que comme un langage basé sur des exemples. Les langages basés sur des exemples sont attirants parce qu'ils sont faciles à comprendre, mais leur utilisation rentre très vite en conflit avec le fait que les produits que les industriels sont amenés à développer et à fabriquer sont toujours plus complexes.

La globalisation des productions qui est destinée à durer, notamment pour permettre des modes de production plus durables, exige un effort de standardisation et de normalisation qui permet de minimiser les besoins de reprises de produits qui sont pour de nombreuses industries la cause de pertes de marge conséquentes et de gâchis environnementaux importants.

Le langage ISO-GPS traite trois aspects du tolérancement.

- Le **tolérancement dimensionnel** qui ne concerne que les dimensions et que l'on tend à voir comme un tolérancement (+/-). Sa capacité d'expression est toutefois limitée parce qu'il oblige à recourir à des formules mathématiques complexes ou non triviales à calculer pour exprimer des concepts simples d'un point de vue linguistique tel que le parallélisme entre deux surfaces.

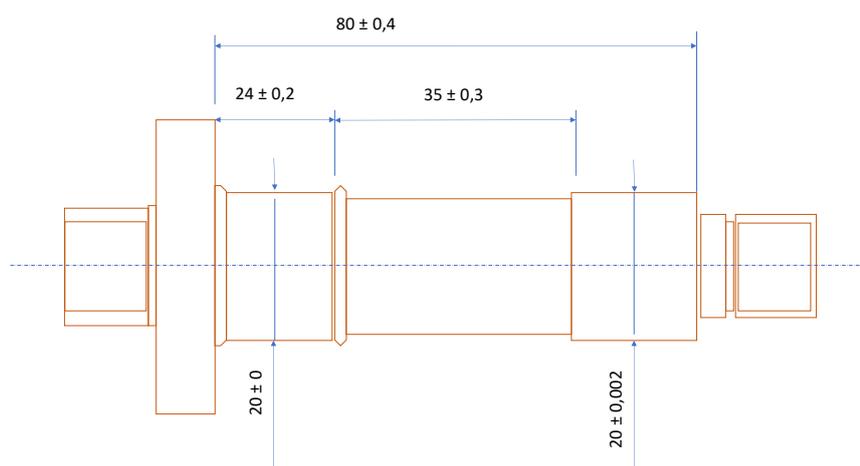


Fig.23 : Tolérancement dimensionnel

Le tolérancement dimensionnel impose, par exemple, d'exprimer de manière verbeuse l'alignement des objets

⁷ ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out

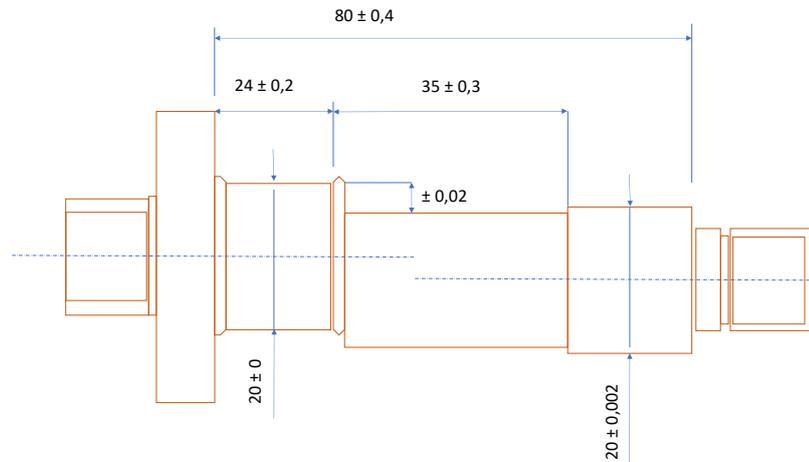


Fig.24 :Tolérancement dimensionnel et Alignement des objets

- Le **tolérancement hybride** consiste à ajouter des opérateurs géométriques au dimensionnement dimensionnel, par exemple, un type d'annotation qui permet d'exprimer une contrainte de parallélisme.

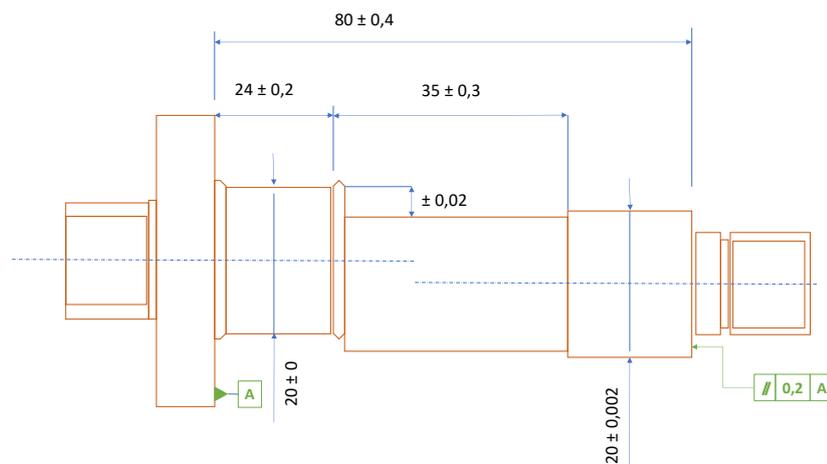


Fig.25 : Tolérancement hybride

Il ne suffit pas à résoudre la plupart des problèmes parce qu'il ne propose pas de méthode qui permettrait de faire un choix rationnel entre l'application d'un opérateur et l'expression de la même contrainte par d'autres moyens.

- La **Spécification Géométrique du produit par d'une approche générale** qui consiste à identifier qu'elles sont les surfaces qui jouent un rôle déterminant avec l'environnement dans lequel le produit va interagir. Les spécifications de tolérancement perdent ainsi leur caractère absolu pour devenir contextuelles : Certaines qui sont cruciales pour le bon fonctionnement du système résultant ne doivent pas nécessairement être considérées lors de la fabrication ou de l'assemblage des sous-composants. À l'inverse, une étape d'assemblage ne doit considérer que les contraintes relatives à son résultat, et n'a pas besoin de se préoccuper des contraintes qui ont été respecté au cours des phases précédentes et dont la qualité des résultats a, en principe, déjà fait l'objet d'un contrôle.

Le concepteur doit d'abord identifier les surfaces qui jouent un rôle critique dans l'interface avec le système avec lequel le produit prend place. Il doit ensuite déterminer quelle est celle, lors qu'elles ne sont pas toutes parfaitement conformes, dont la conformité doit prendre le pas sur les autres. Cet ordonnancement permet d'identifier les surfaces ou les structures géométriques, réelles ou imaginaires (l'axe d'une pièce, par exemple, peut être représenté par une droite théorique qui ne correspond à aucun composant physique du produit) qui servent de base à la définition des tolérances applicables à chacun des composants que l'on traite à une étape donnée de la construction.

La méthode générale est portée principalement par le concept de « modèle de peau ». Ce dernier représente la pièce en tenant compte de ses défauts. Le processus général est représenté sur la figure suivante.

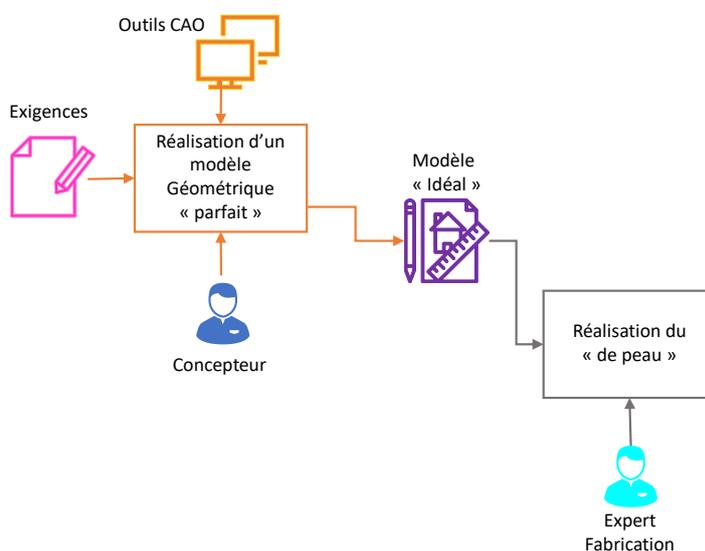


Fig.26 : Spécification géométrique du produit - Concept de « Modèle de peau »

Le processus général consiste à procéder, à partir d'un modèle de conception qui possède une géométrie idéale à une identification des surfaces qui sont susceptibles de poser un problème (en fonction de la nature des matériaux, de la technologie qu'on leur applique, de l'expérience que l'on a de leur utilisation, des diverses positions des éléments du produit), au cours de l'usinage, de l'assemblage, de l'utilisation et de la maintenance du produit, et de déterminer les conditions qui permettent de contrôler leur apparition. Le modèle intermédiaire dit « modèle de peau » (en anglais : skin model) est avant tout de nature conceptuelle. Il peut être simulé ou représenté avec plus ou moins de précision ou de réalisme. Il peut être assemblé à partir de formes de bases qui viennent remplacer les surfaces idéales et qui embarquent un certain nombre de tolérances dont les valeurs résultent de spécifications connues ou des résultats de l'expérience.

Les applications de ce modèle concernent principalement des propriétés géométriques des produits, mais il peut être appliqué tout aussi bien à d'autres propriétés qui sont mesurables au travers d'un concept de distance.

Les données principales du tolérancement géométrique sont assez simples et n'appellent pas vraiment une modélisation sophistiquée. Du point de vue syntaxique, elles peuvent être analysées à l'aide d'une grammaire régulière ou d'une grammaire non contextuelle simple.

Conséquences en matière de représentation des données

La structuration des données concerne plutôt la définition des éléments de référence qui sont *a priori* de type forme.

On peine à trouver dans la littérature des exemples de tolérances appliquées à des assemblages tels que des claviers d'ordinateurs ou de divers appareils qui assemblent des éléments identiques. Le problème existe néanmoins en fonction de la taille et de la forme du clavier (convexe, concave, plat, etc.).

Dans de telles situations, il existe une différence sémantique entre la nature des éléments (les touches) et celle de l'assemblage. Les premières sont du domaine de la conception, les secondes plutôt du domaine de l'industrialisation.

Dans une certaine mesure, le même problème existe dans le domaine de la construction avec la différence entre les tolérances relatives aux IFC qui modélisent des solides, et les tolérances éventuellement applicables aux formes de CityGML (Fig.27). La tolérance de planéité de la brique et la tolérance du mur qui est construit à partir de ces briques sont deux spécifications de nature différente, et le problème est identique avec des éléments de plus grande taille que la brique.

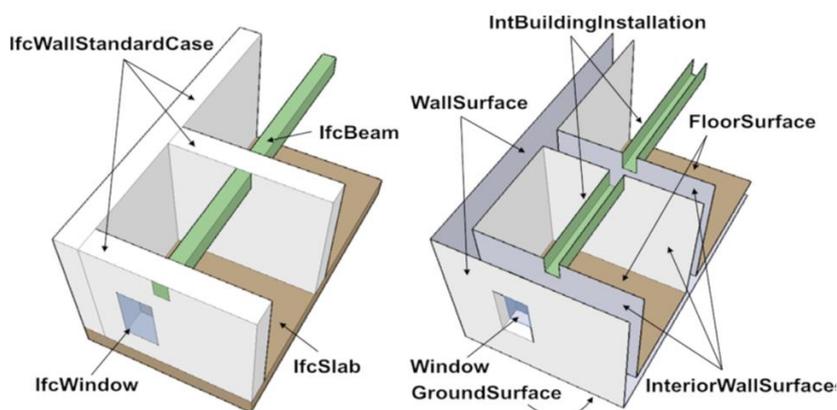


Fig.27 : Représentations d'un bâtiment en IFC et en CityGML

Source: Nagel C., Stadler A., Kolbe T.H., 2009, Conceptual Requirements for the Automatic Reconstruction of Building Information Models from Uninterpreted 3d Models – Academic Track of Geoweb 2009: Cityscapes, ISPRS

3.7 Gestion de configuration

Principe de gestion de configuration

Enjeux de la GdC

La Gestion de Configuration (GdC) est un processus de traçage de l'information associée à un produit, au cours des différentes étapes de son cycle de vie (les phases de son développement et de son usage, et en particulier pendant son exploitation et sa maintenance).

Les enjeux de la GdC sont multiples :

- Anticiper l'exploitation et la gestion technique des ouvrages, par livraison d'un ensemble cohérent et structuré de documents vers l'exploitant et le mainteneur.
- Structurer les données (documents) et métadonnées (informations) pour en faciliter l'usage, l'archivage, le suivi...
- Attribuer des métadonnées à des composants ou des groupes de composants pour pouvoir les suivre sur l'ensemble du cycle de vie (localisation, attributs de suivi des installations, etc.).

- Ordonner un ensemble de configurations successives ou parallèles dans le temps (représenté par des dates ou des successions de jalons dans le cycle de vie) qui conservent les liens effectifs, lors de l'occurrence d'un événement, entre la documentation, les modèles (maquettes numériques, modèles de simulation, etc.) et les équipements construits, livrés, installés ou même retirés.

Les types de GdC

GdC documentaire

Afin d'exploiter plus efficacement une infrastructure, des types généraux de configuration sont, *a minima*, utiles.

La GdC documentaire traite la liasse des documents livrés avec les ouvrages et s'appuie sur un plan de classement. Les documents sont liés à leur contexte :

- Spatial, c'est-à-dire le découpage géométrique de l'infrastructure (par zone géographique, par ouvrage, par étage...).
- Systémique, c'est-à-dire par discipline ou spécialité (génie-civil, bâtiment, terrassement, assainissement, courant fort, courant faible...).

Ces documents sont regroupés par dossiers de classement (après leur approbation) et transférés vers le gestionnaire de l'infrastructure (exploitant et mainteneur).

GdC produit

La GdC produit est orientée « équipement », et en particulier les équipements sensibles, afin de faciliter l'acceptation, la certification, l'exploitation et la maintenance.

Les descriptions des équipements (produits) par des métadonnées, sont organisées sous formes d'arborescences (PBS Product Breakdown Structure ou Organisation du Produit), afin de :

- Faciliter les recherches et les diagnostics ;
- Localiser et identifier les équipements ;
- Optimiser la mise à jour à la suite de modifications ;
- Gérer le cycle de vie des équipements (par exemple : spécifié, conçu, localisé, réalisé...).

Les mises à jour des métadonnées et des liens sont historicisées, et généralement horodatées.

Définir une configuration consiste à placer une étiquette sur certains nœuds et feuilles de l'arborescence qui indique à partir de quel événement ou de quelle date, l'information qu'ils contiennent est considérée comme valide, dans quel contexte, et qu'elle est l'autorité qui a décidé de cette validité.

Une telle étiquette est généralement gérée de bas en haut dans l'arbre et peut consister à indiquer que l'on prend en compte les branches qui font elles-mêmes partie de configuration partielles. Il est fréquent qu'un produit soit lui-même composé de sous-systèmes (par exemple : le chauffage et la ventilation, l'alimentation et l'évacuation des eaux, la consommation et la production autonome d'électricité, etc.) qui font l'objet de validations par des autorités indépendantes.

L'objectif d'une configuration peut consister à tracer :

- Un état fonctionnel du produit (quels sont les blocs de fonctions qui permettent de satisfaire les exigences d'un client à l'égard des engagements d'un contrat).
- Un état de la structure organique de la solution (pour faire simple, si un lotissement doit être composé de quatre types de pavillons de dimensions différentes, un certain nombre de données, de modèles et de documents vont être gérés dans des dossiers indépendants qui s'appliquent chacun à un type de pavillon).

- Un état d'un produit livré ou d'un exemplaire de produit livré. La complexité du produit détermine si on doit gérer un dossier par exemplaire, ou si l'on peut se contenter d'un dossier pour un lot d'exemplaires qui sont documentés par un même ensemble d'information. Il arrive même, dans le cas d'équipements fortement complexes que l'on gère ces deux formes de dossiers.

Un avionneur, par exemple, gère un dossier relatif au modèle d'avion, un dossier relatif à la déclinaison de ce modèle pour un client donné, un dossier relatif à la série d'avions commandés par ce client, un dossier par sous-série d'avions livrés, un dossier pour chaque avion livré. Le choix des dossiers est essentiellement pragmatique et adapté à chaque métier ou à chaque état d'un métier. Dans l'exemple de l'avionneur, le dossier relatif à une série d'avion livrés à un même client a pour but de minimiser, pour autant que faire se peut la diversité des processus de maintenance, chez ce client. La plupart des compagnies qui opèrent des vols à tarif économique souhaitent n'avoir qu'un ou deux modèles d'avion, tous personnalisés de manière identique dans leur flotte. L'exécution des livraisons, soit à cause des droits d'option prévus au contrat, soit à cause du calendrier de production de l'avionneur, s'étale dans le temps, et une sous série d'appareils peut incorporer, par exemple, en standard des équipements nouveaux que la réglementation a imposé depuis la livraison de la sous-série précédente.

Codification des produits

Chaque élément d'une configuration doit être doté d'un identifiant unique. Historiquement ces identifiants étaient significatifs. C'est-à-dire que la lecture du code, placé sur une étiquette, permettait à un humain d'identifier à quel dossier il devait avoir accès pour trouver toute l'information dont il avait besoin. On appelle traditionnellement l'opération qui consiste à générer un identifiant de ce type et son résultat : la codification du produit.

Les produits sont caractérisés par une codification, des attributs et un statut dépendant de sa phase dans le cycle de vie.

Des documents, également codifiés, sont associés aux produits. Ces documents techniques évoluent en fonction des phases du projet :

- Exigences du programme.
- Exigences fonctionnelles (spécifications techniques).
- Fiche technique du produit (schéma détaillé).
- Plan d'implantation.
- Procès-verbal de test et de réception.

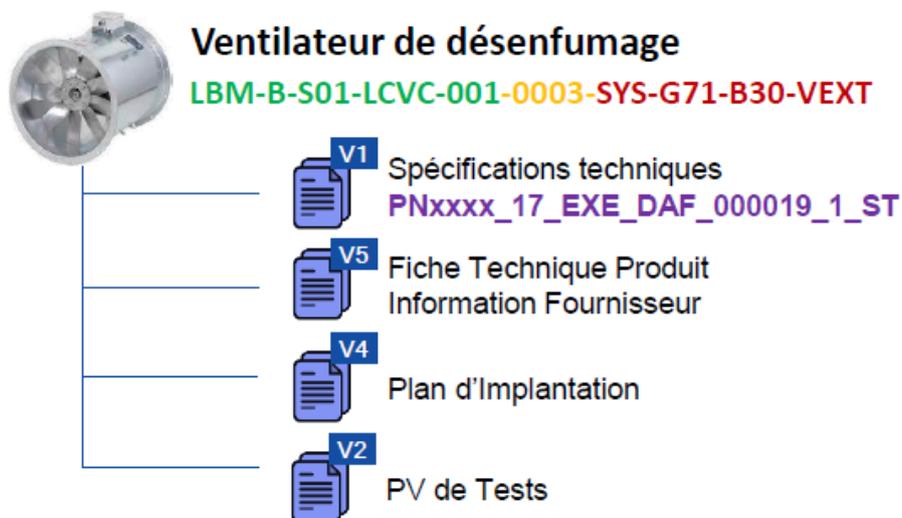


Fig.28 : Principe de Gestion de Configuration (Source Grand Paris Express)

Recommandations

La gestion des configurations à partir de la structure logique des points de vue sur un produit n'interdit pas de gérer celui-ci au travers d'autres structures qui permettent d'accéder plus facilement à ces points de vue et configurations. Deux types de structures sont le plus souvent utilisées :

- Des **structures de classement** qui émulent un stockage physique ou un stockage numérique de base. On va trouver dans les applications numériques d'aujourd'hui des systèmes de classement sous la forme d'armoires, de tiroirs et de dossiers, ou des structures de volumes et de dossiers qui ressemblent aux systèmes de fichiers des systèmes d'exploitation des ordinateurs. Ces organisations ont une dimension culturelle et générationnelle. Elles ont souvent été conservées à la fois pour faciliter la courbe d'apprentissage des utilisateurs qui prenaient en mains des données digitalisées et ne pas surcharger un projet de digitalisation des activités par la mise à jour de très grands volumes de procédures qualité.

Une telle structure comprend en général deux niveaux obligatoires :

- Une représentation du type d'éléments considérés. Sont-ils dans une « bibliothèque » et destinés à être partagés par un certain nombre de programmes ou provenant d'un même fournisseur ou sont-ils spécifiques à un programme, une offre commerciale ou un client donné.
 - Une partition organisationnelle de chacun des ensembles ci-dessus sous la forme de conteneurs de métadonnées et de documents. Par exemple un conteneur de type produit par programme, un conteneur pour chaque ensemble de haut niveau qui est réutilisé par plusieurs programmes, un conteneur de type bibliothèque pour les éléments achetés sur catalogue, un conteneur de type bibliothèque pour les éléments dont on sous-traite la fabrication, mais dont on gère les spécifications.
- Des **arbres de classement** qui permettent de créer des chemins supplémentaires vers des éléments de configuration dans les perspectives de spécialités métiers très fines. Les liens entre les classes et les éléments de la configuration peuvent alors porter des informations qualitatives.

Les identifiants dont la structure est complexe sont utiles dans les environnements où les personnes qui interviennent sur le produit, qu'il s'agisse d'un cadre numérique ou réel, n'ont pas facilement accès au dossier correspondant.

Ils perdent beaucoup de leur intérêt dans des environnements métiers où les gens sont équipés de terminaux mobiles capables de lire un code barre ou un code QR pour atteindre directement le dossier. N'importe quel équipement, structure ou produit industriel contient de toute manière des composants banalisés, achetés sur catalogue, que l'on identifie à l'aide de leur numéro ASIN ou de leur code UPC, EAN ou GTIN.

Un système de codification simple peut reposer sur les données suivantes :

- Pour les éléments du dossier industriel :
 - Numéro du système de codage.
 - Numéro du fabricant du produit.
 - Numéro de l'élément dans les dossiers industriels.
 - Le contexte du dossier.
- Pour les exemplaires étiquetés :
 - Numéro du système de codage.
 - Numéro du fabricant du produit.
 - Numéro de l'élément dans les dossiers industriels.
 - Numéro de l'exemplaire dans la série.
 - Le contexte d'utilisation.

Les fonctions de ces données sont les suivantes :

Nom de la donnée	Usage
N° du système de codage	Il permet la multi-codification des éléments. Il peut arriver que le client ne souhaite pas utiliser les étiquettes du constructeur, de l'équipementier ou du fabricant, mais ses propres numéros d'inventaire en phase de maintenance. Il permet de résoudre des situations où un fournisseur utilise de préférence un code ASIN pour leurs entrées de catalogue, et dans lequel la politique maison impose l'utilisation d'un code GTIN.
N° du fabricant	C'est l'identifiant du fabricant dans le système de codage. Il permet d'identifier rapidement la propriété industrielle de l'élément lors qu'une question relative à la responsabilité des modifications se pose.
N° de l'élément dans les dossiers industriels	Généralement, un numéro alloué sur un compteur d'éléments. Pour des raisons pratiques, il arrive que l'on alloue des tranches de numéros à certaines classes de produits.
N° de l'exemplaire dans la série	Généralement, un numéro alloué sur un compteur particulier à l'élément de dossier industriel associé à l'exemplaire. Là aussi, pour des raisons particulières, la base de numérotation peut être allouée à l'aide d'une autre méthode.
Contexte du dossier	Le conteneur spécifique à un programme ou une bibliothèque dans lequel on gère le dossier industriel. Ce peut-être aussi le nom d'une ligne de produit ou d'une classe particulière de produits dans une ligne.
Contexte de l'exemplaire	C'est le nom du site, du projet ou du programme sur lequel le produit est utilisé.

Le schéma Fig.29 ci-dessous illustre, de manière partielle, l'application d'une telle stratégie d'identification.

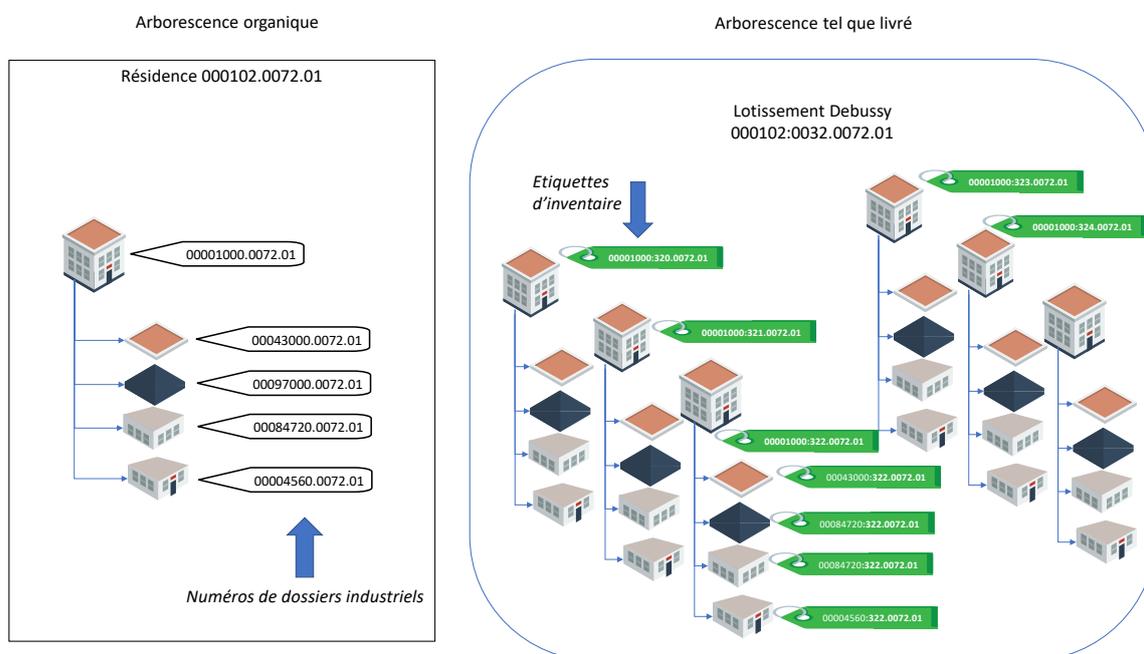


Fig.29 : Arbres de classement (arborescence organique et Tel-Que-Livré)

En théorie, l'arborescence organique et l'arborescence du produit tel que livré sont capables de porter l'information pertinente au cours de toutes les phases du cycle de vie du produit. Des différences dans la structure peuvent être nécessaires entre ces phases. Notamment pour l'arborescence de planification de la production qui peut nécessiter des étapes qui représentent un traitement et qui n'ont qu'un intérêt secondaire du point de vue de la conception (par exemple, le passage de l'état « embouti brut » à « embouti et peint » d'un composant de carrosserie parce que l'opération ne comporte pas de contraintes du point de vue de la géométrie de l'élément, mais génère des besoins en matière d'espace pour le séchage et le durcissement et crée de fait un stock qu'il faut gérer). Les systèmes peuvent les gérer en marquant le fait qu'un nœud ne doit être considéré existant que pour l'arborescence dans le point de vue « Planification » et en marquant de la même manière les liens qui s'y rattachent.

Néanmoins, cette stratégie n'est pas toujours payante du point de vue de l'effort nécessaire aux utilisateurs intéressés par un aspect particulier du produit. Ceci est notamment le cas des certifications et du management des contraintes. De nombreux composants du produit ne sont pas pertinents du point de vue de l'établissement d'un certificat ou à l'égard d'un groupe de contraintes données. Plutôt que d'exiger des utilisateurs l'obligation de les marquer tous ou de développer et de tester des règles qui les marquent automatiquement, il est plus simple de créer une arborescence parallèle à l'arborescence organique qui contient seulement les éléments pertinents pour l'activité concernée que l'on associe aux nœuds équivalents dans l'arborescence organique. Les certifications sont le plus souvent argumentées par des personnels qui ont été spécifiquement formés et qui détiennent des compétences particulières. La technique d'utilisation de co-arborescence permet aussi une gestion plus simple des autorisations relatives à l'application de certaines actions sur les éléments de l'une et l'autre arborescence.

Propriété intellectuelle et ségrégation des données

Attention, certaines propriétés de produits peuvent demeurer inconnues, afin de garantir la protection de la propriété intellectuelle du fabricant. Ces produits sont des « boîtes noires » dont seules sont décrites :

- l'enveloppe externe (l'encombrement physique du produit) et servicielle (le gabarit à laisser libre pour installation ou maintenance);
- les bornes et interfaces (connexions avec les systèmes en contact).

Cela exige donc une préparation en amont de la conception. On parle de « ségrégation des données », pour identifier les besoins de chaque intervenant et pour définir les moyens de conception, de mise en œuvre et de maintenance.

Par exemple, dans la maquette numérique d'un appareil d'Airbus, l'enveloppe globale des moteurs (fourniture Rolls Royce) est parfaitement connue, sous la forme d'un modèle géométrique simplifié et dénaturé, qui précise en détail les interfaces complètes pour l'insertion dans son contexte (attaches et connexions).

Airbus possède une direction « domain interface » qui génère le PMI (Product Manufacturing Information) dans lequel on trouve :

- les principes de ségrégation des données ;
- les tolérances de fabrication et de montage ;
- les points d'interface.

De nombreuses informations (attributs qui doivent respecter des règles et des normes) sont donc « exposées » en dehors du modèle 3D, dans une base de données (principalement un PLM).

Désignation et référence produit

De nombreux métiers industriels identifient, pour des raisons variées, à l'aide de numéros uniques, les produits qu'ils livrent aux clients. Ces numéros sont accessibles aux clients sous la forme de gravure sur la pièce, d'étiquettes ou interrogeables à partir d'outils numériques (Fig.30). Ils peuvent être demandés aux clients dans le cadre de la maintenance (par exemple, pour détecter le fait que la pièce a été fabriquée avant que la cause racine d'une panne ou d'un type de pannes, n'eut été identifiée) ou utilisés par divers dispositifs, dotés de plus ou moins d'intelligence afin d'automatiser certaines procédures de prise en charge (l'un des exemples les plus anciens et les plus fréquemment utilisés sont les adresses MAC qui permettent d'identifier un dispositif matériel sur un réseau de communication).

Les techniques d'identification sont destinées à servir des besoins propres à certains métiers et leur complexité varie en fonction de ceux-ci. Dans le monde de la production de cosmétiques, de médicaments ou de puces électronique, ils conservent essentiellement une identification du lot qui permet au fabricant de savoir rapidement où et quand il a été fabriqué. Mais quand il s'agit d'un médicament sensible à cause de ses effets potentiels, le numéro peut inclure aussi une référence à la version de la recette qui a été utilisée pour produire le lot.

Dans certains métiers, plusieurs numéros peuvent être associés à un même objet ou ensemble d'objets pour tenir compte des présentations commerciales sous lesquels ils sont livrés. Pour donner un exemple simple, lorsque l'on accède à un enregistrement musical sur une plateforme d'écoute en flux continu, celui-ci est généralement identifié par son producteur, l'auteur ou le label discographique qui commercialise l'œuvre à l'aide d'un ISRC (International Standard Recording Code – Code International d'une Œuvre Enregistrée) et un « Code Barre » (en général un UPC - Universal Product Code – Code Universel des Produits) qui peut être associé soit à un enregistrement unique, soit à l'ensemble qui le contient. Comment les

intervenants de la chaîne de production gèrent ces codes est de leur seule responsabilité. Certains producteurs associent le même ISRC à des enregistrements différents d'une même œuvre, certains distributeurs qui vendent les enregistrements au détail créent un UPC pour chacune des pistes d'un même album. Il n'existe pas de règle universelle : tout dépend de la stratégie de collecte des rétributions par les contributeurs de la chaîne.

Les mêmes problématiques, au service de la distribution ou de la maintenance se retrouvent dans tous les produits industriels, avec des contraintes et des complexités souvent supérieures. Afin de satisfaire les divers besoins, les systèmes PLM ou SLM utilisent des représentation « physiques » des produits que l'on désigne sous le nom de « Part Instance » (exemplaire de pièce) ou « Physical Item » (article physique).

Il est intéressant, afin d'identifier rapidement les défauts qui affectent potentiellement un exemplaire, présent sur le terrain ou chez le client, de relier celui-ci à une configuration du dossier qui a permis de le définir ou de le produire. Les exemplaires de pièces sont généralement associés à une version de la représentation du dossier dans le PLM. Ce lien permet, par exemple, de retrouver rapidement la version du modèle 3D qui a été utilisé lors de la fabrication de la pièce.

Il n'existe pas de formule magique dans ce domaine : un équipement de complexité moyenne peut faire appel à des constituants qui sont suivis individuellement (par exemple, les alimentations sur une carte électronique), à des éléments qui sont suivis par lots (par exemple, les composants montés sur la carte électronique), des composants que l'on ne suit pas parce qu'ils sont définis par une norme (par exemple, les vis ou les cavaliers sur la carte électronique) et des recettes (par exemple, un enduit protecteur qui utilise une laque en vinyne).

Dans certains systèmes complexes, des sous-ensembles peuvent faire l'objet de démontages et de remontages, ou de rechanges (exemple : la pile de l'horloge de certaines cartes électroniques). Enfin, dans certains métiers, des exemplaires qui avaient été livrés alors qu'ils comportaient un défaut, peuvent faire l'objet de « mises à niveau » qui l'éliminent, mais qui l'associent de fait à une version postérieures du dossier de conception ou du dossier d'industrialisation de la pièce (on peut simplement soumettre la pièce à des tests automatiques complémentaires qui assure qu'elle respecte les tolérances attendues dans le cadre de son usage, par exemple).

Les systèmes PLM et SLM sont souvent amenés à gérer des arborescences spécifiques qui représentent les exemplaires livrés dans leur état actuel. Ces arborescences peuvent servir à appliquer des fonctions, relatives aux tolérances qui réduisent les incertitudes relatives à leur utilisation et à leur fonctionnement. Elles peuvent constituer l'une des matières premières de la création et de la maintenance de certains jumeaux numériques.

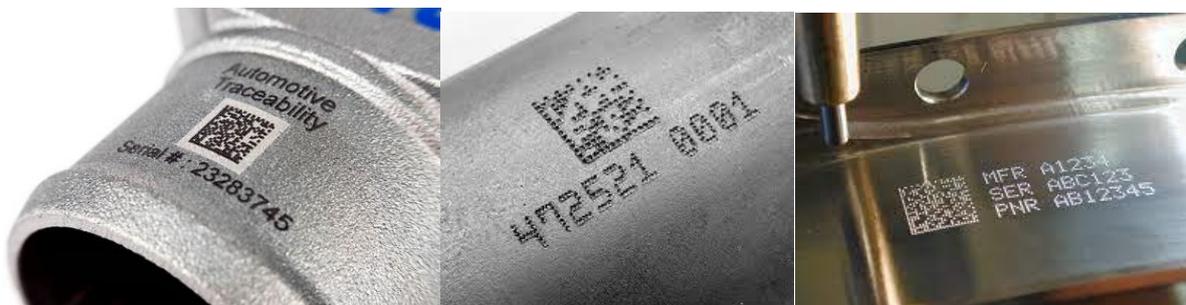


Fig.30 : Exemple de référence produit gravée sur l'objet lui-même

Taxonomie

Dans le secteur industriel, le mot taxonomie (ou taxinomie) est employé pour parler d'une classification donnée, qui porte sur des éléments appartenant à un système. Les taxonomies font souvent ressortir les liens hiérarchiques entre ces éléments.

Méronymie

La méronymie est une relation sémantique entre mots, lorsqu'un terme désigne une partie d'un second terme (Par exemple, armature est un méronyme de béton armé). La relation de méronymie s'inscrit dans le cadre plus global de la relation partie-tout (avec sa relation inverse, l'holonymie).

La relation de méronymie est de nature hiérarchique et exprime les rapports entre une paire de termes, dont l'un représente une partie (le méronyme) et l'autre représente le tout (l'holonyme), auquel cette partie est liée.

3.8 Ingénierie système

Ingénierie système

L'ingénierie système est une méthode de conception de systèmes complexes prenant en compte l'ensemble des « parties prenantes » (équipements, facteurs humains, processus...) et les interactions avec les autres systèmes.

L'ingénierie système (Fig.31) est une démarche méthodologique (processus, méthodes, outils) multidisciplinaire qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, développer, vérifier, valider et faire évoluer un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

Cette méthode s'appuie sur une démarche top-down visant à décomposer un système en sous-systèmes, de façon successive jusqu'à une décomposition ultime organico-fonctionnelle (composants organiques rassemblés en systèmes répondant à une fonction).

Cette méthode est mise en œuvre dans la phase amont du cycle en V, à partir des exigences de besoins qui permet la description du système opérationnel. Cette première étape (espace de la question) doit être exhaustive et vérifiée soigneusement avant d'y répondre par les architectures fonctionnelles et organiques (voir aussi le chapitre 9.4 Recommandations d'architecture logicielle du projet).

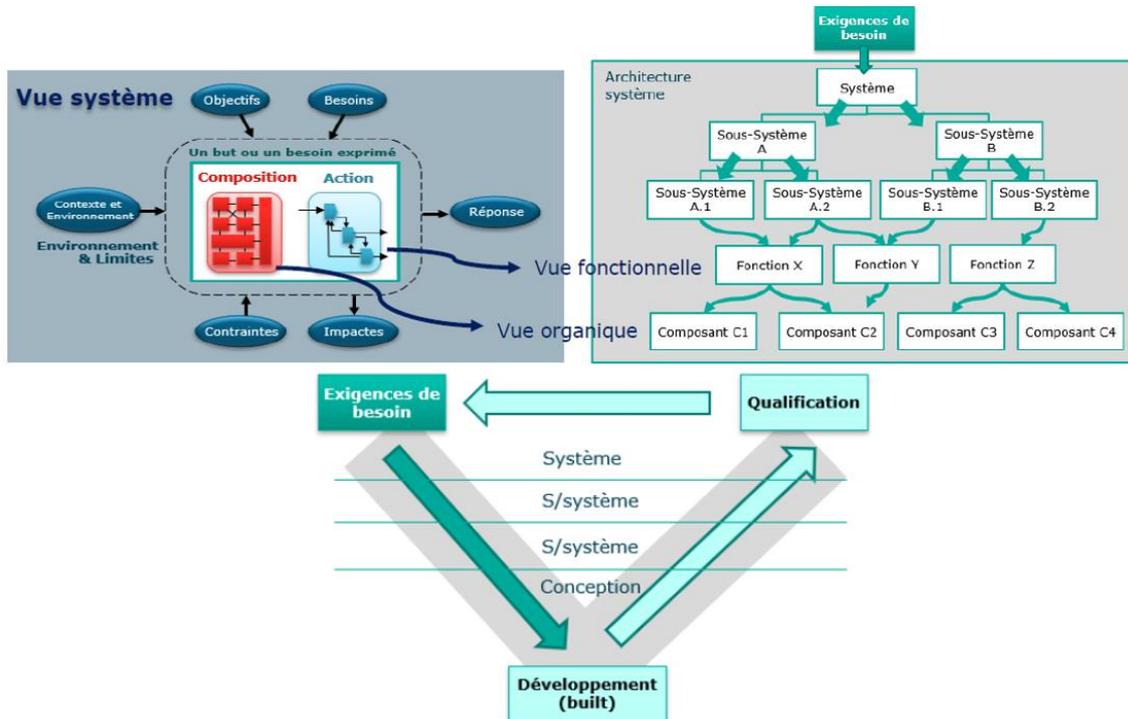


Fig.31 : l'ingénierie système

« Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles » (George Box)

Définition d'un modèle

Un modèle est une représentation limitée de la réalité. Les modèles doivent toujours avoir un objectif :

- Challenger ou démontrer une idée,
- Communiquer ou partager avec d'autres,
- Anticiper la vérification des exigences, concepts, architecture, comportements...

La modélisation d'un système est une représentation graphique de ce dernier. Elle reprend donc les principes d'architectures, mais également des standards de modélisation (venant du logiciel), telle que l'UML, cela afin de simplifier la compréhension du système considéré.

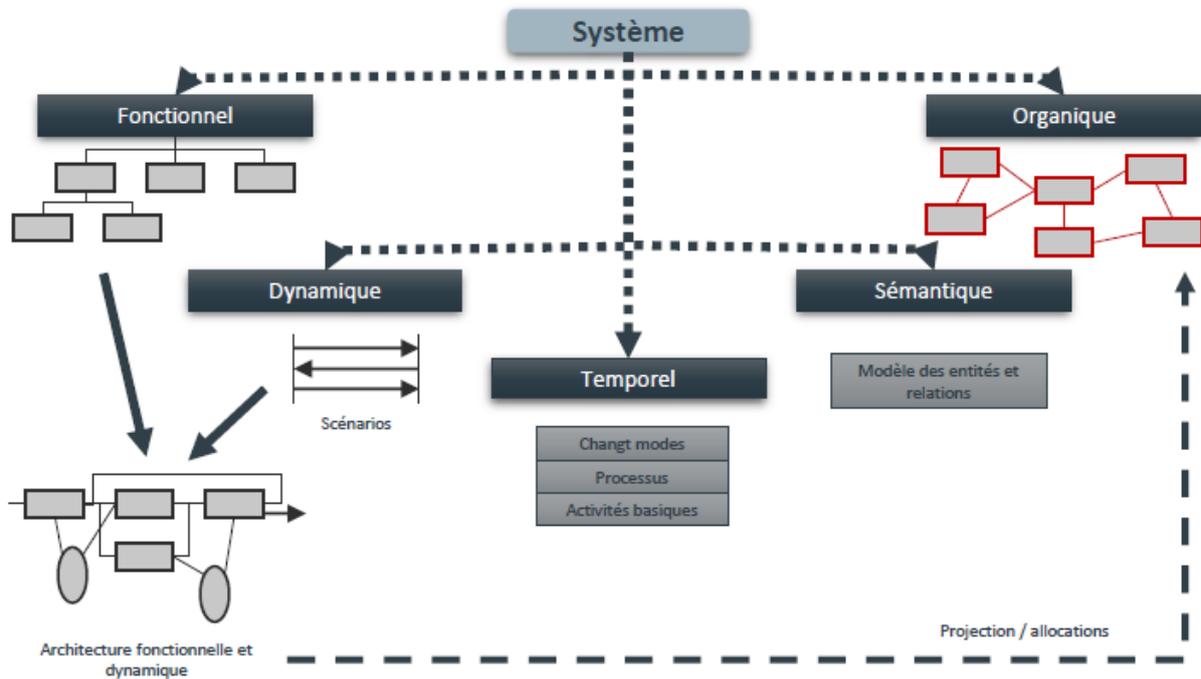


Fig.32 : Représentation graphique d'un système opérationnel

Focus sur la définition des modèles

Un modèle est une représentation simplifiée et observable du comportement ou de la structure d'un système⁸ réel, il est construit avec un certain nombre d'hypothèses bornant son utilisation. La validité du modèle est attestée par une confrontation avec la réalité physique.

Il existe 2 types de modèles :

- Le **modèle prédictif** : on cherche à prédire une situation/un état du système;
- Le **modèle descriptif** : on capitalise la connaissance au sein d'un modèle. Le modèle descriptif caractérise un modèle qui retrace et/ou détaille les modalités de fonctionnement d'un système.

Approche Requirement Centric

C'est l'approche pratiquée depuis les années 60, où l'on considère l'exigence comme référence des informations d'ingénierie système, notamment pour la maîtrise de la configuration (tout autre information est déterminée par rapport à une version d'exigences).

Des exigences (besoins en architecture opérationnelle, exigences fonctionnelles, puis exigences organiques) sont allouées à un système: celles-ci sont déclinées en exigences de plus bas niveau et allouées à leur tour à des sous-systèmes. Ce mécanisme d'allocation/déclinaison est déroulé jusqu'à la définition des composants élémentaires.

Approche Model Centric

C'est une approche qui se développe depuis une dizaine d'années. Sans effacer les exigences, elle n'en fait plus l'élément central, mais une information parmi plusieurs au sein d'un modèle. On parle aussi d'approche MBSE (Model Based System Engineering), incluant des données d'analyse, ou de simulation.

⁸ Un système est un ensemble d'éléments interagissant entre eux selon certains principes ou règles. Le système est déterminé par sa frontière, ses interactions avec son environnement (architecture opérationnelle) et ses fonctions (architecture fonctionnelle) et composants (architecture organique).

Concept du MBSE

Un modèle de description ou de simulation est associé à chaque système ou sous-système. Chaque modèle peut être décomposé en sous-modules correspondant aux sous-systèmes qui le constitue.

Avantages du MBSE

Le **MBSE** (Model-Based Systems Engineering) se traduit comme le concept d'ingénierie dirigées par les modèles, dont l'objectif est de construire des modèles numériques d'un système. Cette approche se base sur la représentation visuelle (modèle) du système à développer, plutôt qu'un document texte. Les modèles sont des actifs d'ingénierie qui permettent de gérer plus efficacement des problèmes classiques d'ingénierie :

- Sélectionner des produits existants répondant à de nouveaux besoins clients,
- Réutiliser sans risque des composants existants dans un nouveau produit,
- Identifier rapidement tous les impacts de l'évolution d'une exigence sur un produit,
- Choisir la meilleure solution au sein d'un ensemble d'options possibles.

Approche système et MBSE adaptés au domaine de la construction

Pour améliorer la précision et l'efficacité de la communication entre les ingénieurs systèmes et les autres parties prenantes, il faut considérer l'utilisation d'un langage de modélisation visuel standard, comme langage commun.

- Modéliser pour gérer la complexité et représenter les problématiques à prendre en compte à chaque niveau.
- Simplifier et extraire les aspects essentiels d'un système, afin d'améliorer la compréhension du système d'intérêt.
- Améliorer la communication : l'utilisation d'un langage commun favorise une compréhension partagée par des ingénieurs de multiples disciplines,
- Réduire les risques : l'exécution des modèles (simulation) augmente la connaissance et permet de réduire les incertitudes et les risques.
- Fournir la traçabilité : la modélisation demeure une documentation de ce qui est conçu.

Dans l'industrie manufacturière, la notion de xLM (Fig.33) est l'agrégation des outils permettant de supporter l'ensemble des domaines d'ingénierie autour du produit. Dans certaines de ces briques logicielles, on retrouve les concepts portés par une démarche BIM du domaine de la construction (Indication « BIM » en rouge sur la Fig.33), dans lesquelles les notions de tolérances **T** et d'incertitudes **I** sont abordées.

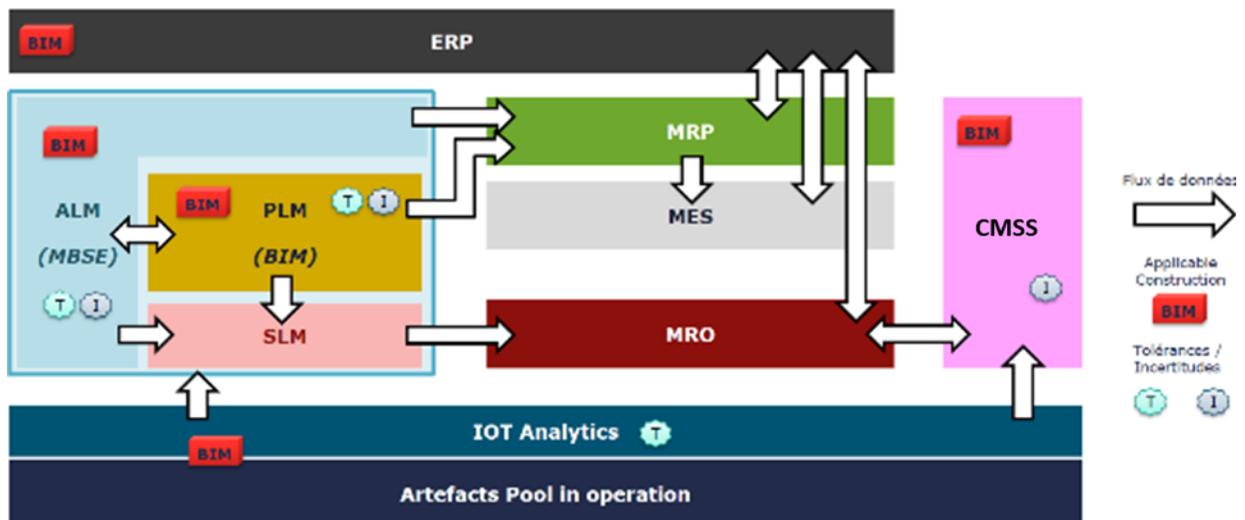


Fig.33 : Cartographie d'un système d'information de l'industrie adapté au secteur de la construction

- **ALM** : Application Lifecycle Management (Ingénierie Système & Logicielle)
 Ce sont des applications dont les objets principaux sont des exigences et des modèles (principalement destinés à réduire le nombre des exigences que les parties concernées doivent gérer dès lors qu'elles peuvent être déduites ou que leur gestion peut être en grande partie automatisées).
Dans une démarche BIM, l'équivalent de l'ALM correspond aux processus, aux outils et aux équipes nécessaires à la gestion du cycle de vie de l'ouvrage à construire et l'ouvrage bâti. On y retrouve donc les modèles représentant les exigences à satisfaire, comprenant les tolérances de réalisation et les incertitudes des données d'entrée.
- **PLM** : Product Lifecycle Management
 Ce sont des applications qui gèrent les représentations statiques des pièces, soit sous la forme de dossiers de conception et d'industrialisation ou d'exemplaires suivis individuellement, soit par lots. Elles gèrent aussi les processus qui permettent de tracer les évolutions des dossiers et des exemplaires.
Dans une démarche BIM, l'équivalent du PLM correspond aux nomenclatures détaillées des objets à assembler sous forme de systèmes fonctionnels. Cette base de données des objets documentés est livrée sous forme d'un DOE numérique, qui alimentera la GMAO de l'ouvrage en exploitation. On y retrouve donc les plages de tolérance à respecter pendant son utilisation.
- **SLM** : Service Lifecycle Management (processus des services autour du produit)
 Ce sont les applications qui permettent de manager les processus de services qui sont fournis, soit en tant que prestations intégrées au produit (par exemple, la maintenance des ascenseurs d'un bâtiment), soit au titre de la garantie associée au produit (par exemple, l'entretien périodique d'un système de ventilation), soit en tant que prestations complémentaires associées au produit (par exemple, la maintenance quotidienne des imprimantes et des copieurs d'une entreprise).
 Ces applications s'appuient ou collaborent avec d'autres applications de l'entreprise.
- **L'ERP** : Enterprise Resources Management (Gestion des Ressources de l'Entreprise).
 Elles supportent les fonctions de gestion financière des projets et de management des coûts de production, de disponibilité des approvisionnements, des stocks de produits achetés ou de produits disponibles pour la vente et la livraison.
Dans une démarche BIM, l'équivalent de l'ERP correspond aux outils de gestions financières du projet, de gestion des approvisionnement des matériaux et équipements à mettre en œuvre ainsi que les matériels nécessaires à la réalisation des travaux.
- Le **MRP** : Material Requirement Planning (Gestion de production)
 Ce sont des applications dont la fonction consiste à optimiser la production en termes de quantité et de délais, en planifiant l'acquisition et la mise à disposition des ressources nécessaires au bon moment et au moindre coût.
- **MES** : Manufacturing Execution System (Pilotage de la chaîne de production)
 Ce sont des applications qui gèrent des processus de nature très variées qui peuvent aller de la mise à jour des programmes utilisés par des machines-outils à commande numérique, le montage et le démontage d'instruments sur des machines de coupe ou des bancs de test, le management des produits en cours de fabrication entre les postes ou les lieux de travail dans l'entreprise.

- **MRO** : Maintenance and Repair Operations (Management des opérations de réparation et de maintenance).
Ce sont les applications qui permettent la définition, l'adaptation aux nouvelles versions des produits ou des configurations livrées des produits, des processus et des procédures applicables lors de leur maintenance ou de leur réparation.
- **CMSS** : Computerized Maintenance Management System (GMAO – Gestion de maintenance assistée par ordinateur).
Ce sont les applications qui permettent de gérer les actifs, de planifier la maintenance, d'appliquer les processus et les procédures définies par le MRO et de suivre les interventions.
Dans une démarche BIM, l'équivalent du CMSS correspond aux outils de gestion des actifs (GMAO), qui permettent de gérer les interventions et de planifier et de budgéter les opérations de maintenance. On y retrouve donc les notions d'incertitude liées aux conditions externes d'exploitation et donc les risques associés.
- **IoT Analytics** (Analyse des données IoT)
Ce sont les applications qui sont chargées de pratiquer des analyses, en utilisant diverses techniques des données fournies par l'IOT, et d'en notifier les conclusions ou les résultats significatifs aux parties intéressées.
Dans une démarche BIM, l'équivalent de l'IoT Analytics correspond aux applications d'analyse des données captées sur le chantier pendant la construction, ou au sein de l'ouvrage pendant son exploitation. On y retrouve donc les notions de plages de tolérances à respecter.
- **Artefact Pool in operation**
Ce sont les dispositifs de recueil de données IoT et les calculateurs périphériques chargés de leur préanalyse.

4. APPORT DU JUMEAU NUMÉRIQUE DANS LA GESTION DES INCERTITUDES ET DES TOLÉRANCES

Remarque

Au sein du projet de recherche MINnD, la notion de Jumeau Numérique a fait l'objet d'un groupe de travail spécifique « GT3.2 Vision partagée du Jumeau numérique » dont le livrable « MINnDs2_GT3.2_vision_partagee_jumeau_numerique_027_2022 » est disponible sur le site www.minnd.fr.

Il est fortement conseillé de lire ce livrable en complément du chapitre qui suit.

4.1 Jumeaux Numériques

Définition normalisée du Jumeau Numérique

La norme ISO/IEC/IEEE DIS 24641 (Mars 2022) - Systems and Software engineering - Methods and tools for model-based systems and software engineering, donne la définition du Digital Twin / Jumeau Numérique :

- En anglais: "Virtual representation that serves as the real-time digital counterpart of a physical object or process".
- Traduction proposée en français : « Représentation virtuelle qui sert de contrepartie numérique en temps réel d'un objet physique ou d'un processus ».

La Nasa introduit le concept de Jumeau physique

Le concept du Jumeau apparaît dans le cadre des missions du programme spatial Apollo de la Nasa menées durant la période 1961-1972. Les véhicules spatiaux étaient alors construits en plusieurs exemplaires. Les doubles, restés au sol, permettaient aux ingénieurs d'intervenir en cas d'événements imprévus lors des missions et de faire des simulations sur les équipements. Lors des problèmes de la mission Apollo 13, les ingénieurs se sont servis du jumeau « physique » de la capsule pour comprendre et simuler une intervention sur les équipements, puis pour expliquer aux astronautes comment procéder. Le jumeau a probablement permis de sauver l'équipage.

La Nasa et le Jumeau Numérique

Depuis, la NASA a remplacé le jumeau « physique » de ses véhicules spatiaux par un Jumeau « Numérique » afin de simuler tous les événements possibles et de mieux répondre aux enjeux de ses missions.

Introduction du concept de Jumeau Numérique

Le concept de Jumeau Numérique (Digital Twin) a initialement été introduit en 2001 par le Dr Michael Grieves, spécialiste du PLM et professeur à l'Université du Michigan. Il s'agissait de créer une représentation numérique d'un objet physique auquel elle serait reliée sur l'ensemble de son cycle de vie, à travers des échanges permanents de données dans les deux sens entre la réalité et le numérique.

Définition du Jumeau Numérique par l'Alliance Industrie du Futur

Le concept a évolué. Selon l'Alliance Industrie du futur, le Jumeau Numérique est un clone virtuel en temps réel d'un système physique ou d'un processus. **Il implique systématiquement l'existence d'un couple « modèle numérique » et l'objet qu'il reproduit.** Les objets concernés peuvent être un produit, une machine, une ligne de production, un processus, une chaîne d'approvisionnement. Suivant le système concerné et l'utilisation souhaitée **le Jumeau Numérique peut être un modèle géométrique, multiphysique, fonctionnel, comportemental.** Il doit **évoluer dans le temps comme son « jumeau réel »**. Le cabinet Gartner définit le jumeau numérique comme « une représentation numérique d'un objet physique. Cela inclut le modèle de l'objet physique, les données de l'objet, une correspondance unique avec l'objet et la possibilité de surveiller l'objet. »

Un Jumeau Numérique à différentes échelles

Le Jumeau Numérique n'est pas obligatoirement représenté par un modèle en 3 dimensions. C'est un moyen de simuler tout ou partie d'un système complexe, un produit, un processus ou un ouvrage. Son échelle de précision peut également varier en fonction des cas d'usage qui en seront attendus et de sa fiabilité.

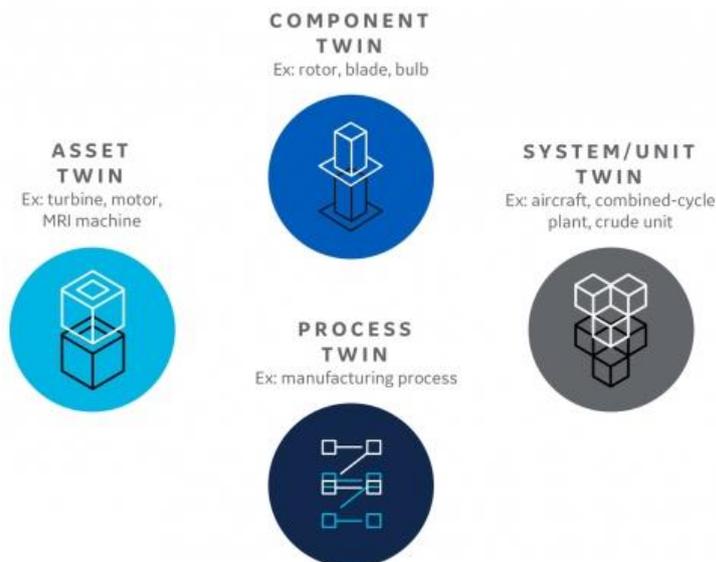


Fig.34 : Exemples de jumeaux utilisés dans l'industrie

La notion de continuité numérique

La continuité numérique est un concept qui est intégré au cycle de vie de l'information. Elle est définie dans le cadre d'un usage de bout-en-bout des informations autour d'un produit, d'un ouvrage, d'un processus ou d'un système. La continuité numérique encapsule la gestion de tous les flux d'informations de ses composants qu'ils soient physiques ou numériques.

Le Jumeau Numérique comme moyen d'expression de la continuité numérique

Le Jumeau Numérique se base sur la collecte et l'agrégation d'un flux de données descendant et remontant entre les systèmes d'information du bureau d'études, les capteurs et actionneurs des sites de production ou encore des produits réels connectés en fonctionnement. Pour que le Jumeau Numérique soit complet, il faut que ce flux d'information réponde aux exigences suivantes :

- Automatisation de l'échange d'information.
- Interopérabilité des systèmes d'information.
- Sécurisation des échanges d'information.
- Contrôle des flux de bout en bout.

Cette industrialisation des flux définit la continuité numérique. Cette dernière est une condition nécessaire au développement d'un jumeau numérique sur un produit, un processus ou un ouvrage.

Le Jumeau Numérique et la technologie

Bien que la continuité numérique soit une condition nécessaire, elle n'est pas suffisante. En effet, il faut aussi adapter les systèmes d'information pour accueillir le Jumeau Numérique et se doter des bonnes technologies en adéquation avec l'usage que l'on souhaite faire du Jumeau Numérique :

- Visualisation 3D.
- Environnement immersif (réalité virtuelle).
- Superposition d'information sur le produit ou l'ouvrage physique (réalité augmentée).

- Moyens de simulation avancée sur la base des données numériques du produit ou de l'ouvrage.
- Environnement de collaboration virtuel.
- Cockpit et tableau de bord d'informations agrégés autour du produit ou de l'ouvrage.
- Traitement des informations du jumeau (deep learning, intelligence artificielle...).

En pratique chaque exigence ne nécessite pas forcément l'outillage d'un Jumeau Numérique à tous les niveaux. Par exemple, pour faire une revue de conception collaborative en réalité virtuelle, le flux de données doit être principalement automatisée dans le sens descendant, depuis les outils de modélisation amont jusqu'aux outils de virtualisation. Dans ce cas, la continuité numérique n'est que partielle, comme donc le Jumeau Numérique. En revanche d'autres situations nécessitent d'assurer le flux numérique en sens inverse pour remonter des données vers le bureau d'étude (cas de la simulation de conception et des séquences de validation de conception par exemple).

Sur la figure Fig.35 ci-dessous nous pouvons observer les différents stades de complétude du Jumeau Numérique.

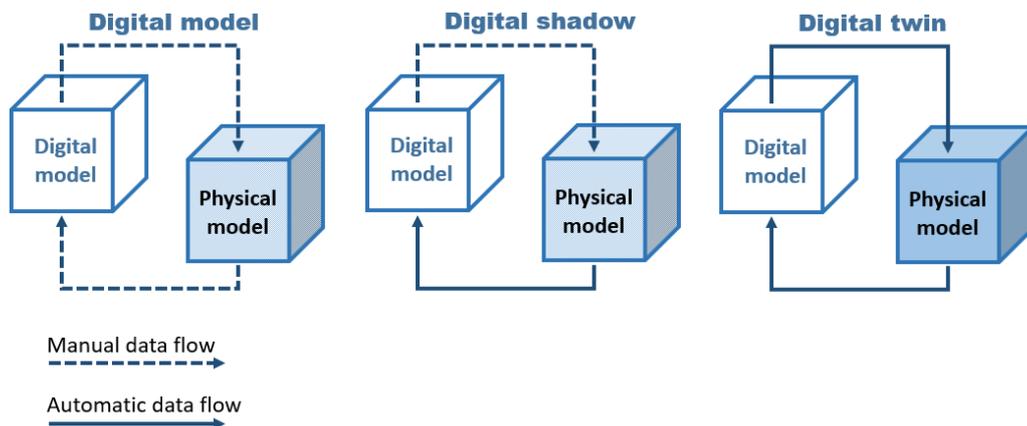


Fig.35 : Les différents stades de complétude du Jumeau Numérique⁹

4.2 Les stades du Jumeau Numérique

Les stades du jumeau numérique

Dans l'industrie, trois modèles ont été identifiés (Fig.35) :

- Digital Model.
- Digital Shadow.
- Digital Twin.

Digital Model

Un « **Modèle Numérique / Digital Model** » est décrit comme une version numérique d'un objet réel préexistant ou prévu, pour reproduire correctement la réalité. Il n'y a pas d'échange automatique de données entre le modèle physique et le modèle numérique.

⁹ Werner Kritzing et al., « Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification », IFAC-PapersOnLine 51, no 11 (2018): 1016-22

<p>Digital Shadow</p>	<p>Des exemples de Modèles Numériques pourraient être, sans s'y limiter, des schémas ou des plans pour les bâtiments, la conception de produits et la description du processus de réalisation.</p> <p>L'élément déterminant est qu'il n'existe aucune forme d'échange automatique de données entre le système physique et le modèle numérique. Cela signifie qu'une fois le Modèle Numérique créé, un changement apporté à l'objet physique n'a aucune incidence sur le modèle de façon automatique. Une mise à niveau manuelle (asynchrone) sera nécessaire par un opérateur humain.</p> <p>Un « Fantôme Numérique ou Ombre Numérique¹⁰ / Digital Shadow » est une représentation numérique d'un objet qui a un flux unidirectionnel entre l'objet physique et l'objet numérique.</p> <p>Un changement dans l'état de l'objet physique entraîne un changement dans l'objet numérique. À l'inverse, un changement dans l'objet numérique n'est pas reproduit automatiquement vers l'objet physique.</p>
<p>Digital Twin</p>	<p>Si les données circulent entre un objet physique existant et un objet numérique, et qu'elles sont entièrement intégrées dans les deux sens, cela constitue la référence du « Jumeau Numérique / Digital Twin ».</p> <p>Une modification apportée à l'objet physique entraîne automatiquement une modification de l'objet numérique et vice versa.</p> <p>Ainsi, un écart constaté sur l'objet physique sera répercuté sur l'objet numérique. C'est ce qui confortera le diagnostic et donc le pronostic d'évolution en tenant compte de la maintenance à réaliser. S'il n'y a pas convergence, c'est un indicateur d'alerte pour le concepteur ou le gestionnaire du produit physique.</p> <p>L'utilisation d'un Jumeau Numérique nécessite une grande vigilance quant à la fiabilité de l'intelligence de contrôle. Un opérateur humain doit être capable à tous moments de découpler le système et de désautomatiser la boucle.</p>

Informations statiques et dynamiques

- **Les données non dynamiques ou statiques** sont considérées comme permanentes ou persistantes, c'est-à-dire des données auxquelles il est rarement accédé et qui ne risquent pas d'être modifiées. Le Digital Model s'appuie principalement sur ce type de données.
- **Les données dynamiques** diffèrent également des données en continu, qui constituent un flux constant d'informations. Les données dynamiques peuvent être mises à jour à tout moment, avec des périodes d'inactivité intermédiaires. Le Digital Twin s'appuie principalement sur ce type de données.

Deux manières de percevoir la continuité numérique

- Le niveau de mise en œuvre du flux numérique entre l'objet numérique et l'objet physique conditionne le niveau de représentativité du jumeau numérique.
- Globalement, il y a deux manières de percevoir la continuité numérique et donc une boucle rétro-actionnelle de l'information (voir Fig.36).
- **Continuité numérique « descendante »** : Il s'agit du flux prenant naissance dès les premières phases d'un projet, depuis la source numérique d'information à partir des systèmes d'information comme le PLM ou le BIM. Ce flux d'information

¹⁰ Traduction littérale

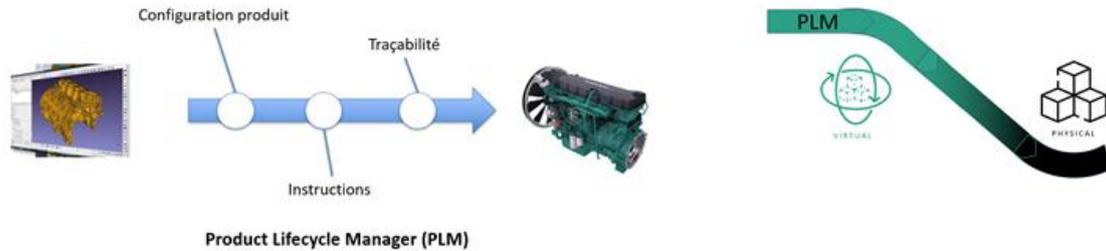
constitue avant tout le modèle numérique du « Jumeau », avant même que ce dernier ne trouve une existence physique. Ultérieurement, une automatisation du flux de données vers le modèle physique est établie permettant de lier les deux jumeaux et les enrichir mutuellement avec les données réelles captées. Généralement à ce stade de coexistence, les deux s'enrichissent étape par étape et se développent mutuellement au même rythme (c'est le principe-même des jumeaux). Ce flux est appelé « descendant » car l'information première réside sur le volet conceptuel théorique avant de « descendre » s'accoster avec le Jumeau physique naissant. C'est la voie « classique » de génération d'un nouveau produit ou projet.

- **Continuité numérique « ascendante »** : Ce second flux consiste à partir de la réalité livrée ou telle qu'opérée de « remonter » les informations de fonctionnement réel vers la génération d'un jumeau « numérique ». Dans ce cas-là, le jumeau sera produit à l'image des informations récoltées sur le terrain, par la collecte de données par des capteurs, par des scans selon la structuration des données dans la version numérique... L'industrialisation du flux de données vers le système d'information permettra de suivre l'évolution de l'ouvrage et d'ainsi pouvoir l'analyser et le superviser en conséquence. Là encore, une fois la coexistence des deux modèles assurée, ils s'enrichissent étape par étape et se développent mutuellement autour des cas d'usage. Ce flux est principalement observé lors de projet de rétroconception d'infrastructures ou de produit dont la source numérique d'information est peu ou pas existante.

La combinaison de ces deux flux de continuité numérique alimente le même objectif : fiabiliser et optimiser les opérations réelles en accouplant au plus juste le Jumeau Numérique à la réalité. Cela garantit leur enrichissement mutuel et leur évolution conjointe, tout en permettant de soutenir les cas d'usage (voir ci-dessous la section « Usages du Jumeau Numérique »).

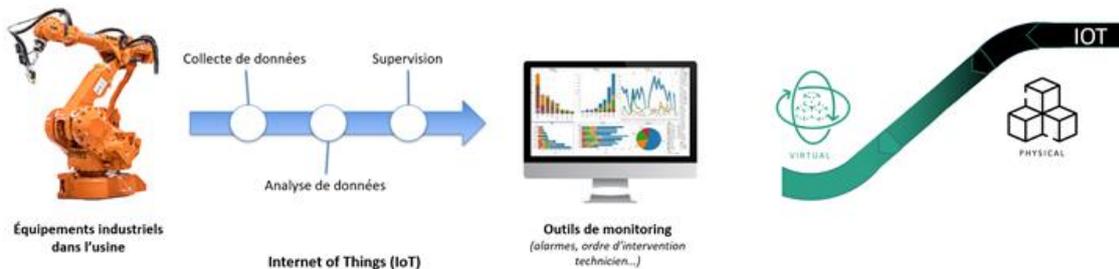
Continuité numérique descendante

Du Virtuel au Physique



Continuité numérique ascendante

Du Physique au Virtuel



Boucle de continuité numérique

Jumeau Numérique

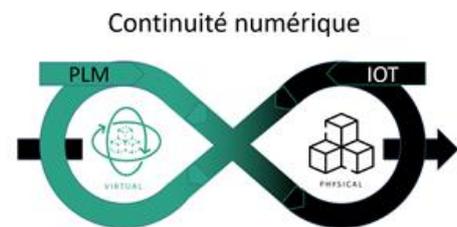


Fig.36 : Le Jumeau Numérique sous forme d'une boucle de continuité numérique (source INETUM)

Éléments technologiques clefs

Pour assurer la continuité d'information entre le Jumeau Numérique et son Jumeau Physique et ainsi assurer une représentativité la plus fidèle possible (notamment pour permettre une analyse prédictive de l'état du système physique), des éléments technologiques clefs sont à mettre en œuvre, comme mis en lumière par l'Alliance Industrie du Futur :

- Un échange de données entre les deux Jumeaux : capacité à générer des données pertinentes, fiables et au bon niveau de précision via la mise en place de capteurs distribués, d'une capacité de collecte, d'acheminement et de stockage sécurisé des données,
- Une stratégie de construction du Jumeau Numérique permettant d'incrémenter et d'enrichir les modèles physiques par les données de façon continue et/ou hors ligne, et/ou de construire des Jumeaux Numériques uniquement à partir des données.
- Une capacité du Jumeau Numérique à intervenir sur le Jumeau Physique pour du contrôle ou de la correction automatique.

Le Jumeau Numérique pour minimiser les incertitudes

- Un recalage du Jumeau Numérique à partir des données transmises par le jumeau physique : Une capacité logicielle et hardware pour l'apprentissage du Jumeau Numérique.
- Une capacité à calculer un état prédictif dans des temps courts compatibles avec la prise de décisions opérationnelles.

Comme présenté dans le chapitre 3.1 du précédent livrable du groupe de travail « Tolérance et Incertitudes »¹¹, des incertitudes et tolérances sont présentes à chaque étape du projet, et apparaissent notamment lors du partage d'information entre les acteurs d'un projet ou d'un ouvrage et sur des échelles de temps étendues. Cette transmission de l'information, d'autant plus lorsqu'elle est réalisée manuellement, est sujette à des erreurs et approximation, voire des partages incomplets.

Le jumeau numérique et plus largement la mise en œuvre d'une continuité numérique autour du produit et tout au long du projet peut permettre de minimiser ces incertitudes. En effet, une automatisation du processus d'échange de l'information réduit considérablement le risque d'erreurs humaines ou d'imprécisions. La continuité numérique offre également un contrôle total et transparent des données échangées, puisque ces dernières transitent via un canal centralisé et sécurisé.

Le Jumeau Numérique, outil d'analyse des tolérances

L'analyse du respect des tolérances et de ségrégation dans la conception (ou la vérification de mise en œuvre) d'infrastructure, de produit industriels ou d'ouvrage se fait notamment au travers de processus outillés de revue, comme l'analyse d'interférences (ou clash). Ces interférences sont provoquées par des limites de tolérances non respectées, dues à des incertitudes trop élevées ou des collisions entre objets. La visualisation et le recensement de ces interférences sont essentielles pour garantir le niveau de qualité attendu et réduire les risques et incertitudes de l'ouvrage en exploitation.

Le Jumeau Numérique peut apporter une solution supplémentaire voire alternative à un simple tableau ou à un rapport détaillant les anomalies et collisions détectées. Un apport visuel est plus facile à appréhender, donne une meilleure vision globale de la collision remise dans son contexte. La prise de décision sera alors plus fine et pertinente, tout en permettant la simulation de pistes de corrections.

4.3 Usages du Jumeau Numérique

Usages du Jumeau Numérique

Les usages des Jumeaux Numériques sont aujourd'hui nombreux et largement diffusés dans l'industrie notamment. Un objet physique peut être représenté par plusieurs extraits d'un même jumeau numérique, déclinés en fonction des usages que l'on veut en faire.

Les usages s'étendent sur de nombreux cas d'application tout au long du cycle de vie du produit ou de l'ouvrage :

- Conception, collaboration et simulation.
- Construction.
- Exploitation et Assistance.
- Maintenance.
- Entraînement, Formation.

La Fig.37 ci-dessous donne la vision de Naval Group des usages identifiés du Jumeau Numérique.

¹¹ MINNDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022 (sur le site www.minnd.fr)

APPORTS DU JUMENTU NUMÉRIQUE

Conception	Exploitation	Maintenance	Entraînement
Aides à la conception et à l'amélioration de la productivité	Amélioration des capacités opérationnelles	Optimisation des services de maintenance	Amélioration des moyens d'entraînement
<ul style="list-style-type: none"> Optimisation et justification d'architecture Capitalisation de modèles d'architecture Valorisation et aboutissement de la démarche MBSE Réduction des tests et des prototypes physiques 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation des capacités opérationnelles Safety assessment : aide à l'exploitation en régime dégradé. Aide à la cyber-défense du Navire Amélioration de la Maîtrise des Capacités Opérationnelles (MACOPS) Aide à la conduite du Navire 	<ul style="list-style-type: none"> Base de développement de la maintenance prédictive Adaptation du MCO en fonction de l'utilisation du Navire. Préparation et dérisquage des opérations de maintenance Validation des évolutions de configuration 	<ul style="list-style-type: none"> Entraînement à Terre particularisé en fonction du Navire Entraînement à bord prenant en compte l'état courant du Navire Préparation des équipages aux futures évolutions

Le Jumeau Numérique au service de la performance opérationnelle

NON SENSIBLE

© Propriété Naval Group SA 2019
Tous droits réservés.

23/01/2010

15

Fig.37 : Les usages du jumeau numérique selon Naval Group

Application à l'industrie 4.0

Dans le domaine industriel, les applications du Jumeau Numérique sont bien ancrées. On peut notamment illustrer ce constat par les exemples suivants :

- Maintenance prédictive et dimensionnement des postes de travail.
- Amélioration de la qualité : détection de déviations, réduction de la variabilité, analyse approfondie des données historiques après un évènement.
- Amélioration du rendement du produit, de l'usine ou de l'ouvrage.
- Diminution du temps de développement de nouveaux produits/processus.
- Traçabilité accrue des objets/processus (décisions, informations sur les composants, les fournisseurs, la production, la gestion de la planification – qu'elle soit assistée de manière asynchrone ou automatisée au travers d'évènements déclencheurs...).

4.4 Jumeau Numérique dans le domaine de la construction

Usages du JN dans le domaine de la construction

Jumeau Numérique en phase d'exploitation / maintenance

Dans le domaine de la construction, la notion de Jumeau Numérique est récente. De nombreuses réflexions émergent, avec des concepts ou visions parfois différents.

On constate que les Jumeaux Numériques ont principalement un ou des **usages en phase d'exploitation/maintenance**, mais rarement en phase de conception ou de construction. En effet, ils remplissent pleinement leurs rôles lorsque des données sont échangées entre l'objet réel et son modèle numérique, c'est-à-dire lorsque l'objet existe physiquement. On fait donc bien référence à la notion de « Jumeau ».

Pour accélérer leur usage, il est essentiel de mettre à disposition au plus tôt des modèles numériques réalisés en phase de conception et de construction, qui serviront de base aux futurs Jumeaux Numériques.

Pour la phase d'exploitation/maintenance, le principe serait de **personnaliser un modèle générique en rajoutant des données spécifiques au contexte de l'ouvrage** (localisation, réglementation en vigueur, géologie...). Les usages identifiés sont les suivants :

- Simuler des situations liées à des phénomènes exceptionnels (météorologiques et climatiques, géopolitiques...).
- Optimiser la performance de l'ouvrage bâti en exploitation, par action sur des équipements et des systèmes, afin de répondre aux exigences de confort des usagers, des interventions des techniciens...
- Analyser des alternatives multicritères, par mise en relation de données issues de systèmes indépendants, mais dont la combinaison permet d'améliorer la performance du système global.
- Alerter sur les dépassements de seuils paramétrés.
- Adapter l'ouvrage aux nouvelles exigences des donneurs d'ordre, mais aussi aux nouveaux besoins des usagers ou des techniciens de maintenance.
- Suivre les pathologies et anticiper les désordres, par analyses sur des longues périodes des zones de vigilance.
- Prédire les opérations de maintenance, par mise au point de modèles prédictifs basés sur des données captées sur de longues périodes ou sur des systèmes similaires.
- Apporter des nouveaux services aux usagers (en relation avec l'évolution des technologies).
- Enrichir les modèles de données, afin de bâtir de nouveaux scénarios d'analyses et de prédictions.

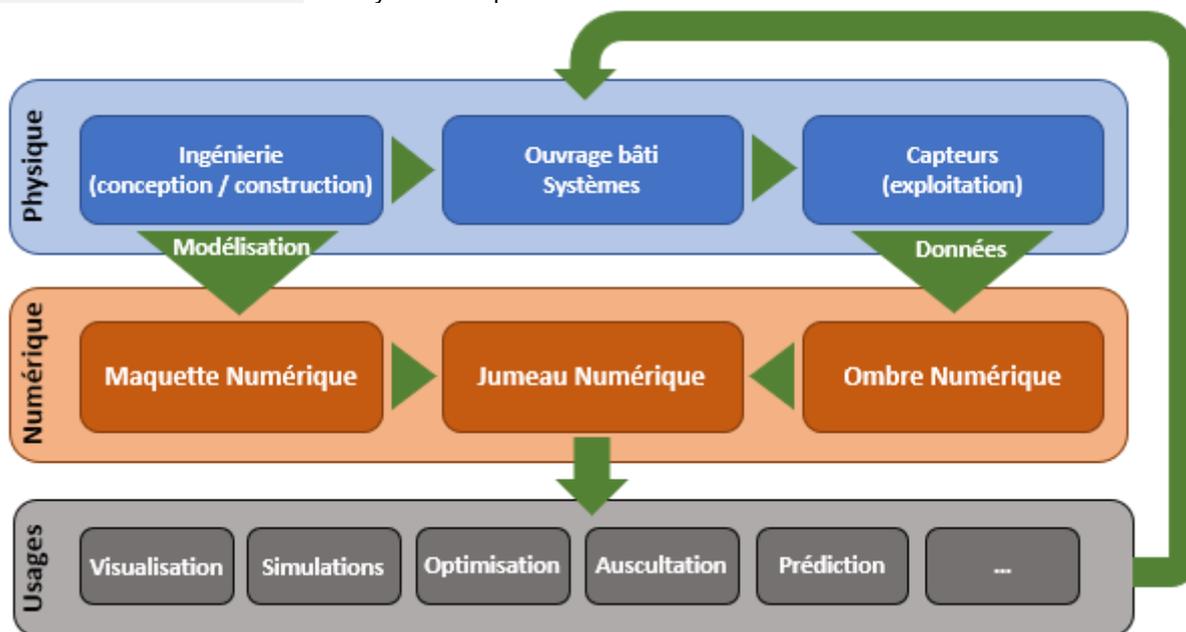


Fig.38 : Jumeau Numérique de la construction

Jumeau Numérique en phase de construction

Malgré tout, des usages du Jumeau Numérique sont déjà envisagés et expérimentés en phase de construction, pour **instrumenter le chantier et prendre des décisions en fonction d'analyses des données captées en temps réel pendant l'exécution des travaux.**

Les usages identifiés sont les suivants :

- Contrôler / Adapter l'exécution des travaux et des processus :
 - méthodes et modes opératoires (adaptation en fonction de l'avancement du chantier soumis aux aléas) ;
 - logistique (localisation des engins et des matériels, inventaires, anticipation de la maintenance...) ;
 - coactivité (identification des zones de montage, de manœuvre, de manutention, et des tâches planifiées afin d'anticiper les conflits d'activité).
- Suivre les indicateurs d'avancement du chantier (reconnaissance automatique des objets en cours de réalisation ou réalisés, afin d'élaborer des tableaux de bord d'avancement et de planification...).
- Assurer la sécurité et l'efficacité des compagnons, mais aussi faciliter l'accès au poste de travail (le plan d'installation de chantier est un système vivant, dont la topologie évolue quotidiennement en fonction de l'avancement des travaux).
- Aider à la décision, en visualisant la complexité d'un chantier et ses zones de vigilance, son avancement instantané et la comparaison avec sa planification ;
- Alimenter le DOE au fil de l'eau, avec la temporalité des objets bâtis et des matériaux utilisés...
- Suivre le bilan carbone de la construction, au-delà du décompte des énergies consommées et des matériaux mis en œuvre, par le recensement des matériels utilisés par ouvrage, des manutentions, des adaptations sur site...

Recommandations

Comme cela sera détaillé au chapitre 0 «

Gestion des tolérances et LOIN

La gestion des tolérances relatives à une valeur est as et au niveau de tolérances accepté. En phase amont quises seront généralement plus élevées qu'en phase

- un nuage de points pour réaliser des études de ne pas être aussi dense ou précis qu'en phase de
- une campagne de sondages géologiques sera a| minaire, et sera complétée avant le démarrage d

Cette approche peut être comparée à celle des LOIN : il s'é rance sur une valeur aux besoins de qualité exprimés par rance associée à une valeur doit être nécessaire et suffisante

De plus, la tolérance de fabrication d'un objet ou d'i directe sur le coût de fabrication de ce produit. Le coût en deux parties (Fig.66) :

- Le coût de fabrication pour les produits acceptés
- Le coût résiduel déterminé par les pièces rejetées:

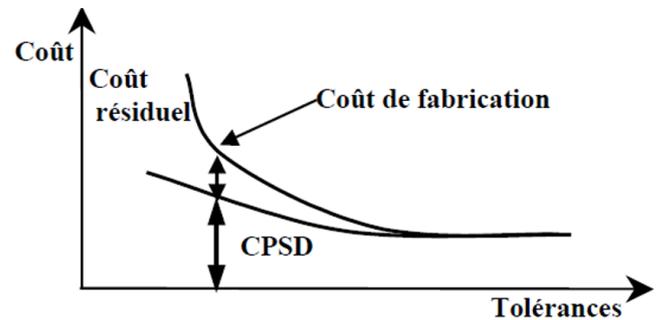


Fig.66 : Coût de fabrication en fonction des tolérances (D.Lepadatu [10])

», les données des jumeaux numériques doivent respecter un certain nombre de critères, afin de ne capter et de n'utiliser que la donnée juste suffisante pour l'usage attendu. Cette donnée doit donc respecter quelques critères :

- Unicité (pas de redondance pour utiliser une source unique de données).
- Fiabilité / Intégrité (justesse et responsabilité).
- Localisée (dans un repère approprié, qu'il soit local, géodésique ou kilométrique).
- Structurée (selon une classification adaptée, par système ou par espace).

Jumeau Hybride

De nouveaux travaux de recherche viennent compléter la notion de Jumeau Numérique avec la notion de Jumeau Hybride, développée en Annexe B – Jumeaux Hybrides. Selon ces travaux, le Jumeau Numérique, basé uniquement sur des modèles numériques, ne remplacera pas les modèles basés sur les équations de la physique.

5. MODES DE REPRÉSENTATION DES INCERTITUDES

5.1 Rappels des enjeux

<p>Rappels de définitions</p> <p>But du calcul d'incertitude</p> <p>Relevé d'une incertitude</p> <p>Différence entre erreur et incertitude</p>	<p>Dans le précédent livrable « Incertitudes et Tolérances : Enjeux et Définitions »¹², tous les termes associés à la notion d'incertitude et des risques associés ont été définis. En voici quelques rappels.</p> <p>Toute mesure est entachée d'erreur. Il est impossible d'effectuer des mesures rigoureusement exactes. C'est le but du calcul d'erreur ou calcul d'incertitude. L'erreur absolue d'une grandeur mesurée est l'écart entre le résultat et la «vraie» valeur.</p> <p>Estimer l'incertitude d'une mesure, c'est :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Connaître et utiliser le vocabulaire lié aux erreurs de mesure. • Choisir un matériel scientifique en relation avec une précision attendue. • Réaliser une étude statistique et calculer un écart-type, un intervalle de confiance. • Présenter un résultat de mesure : notations, chiffres... <p>On se trompe carrément dans une erreur, et l'incertitude montre notre hésitation devant plusieurs certitudes. Une erreur est un résultat d'une action passée, alors qu'une incertitude est une estimation d'erreur à éviter.</p>
<p>Incertitudes d'un projet de construction</p> <p>Prise décisions</p>	<p>Dans le contexte de la construction d'une infrastructure, de nombreuses incertitudes apparaissent tout au long de son développement. Ces incertitudes sont liées à de nombreux facteurs et ont été décrites dans le précédent livrable du groupe de travail.</p> <p>La connaissance et l'évaluation des incertitudes et des risques associés sont des éléments fondamentaux qui autorisent la prise de décisions. Quel que soit son niveau de responsabilité, chaque acteur d'un projet doit évaluer les risques de ses décisions et de ses actes en évaluant les incertitudes sur les données qu'il possède en les replaçant dans leur contexte réel et leur temporalité.</p>
<p>Management des risques</p> <p>Plan de management des risques</p>	<p>On trouvera également dans le livrable précédent les définitions du risque et la liste des normes qui le régissent.</p> <p>Une incertitude se qualifie comme risque si l'événement potentiel (porteur d'incertitude) est identifiable avec une probabilité d'occurrence, et que l'impact en soit évaluable (qualitativement ou quantitativement). La mesure de ce risque se nomme « criticité » ou « niveau de risque ».</p> <p>Le 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.</p> <p>Dans notre étude, nous considérerons que l'incertitude du sous-sol est un risque majeur de tout projet d'infrastructure, et en particulier de tout projet d'ouvrage sous-terrain.</p>

¹² MINNdS2_GT2.2_incertainces_tolérances_enjeux_definitions_024_2022_Jul22 (sur le site www.minnd.fr)

Exemples de représentation

Afin d'illustrer nos propos, quelques exemples représentatifs des notions d'incertitudes du domaine des infrastructures ont été sélectionnés et détaillés dans les chapitres qui suivent :

- Plan de corps de rue simplifié (5.2), traitant de la représentation des réseaux enterrés situés en zone urbaine ;
- Relevés physiques des données du sous-sol (5.3), traitant des méthodes d'acquisition des données géologiques et géotechniques les plus couramment pratiquées ;
- Relevés numériques et traitement des données (5.4), traitant des méthodes de relevés numériques (acquisition des données) puis des méthodes d'analyse des données après leur traitement.

Ces exemples sont accompagnés d'un chapitre sur la représentation graphique de des incertitudes associées (5.5) et d'un chapitre concernant leur gestion (5.6).

5.2 Plan du corps de rue simplifié

Le PCRS

La réforme anti-endommagement des réseaux a eu pour conséquence d'initier en 2014-2015 une réflexion concernant la définition d'un Plan de Corps de Rue Simplifié (PCRS), c'est-à-dire un fond de plan unique à très grande échelle. Cette réflexion a été menée par le Conseil National de l'Information Géographique (CNIG)¹³.

Le Plan du Corps de Rue Simplifié constitue le socle commun topographique minimal de base décrivant à très grande échelle les limites apparentes de la voirie. Limité aux objets les plus utiles et en n'abordant aucune des logiques « métiers » par ailleurs traitées chez les gestionnaires ou exploitants de réseau, le PCRS est destiné à servir de support topographique à un grand nombre d'applications requérant une précision d'ordre centimétrique.

Les plans de réseaux doivent être géoréférencés

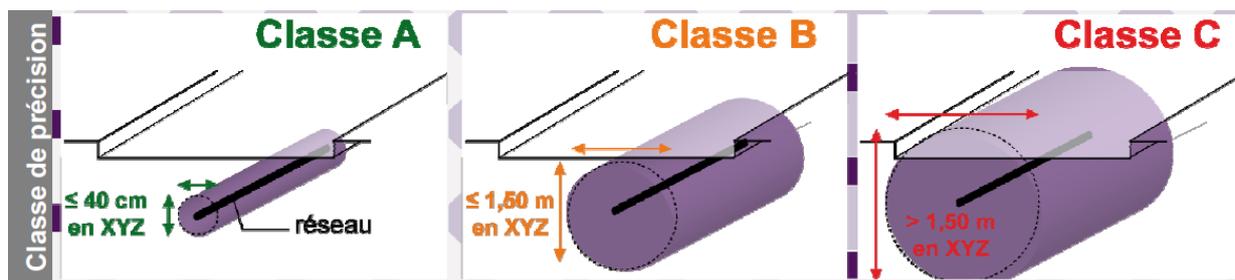
Au 1er janvier 2019, les plans des réseaux sensibles enterrés, situés en unités urbaines, fournis par leurs exploitants en réponse aux DT et DICT devront comporter *a minima* 3 points géoréférencés, dans le système national de référence de coordonnées, en classe A. En 2026, ces exigences seront applicables à ces mêmes réseaux sur l'ensemble du territoire national.

Localisation des réseaux et classes de précision

Parallèlement à la mise en place de fond de plan au 1/200^e, la loi impose à tous les exploitants d'améliorer le géoréférencement de leurs réseaux enterrés :

- Les réseaux sensibles à la sécurité doivent être localisés avec une classe de précision A (incertitude maximale de localisation $\leq 40\text{cm}$ pour des ouvrages rigides et 50cm pour des ouvrages flexibles, soit un levé terrain à 10 cm).
- Les réseaux sensibles en classe B ou C doivent faire l'objet d'investigations complémentaires pour être en classe A (à la charge du maître d'ouvrage et/ou du gestionnaire de réseaux). Tout réseau neuf doit être localisé en classe A.
- Les réseaux non sensibles à la sécurité doivent être localisés avec une classe de précision B (incertitude maximale de localisation $\leq 1,5\text{m}$, soit un réseau positionné géographiquement à 40cm).

¹³ http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2015/06/CNIG_PCRS_v1.0.pdf

Fig.39 : Les classes de précision des réseaux enterrés¹⁴

5.3 Relevés physiques des données du sous-sol

Remarque

Au sein du projet de recherche MINnD, les relevés des données d'entrée ont fait l'objet d'un groupe de travail spécifique « GT5 Rétro-ingénierie » dont le livrable « MINnDs2_GT5_donnees_entree_attentes_volumetrie_030_2023 » est disponible sur le site www.minnd.fr.

Il est fortement conseillé de lire ce livrable, et en particulier le chapitre 4, en complément du chapitre qui suit.

Sondages et forages

Lors de la réalisation de sondages ou de forages, il est essentiel de définir quelles sont les données à recueillir. Si ce sont les données géologiques qui importent, il faut savoir qu'un sondage destructif fournira des données partielles et incomplètes, alors qu'un sondage carotté fournira des données précises sur tout ou partie du sondage qui sera carotté (voir Fig.40). Toutefois, l'analyse des données géologiques est souvent fonction de la personne en charge de la description et de l'interprétation, ce qui peut entraîner des incertitudes du fait de la difficulté, par exemple, de différencier une argile marneuse et d'une marne argileuse.

¹⁴ http://www.cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2016/04/20160315_PCRS_Sensibilisation_v8.pdf

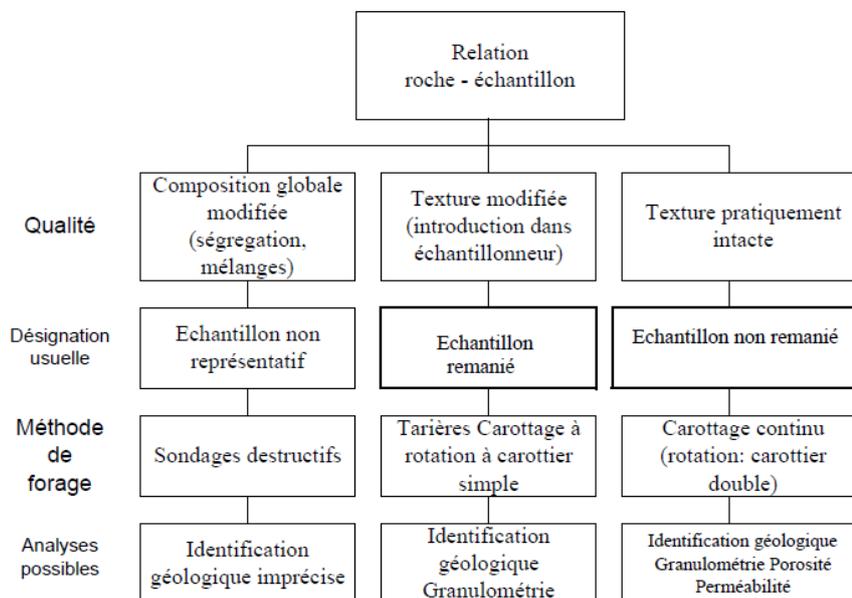


Fig.40 : Relation entre méthode de forage et type d'analyses possibles

Capteurs et instruments de mesure

Le degré de précision dépend des instruments de mesure utilisés. Il est généralement spécifié par les fournisseurs de matériel.

Données géologiques

Les données dites géologiques sont des données concernant les sols et roches rencontrés, et nécessitent généralement un examen visuel des prélèvements d'échantillons. De ce fait, ces données sont dépendantes de l'interpréteur.

Données géotechniques

L'AGS (Association of Geotechnical and Geo-environmental Specialist) a développé les fichiers ASCII (ou format AGS) afin de normaliser le format de rendu des données géotechniques – géologiques – géoenvironnementales. Toutefois, ce format concerne le type d'information à renseigner mais ne précise en aucun cas les normes concernant la précision des données à produire.

Méthodes d'acquisition des données du sous- sol

L'objet de ce paragraphe est de répertorier les principales incertitudes associées aux méthodes d'acquisition des données géologiques et géotechniques les plus couramment pratiquées.

On rappelle ici, la différence entre :

- **Géologie** : études des constituants de la terre.
- **Géotechnique** : études des propriétés des sols et des roches en fonction des projets d'ouvrage d'art en particulier quant au comportement des sols et roches. La géotechnique s'intéresse à l'étude des propriétés physiques des sols et des roches dans le cadre de projets de génie civil.

L'acquisition des données géologiques et géotechniques peuvent se faire :

- in-situ,
- en laboratoire,
- par le biais d'observation de terrain, de mesure physiques ou numériques.

Méthodes de forages

Rappelons que :

- Les sondages ont pour but d'acquérir des données.

- Les forages ont pour objectif principal l'extraction d'une ressource (eau, pétrole...), l'acquisition de données est également possible au cours de sa réalisation.

Notons le lien entre le choix de la **méthode de forage** et le type de données à recueillir. Par exemple, pour les données géologiques permettant de définir la profondeur et les faciès lithologiques, la méthode de forage affectera directement la qualité des interprétations.

Les principales méthodes de forage sont résumées dans le tableau Fig.41 ci-dessous.

Type de sondage	Coût (fonction de la profondeur)	Vitesse de réalisation	Profondeur	Qualité des données / échantillons
Destructif 	Faible (20-100 €/m)	rapide	Élevée (record 11km)	composition de l'échantillon modifiée.
Tarière 	Faible (20-30 €/m)	Très rapide	Faible (de l'ordre de la dizaine de mètre)	composition de l'échantillon intacte mais texture modifiée.
Carotté 	Élevé (100-400 €/m)	lent	Elevée	texture de l'échantillon pratiquement intacte.

Fig.41 : Méthodes de forage

Chacune de ces méthodes a des caractéristiques propres en termes de :

- coût,
- rapidité de mise en œuvre,
- qualité/représentativité des échantillons prélevés.

Au fur et à mesure de la réalisation du forage, l'acquisition des paramètres de la machine (notamment la vitesse de rotation et d'avancement, la pression fluide...) sert à avoir une première idée des lithologies traversées.

Sur la base du tableau précédent (Fig.41), notons que :

- L'incertitude concernant l'analyse géologique est plus importante dans le cas d'un sondage destructif.
- La méthode la plus précise en termes d'incertitude est le sondage carotté car les données recueillies sont quasi intactes en termes de composition et de texture.
- Les sondages à la tarière permettent de conserver la composition de l'échantillon, toutefois, sa texture est modifiée.

Acquisition in situ

Le choix de la méthode de forage fera l'objet d'un compromis coût-qualité qui exercera une influence directe sur l'incertitude de la donnée.

Quand les géologues disposent d'informations préalables quant à la nature du terrain (bibliographie des études antérieures), les méthodes destructives et carottées peuvent être combinées afin de cibler des couches ou formations géologiques spécifiques.

De nombreuses méthodes sont réalisables sur le terrain afin d'acquérir des données sur les sols et les roches.

Pour mesurer les comportements mécaniques des sols et des roches, il est envisageable de réaliser des essais pressiométriques ou d'employer un pénétromètre. Ces essais vont mesurer la capacité du sol en place à se déformer sous la contrainte.

La géophysique, par le biais des méthodes électriques¹⁵, géo-radar, sismique réflexion, ..., permet de différencier les différentes couches du sous-sol en fonction de caractéristiques physiques (conductivité / résistivité, densité, ...). La compréhension du sous-sol en est améliorée (présence de nappe phréatique, stratigraphie, ...)

La précision des résultats est dépendante des conditions dans lesquelles se font les mesures, des caractéristiques de la machine ainsi que du respect des méthodes d'application.

Essais de laboratoire

Le type d'analyse/essais en laboratoire ainsi que la pertinence des mesures sont directement liés à la qualité de l'échantillon.

Sur un échantillon de roche remanié, le nombre d'essais, du fait de la perte de cohésion, est limité, alors qu'il peut suffire pour caractériser un sol et son comportement mécanique.

À l'inverse, sur un échantillon de sol/roche intacte, il est possible de réaliser des essais mécaniques qui affineront la précision des résultats. Les principaux essais de laboratoire dans le cadre de la géotechnique sont :

- Granulométrie (sol) ;
- Teneur en eau (sol) ;
- Limites d'Atterberg / essai au bleu de méthylène (teneur en argile) ;
- Essai Proctor (compactage de sol) ;
- Essai œdométrique (détermination des paramètres pour évaluer les tassements des sols) ;
- Des essais triaxiaux (résistance à la déformation dans les trois dimensions – sur échantillon intact de sol ou de roche) ;
- Des essais brésiliens (résistance à la traction par flexion – roche intacte) ;

Sur un échantillon de roche intacte, la réalisation de lame mince et son analyse géochimique (microsonde, spectromètre, ...) fournissent des informations supplémentaires sur sa composition, son âge, son origine, sa formation et le contexte géologique général.

L'incertitude sur la donnée recueillie est fonction de la méthode et de la précision de la machine utilisée.

¹⁵ Le principe de fonctionnement de la méthode électrique est de mesurer la résistivité apparente des couches de sol et de roche. Cela consiste à installer des électrodes dans le sol et faire circuler un courant électrique à intensité donnée entre ces électrodes. Des instruments permettent de mesurer la résistivité des différentes couches et d'établir un modèle de résistivité, lui-même permettant de réaliser (soit avec sondage à l'appui, soit à partir d'abaque) des modèles de sol. Ce genre de méthode est fortement impacté par la présence d'eau dans les sols.

Analyse / Décisions

Comme nous avons pu le constater, les incertitudes sont liées à de nombreux paramètres (méthodes et conditions, matériels et précisions des outils employés, connaissances préalable et interprétations...).

Les décisions franches sont donc très souvent difficiles à prendre. La gestion des risques permet d'identifier les incertitudes et de les atténuer, voire de les résoudre entièrement (souvent par des sondages et des analyses complémentaires, mais aussi par des dimensionnements de structure plus conservateurs).

5.4 Relevés numériques / Traitement des données

**Méthodes de relevés numériques -
Références**

Les méthodes de relevés numériques ont été largement développées dans le livrable *MINnD_TH01_UC00_03_Relevés_numeriques_026_2019* du projet MINnD Saison 1¹⁶.

Ce livrable traite de la formulation des besoins par les donneurs d'ordre, expose des cas d'usages et indique les techniques d'acquisition les plus adaptées aux besoins exprimés. Il est évident que les exemples de matériels proposés ont évolué depuis la sortie de ce livrable, mais les concepts et explications fournies restent adaptés.

La conclusion proposée dans ce livrable (Fig.42) est toujours d'actualité et permet aux lecteurs de comprendre les différents usages entre les relevés par méthodes traditionnelles, par photogrammétrie, LiDAR¹⁷ ou interférométrie.

Opérations	Méthodes						
	Relevé Traditionnel Tachéomètre	GPS	Photogrammétrie	Lidar statique	Lidar dynamique terrestre	Lidar dynamique aéroporté	Interférométrie radar (INSAR)
Mise à jour de plans 1/1000 ème	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Pas adapté
Zone < 10 ha	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté
Zone > 10 ha	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Affaissements, glissements, retrait gonflement.
Zone > 100 ha	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Affaissements, glissements, retrait gonflement.
Infrastructure linéaire	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Sismotectonique
Chaussées	Adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté
Ouvrages d'art	Adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté	Adapté
Ouvrages hydrauliques (barrages)	Adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté	Hors (eaux)
Gare de péage	Adapté	Pas adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Pas adapté	Pas adapté

Légende

	Adapté
	Peu adapté
	Pas adapté

Fig.42 : Conclusion du livrable « Relevés Numériques » de MINnD Saison 1

¹⁶ https://www.minnd.fr/wp-content/uploads/2020/09/MINnD_TH01_UC00_03_Relevés_numeriques_026_2018.pdf

¹⁷ LiDAR : Light Detection And Ranging (détection et estimation de la distance par la lumière)

Captation de données

Les instruments de captation de données sont de plus en plus faciles à utiliser, car de plus en plus intuitifs.

Le recalage des différents scans réalisés autour ou à l'intérieur d'un même ouvrage est désormais automatique, et accessible en quelques minutes seulement, voire pratiquement en temps réel.

De plus les solutions sont indépendantes des grands logiciels du marché, avec souvent des liens possibles avec les logiciels majeurs.

Technologies mobiles de captation de données

Pour la captation des données, on distingue des solutions mobiles lourdes et des solutions mobiles légères.

Les différents scanners mobiles (qui permettent de capter des nuages de points ainsi que des images) ont sélectionné en fonction des précisions exigées par le cahier des charges et en fonction de l'usage qui sera fait des données (voir chapitre précédent).

Dans tous les cas, il est nécessaire de définir des points de référence avec des coordonnées très précises. Ce travail doit impérativement être mené par un topographe au début du référencement. Par la suite, la capture est semi-automatique grâce aux points de repère fixes, et peut donc être réalisée par un technicien seulement formé aux dites technologies.

Plusieurs solutions permettent une captation des données avec vision immédiate sur tablette, ce qui autorise une visualisation instantanée de l'avancement de la captation et de compléter immédiatement des zones d'ombre ou d'imperfection.

Les solutions mobiles légères sont principalement utilisées en intérieur, car les lasers demandent moins de puissance.

Les GPS topographiques associés aux matériels donnent actuellement une précision de l'ordre du centimètre, lorsqu'ils sont utilisés en extérieur.

En ce qui concerne les solutions très légères, du type iPhone12, elles délivrent encore une qualité et une précision médiocres, et sont donc à destiner exclusivement aux usages d'aménagement ou de décoration intérieurs.

Drone

Le pilotage d'un drone est nécessairement opéré par un opérateur accrédité. Il est préférable d'utiliser un drone en présence d'un topographe, car cela permet de combiner des mesures avec d'autres technologies.

Si le topographe n'est pas présent pendant la captation (par gain de temps ou pour des raisons de sécurité), le traitement doit malgré tout être réalisé par un topographe. Seules ses compétences permettront de corriger les dérives fréquentes en altitude.

Traitement des données

La phase de traitements de données exige une grande expertise en topographie et dure plus longtemps que la phase d'acquisition des données.

Actuellement, on constate qu'il y a plus de développements sur logiciels de traitement que sur instruments de captation qui ont presque atteint leurs limites technologiques.

Les usages les plus fréquents sont les suivants :

- Comparaison entre 2 nuages de points
- Comparaison entre 1 nuage de points et 1 modèle théorique

Dans les deux cas, on obtient une carte d'inspection de déformations (une carte de couleurs des écarts).

Processus de traitement des données

Le processus de traitement commence par plusieurs actions :

- Nettoyage des données par opérateur, afin de supprimer les points parasites (points faux ou zones occultées) ou les données hors du champ d'attention ;
- Géoréférencement des différents nuages de points, selon l'étendue du projet ou les campagnes de captation ;
- Étalonnage en altitude pour les ouvrages sur plusieurs étages, car on constate souvent des accumulations d'erreurs lors des campagnes successives sur des ouvrages de grande hauteur.

Analyse des résultats

Le traitement des données conduit à une carte d'inspection de déformations (Fig.43), dont la représentation est un élément essentiel dans la facilité de lecture des résultats. C'est une carte colorisée des écarts entre la réalité et son modèle théorique, ou entre deux nuages de points d'un même objet captés à deux moments.

Cette carte est accompagnée d'une légende logique colorisée qui permet d'apprécier les écarts et de différencier les valeurs positives et négatives :

- couleur verte : un écart proche de zéro.
- couleur bleu : un écart positif.
- couleur rouge : un écart négatif.

Les incertitudes sur la qualité d'une géométrie sont donc parfaitement connues et compréhensibles : des travaux peuvent alors être réalisés pour diminuer les écarts et rester dans les tolérances de géométrie attendues.

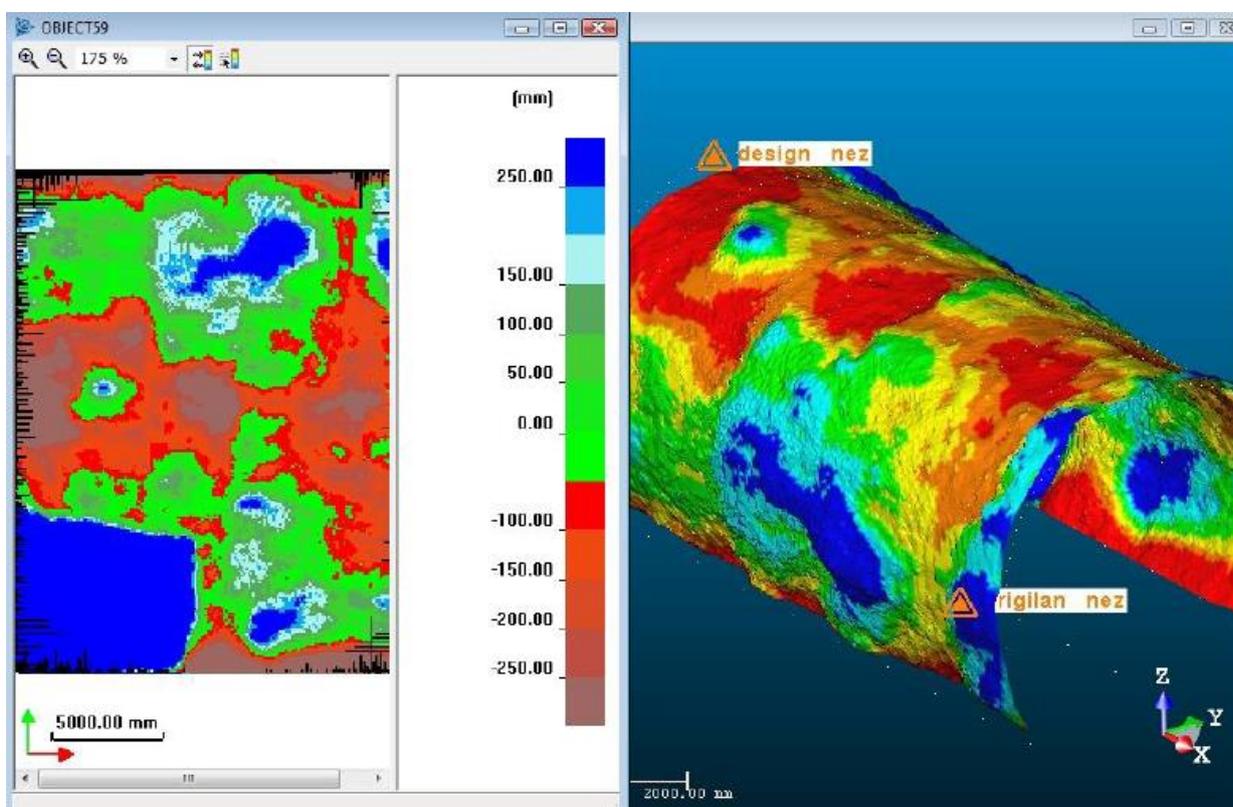


Fig.43 : Carte de couleur des écarts entre modèle théorique et réalité du creusement d'un tunnel (Trimble Realworks)

Responsabilités du topographe

Les missions et responsabilités du topographe ont été décrites dans le livrable précédent (Chapitre 3.4 – Construction sur site et hors site).

Quelle que soit la complexité d'un projet de construction, 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.

Le choix de mobiliser une équipe de topographie permanente pendant la durée du chantier doit être décidée lors de l'organisation du chantier et de l'évaluation de sa difficulté.

Dans le cadre de la mission de relevés numériques, le topographe est responsable du géoréférencement, du recalage des nuages de points et des données relevées.

Il ne faut pas confondre les outils de captation et la méthodologie mise en œuvre. En effet, certains usages ne nécessitent pas la présence d'un topographe (d'où l'intérêt de certaines solutions intuitives et suffisamment précises pour le besoin), mais une formation aux outils reste indispensable.

Lors de la phase de traitement des données, l'expertise du topographe est indispensable pour des raisons de responsabilités. Lorsque les données sont fiables, un expert métier peut s'approprier les données pour éventuellement les vectoriser afin de :

- concevoir sur la base de ces données
- restituer un état d'avancement
- préparer le DOE numérique des ouvrages exécutés.

Cas d'usage sans topographe

La présence d'un topographe est-elle indispensable pendant toute la durée du chantier ?

Bien évidemment, pour des chantiers très techniques ou difficiles, la réponse est affirmative.

Mais dans la plupart des cas, la présence d'un topographe n'est indispensable qu'au lancement du chantier, et rarement pendant l'exécution des travaux. Le métier de « traceur » a été développé pour gérer les incertitudes non flagrantes et qui ne nécessitent pas une expertise de pointe.

Voici quelques cas d'usage liés aux relevés numériques qui ne nécessitent pas la présence d'un topographe :

- Phase commerciale, pour une visite préalable de site :
 - ouvrage à rénover
 - contexte à appréhender
- Phase de réalisation, pour le plan d'avancement journalier :
 - relevés de déblais et de remblais
 - relevés de parties d'ouvrages réalisées et saisies éventuelles de Fiches de Non-Conformité (FNC) pour réaliser les plans et modèles de récolement ;
- Composants manufacturés (charpente métallique, éléments préfabriqués...) :
 - contrôle qualité pour localisation / mise en place du composant
 - déformation du composant dans son contexte final
- Visite virtuelle de chantier :
 - contexte sanitaire particulier
 - sécurité renforcée d'un site sensible

Quelques exemples d'applications

Fil de rail, fil de caténaire d'une infrastructure ferroviaire

Concernant les relevés numériques et le traitement des données recueillies, quelques exemples significatifs d'application peuvent être soulignés.

SNCF Réseau a entrepris la création d'un jumeau numérique du réseau ferroviaire pour optimiser ses opérations de maintenance. Pour ce faire, les trains de surveillance du réseau sont équipés de capteurs laser reposant sur la technologie LiDAR, très utilisée dans les voitures autonomes, pour scanner et cartographier toutes les infrastructures en 3D (voies ferrées, caténaires, ouvrages d'art, végétation...) avec une précision de quelques millimètres. Ces scans sont qualifiés toutes les 6 semaines et sont mis à disposition des agences régionales, afin de vérifier que tous les équipements restent dans les tolérances admissibles.

Cette modélisation permet de profiter d'une vision globale sur le réseau ferroviaire pour évaluer ses capacités actuelles et futures, et ainsi d'anticiper les incidents, détériorations et autres variations qui pourraient le perturber.

Pathologies des ouvrages

Concernant le vieillissement des ouvrages d'art en France (ponts, murs de soutènements, ouvrages de franchissements, buses, etc.), on constate une grande disparité des comportements dans le temps qui peuvent induire des déformations progressives. Ces déformations différées peuvent être pathologiques ou non. On parle de déformations pathologiques s'il s'agit de désordres du béton (gonflement, fluage, corrosion des aciers, perte de précontrainte des câbles, tassements différentiels, ...) qui peuvent conduire à des modifications géométriques (flèche par exemple).

Ces pathologies sont liées principalement au vieillissement des ouvrages. Pour le béton, la cause peut être liée à une formulation inappropriée, des températures excessives au coulage ou l'utilisation de granulats déclenchant les réaction alkali-granulats. Pour les corrosions d'armatures et en présence de fissures préexistantes, les concentrations en chlorures et en carbonates ajoutés accélèrent les cinétiques de pénétration des agents agressifs déclenchant la corrosion. Enfin, l'augmentation du trafic routier, l'augmentation des charges de vents (changement climatiques) peuvent modifier les charges de fonctionnement et conduire à un niveau non prévu au dimensionnement des ouvrages. Sur la question des trafics, la mauvaise répartition des charges à l'essieu a révélé une nocivité plus grande que l'augmentation du nombre de poids lourds (de petits véhicules avec des chargements lourds - souvent en surcharge - contribuent ainsi au vieillissement de l'ouvrage).

Le réseau national français non concédé représente environ 2% du réseau global. Les ouvrages d'art du réseau national sont régulièrement inspectés et suivis. Mais la majorité des ouvrages du réseau non concédé concerne des ouvrages départementaux, communaux, de communautés d'agglomération... dépendant d'organismes qui ne sont pas dotés de moyens techniques suffisants pour la réalisation des inspections et réparations. Les principales pathologies observées sont liées à un manque d'entretien.

À partir du moment où une pathologie est identifiée¹⁸, on devrait être en mesure d'effectuer un re-calcule de l'ouvrage en intégrant les paramètres matériaux identifiés à partir des mesures de déformation constatées par suivi de mesures. La comparaison entre mesures et Jumeau Numérique doit aider au diagnostic et à l'interprétation.

¹⁸ Le CEREMA (Ex SETRA) a publié depuis 1996 plus de 40 catalogues gratuits 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...).

Il faut noter que le paramètre « temps » n'est pas le bon indicateur. C'est principalement la modification de la « capacité portante » qui est en cause, du fait de l'évolution dans le temps de paramètres mécaniques des matériaux constitutifs. C'est donc la capacité structurelle qu'il faut ré-évaluer, même si ces analyses doivent être réalisées avec des jalons temporels.

La conservation des paramètres matériaux initiaux constituant les ouvrages et les structures est une donnée majeure à conserver au même titre que les données géotechniques. Le Ju-meau Numérique doit être structuré en conséquence, avec la valeur moyenne des essais de convenue et la variabilité associée.

5.5 Représentation graphique

Représentations sur Plans 2D

La création d'une représentation cartographique est destinée à identifier et localiser géographiquement les éléments du terrain (naturels ou artificiels), afin d'alimenter la base d'informations nécessaire à l'intégration des éléments du projet.

L'information doit donc être localisée dans son référentiel cartographique (géoréférencée) en tenant compte de sa géométrie (dimension). Ces deux catégories d'information sont différentes et ne peuvent pas être représentées de la même manière sur un plan.

Prenons l'exemple d'un objet de 10m x 10m.

- Sur une représentation à l'échelle du 1/100^e, sa représentation a un sens et sera visible.
- Cependant, sur une carte IGN Top 25 (au 1/25000^e), il est illusoire de vouloir le représenter : nous utiliserons donc un symbole.

Pour positionner des éléments sur une même base cartographique, il faut aussi se questionner à propos de leurs sources. Chaque méthode de collecte et de traitement conduit à une précision différente dans la détermination de la forme et de la localisation. Une même série d'information peut avoir un écart de position très significatif.

Prenons l'exemple de la représentations d'un parcellaire issu de données IGN et de données cadastrales (Fig.44).

L'écart affiché paraît conséquent et s'explique de différentes façons :

- En premier, le mode de collecte des informations (méthode vectorielle directe vs scan-nérisation de données type RASTER).
- Ensuite le système de calcul du géoréférencement : les données IGN sont directement calculées dans le système de coordonnées cartographique (RGF 93) alors que la vectorisation des plans et cartes du cadastre implique une transformation de référentiel cartographique ancien (NTF) au système actuel (RGF 93).

Ces écarts sont observables mais ne sont pas constants sur l'ensemble du territoire.

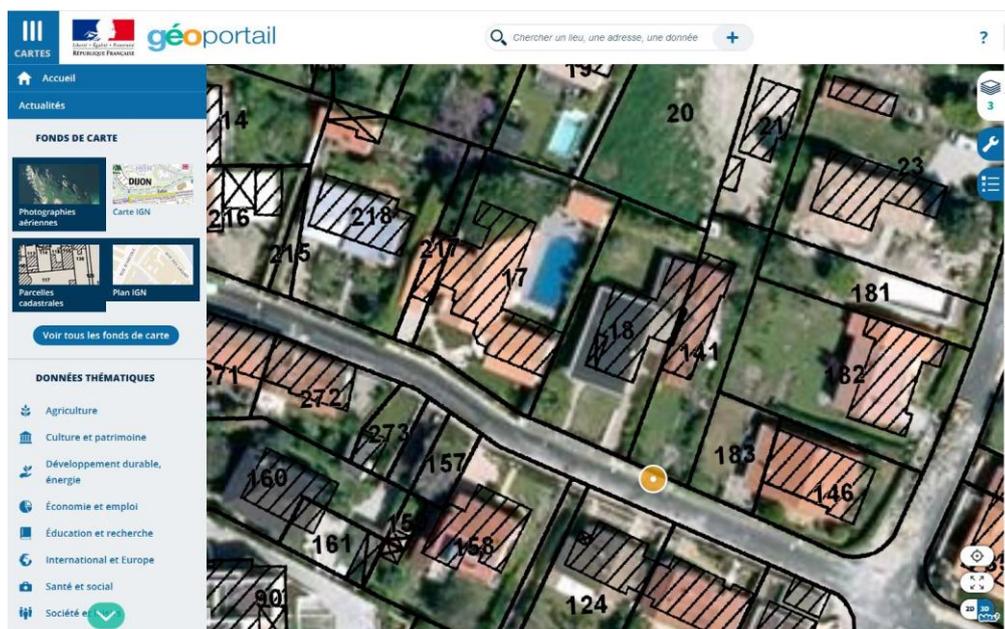


Fig.44 : Écarts fréquents entre une ortho photo et le cadastre officiel (dans un même système de coordonnées)

Représentation de modèles géologiques 3D

Données d'entrée

La géologie du sous-sol étant par définition non visible (ou aux affleurements découverts), sa représentation est virtuelle avec des incertitudes, dont l'interprétation par des spécialistes est essentielle.

Les données d'entrée pour la construction du modèle peuvent être de plusieurs types :

- Données existantes (catalogues de données, observations, cartes géologiques);
- Sondages ;
- Profil électrique ;
- Connaissance géologique ;
- Règles de modélisation (algorithme d'analyse géostatistique) ;
-

L'optimum pour le tri des données est que le géotechnicien ait été présent lors de l'acquisition afin d'avoir un œil critique sur les méthodes employées et les résultats.

La représentation graphique des données et leur visualisation dans un espace 2D ou 3D (ArcGis, Surfer, GDM¹⁹) permet de mieux les appréhender et de mieux les trier. De même le variogramme²⁰ peut mettre en valeur l'existence de données anormales.

La représentation graphique des données et leur visualisation dans un espace 2D ou 3D (ArcGis, Surfer, GDM²¹) permet de mieux appréhender spatialement la cohérence des données. L'étude variographique (le variogramme²²) peut mettre en

¹⁹ GDM (Geological Data Management) : Suite de Logiciels développée par le BRGM

<https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gdm-suite-gerer-modeliser-visualiser-donnees-geoscientifiques-3-dimensions>

²⁰Un variogramme correspond à la loi mathématique qui gouverne l'interpolation de la grille calculée entre les différents points d'entrée (sondages)

²¹ GDM (Geological Data Management) : Suite de Logiciels développée par le BRGM

<https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gdm-suite-gerer-modeliser-visualiser-donnees-geoscientifiques-3-dimensions>

²²Un variogramme correspond à la loi mathématique qui gouverne l'interpolation de la grille calculée entre les différents points d'entrée (sondages)

Incertitude sur les données d'entrée

évidence la continuité spatiale d'une donnée, soit de définir la distance maximum de corrélation entre les données et, à l'inverse à courte distance, de mettre en évidence des données anormales.

De nombreuses incertitudes sont à prendre en compte.

La première incertitude provient du positionnement spatial de la donnée et notamment de la projection sphérique dans un repère cartésien, afin de bien positionner les sondages et les données connues.

Ensuite, concernant les données, deux catégories d'incertitudes sont considérées :

- Les incertitudes sur l'observation et la mesure, qui dépendent du type de sondage utilisé ou des opérateurs. On considère des valeurs d'incertitude de :
 - +/- 10 cm pour les sondages carottés.
 - +/- 25 cm pour les sondages destructifs.

Dans le cas où les sondages n'atteignent pas la couche ciblée par l'interpolation, les incertitudes, issues de l'interprétation de géologues, peuvent atteindre plusieurs mètres (incertitudes égales à une valeur arbitraire à laquelle on ajoute l'incertitude de mesure). On parle alors d'inégalité. Des méthodes de calculs par géostatistiques permettent de les prendre en compte.

- Les incertitudes de calculs qui vont dépendre de la méthode mathématique utilisée et de son paramétrage. Pour modéliser l'altitude d'une couche on utilise les méthodes géostatistiques. Le modèle de variogramme appliqué au variogramme expérimental peut être source d'incertitude.

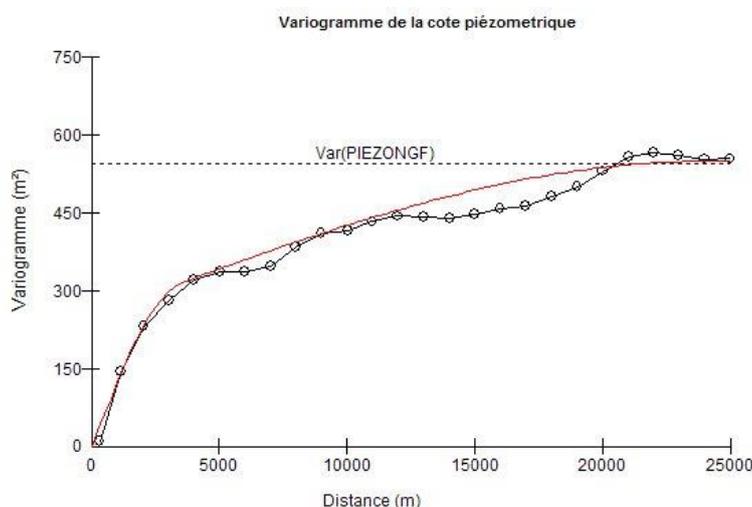


Fig.45 : Variogramme : en noir le variogramme expérimental (à partir des données) ; en rouge le modèle de variogramme qui sera utilisé dans le calcul de l'interpolation par krigeage (BRGM)

Modélisation d'une coupe du sous-sol

La modélisation du sous-sol le long d'un profil en long peut être représentée par un géotechnicien avec ses limites (en fonction des incertitudes) supérieure et inférieure (Fig.46).

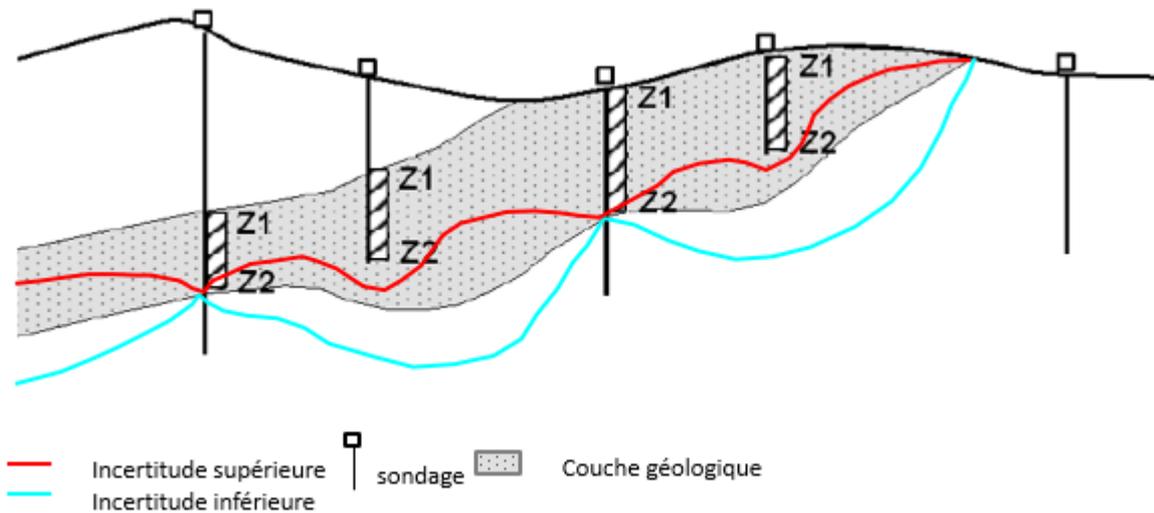


Fig.46 : Représentation des incertitudes du sous-sol (Interprétation d'un géotechnicien)

Modélisation 3D du sous-sol (logiciel GDM)

Lors de l'interpolation, le logiciel GDM calcule en chaque point de la grille la valeur d'altitude de la couche géologique en fonction du modèle de variogramme utilisé (cf Fig.47).

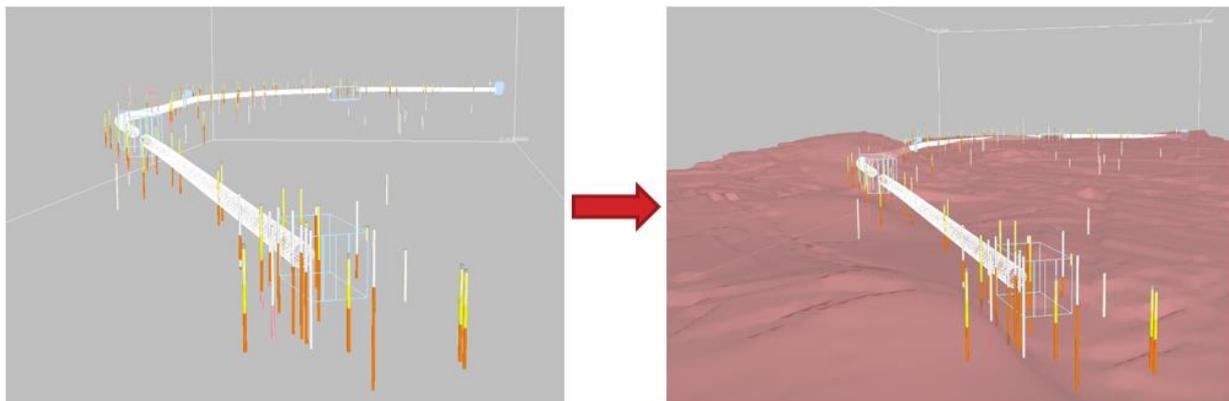


Fig.47 : Modélisation 3D d'une couche géologique et de ses incertitudes supérieure et inférieure (logiciel GDM)

Modélisation d'une coupe du sous-sol (logiciel GDM)

À partir d'outil de construction des interfaces géologiques faisant appel à des méthodes géostatistiques comme le logiciel GDM, il est possible de générer des profils en long (Fig.48) afin de représenter les différentes coupes géologiques.

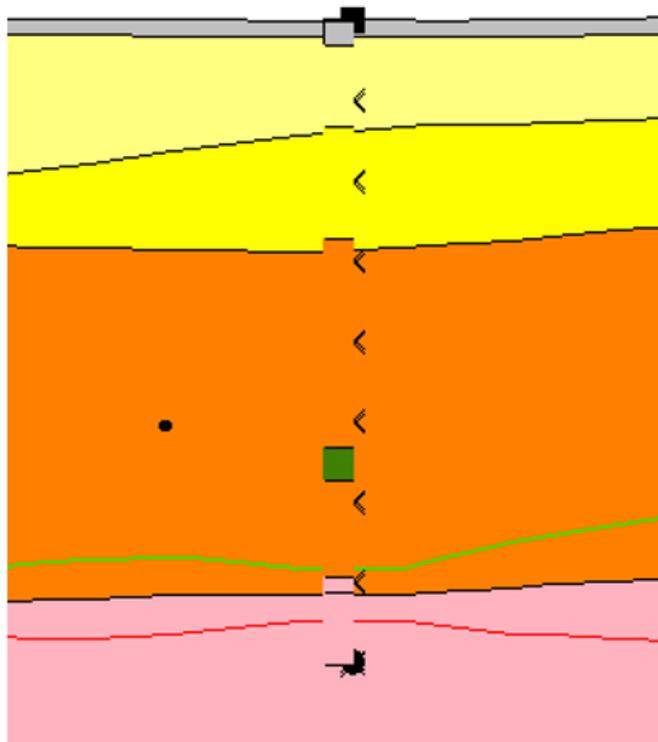


Fig.48 : Coupe du sous-sol et des incertitudes générée par le logiciel GDM

Analyse des résultats

La question est donc de savoir à quel point la modélisation est exacte, et quelles sont les incertitudes sur la localisation des couches géologiques et des incertitudes associées.

Pour ce faire, nous représentons l'écart-type de l'erreur de krigeage²³. Ce paramètre calculé lors de l'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme est en géostatistique l'écart-type en tout point de l'erreur sur la grandeur déduite d'un krigeage (Fig.49B).

Représentation de modèles géotechniques 3D

Théorie des incertitudes

De même que pour la représentation de la géologie, un modèle géotechnique est virtuel avec des incertitudes, dont l'interprétation par des spécialistes est essentielle.

Les méthodes statistiques sur évaluation des risques naturels font appel à la théorie des incertitudes. Ces méthodes sont fortement liées à la modélisation numérique et sont destinées principalement à :

- l'aménagement du territoire,
- le risque sismique,
- la gestion de crise,
- l'exploitation des ressources
- ...

La question de la modélisation est de savoir si la représentation est fiable, afin de réduire les incertitudes. C'est avant tout une notion de confiance, puisque la finalité est de traiter les incertitudes pour prendre des décisions.

²³ Krigeage : ensemble de méthodes d'interpolation permettant d'estimer la valeur d'une propriété en un point de l'espace géographique à partir des observations voisines, en utilisant la théorie des variables régionalisées.

Représentation spatiale

Actuellement, les incertitudes sont représentées par des outils disponibles dans le monde des probabilités (représentation d'intervalles avec des bornes min et max) mais aussi par des outils de représentation de la théorie des sous-ensembles flous²⁴.

La problématique est principalement liée à la représentation spatiale et temporelle.

En ce qui concerne la représentation spatiale, les incertitudes sont de plusieurs types :

- Erreur liée à la variabilité des mesures ;
- Manque de mesures ;
- Éléments incohérents (aberrations, qui doivent être nettoyées) ;
- Interprétations.

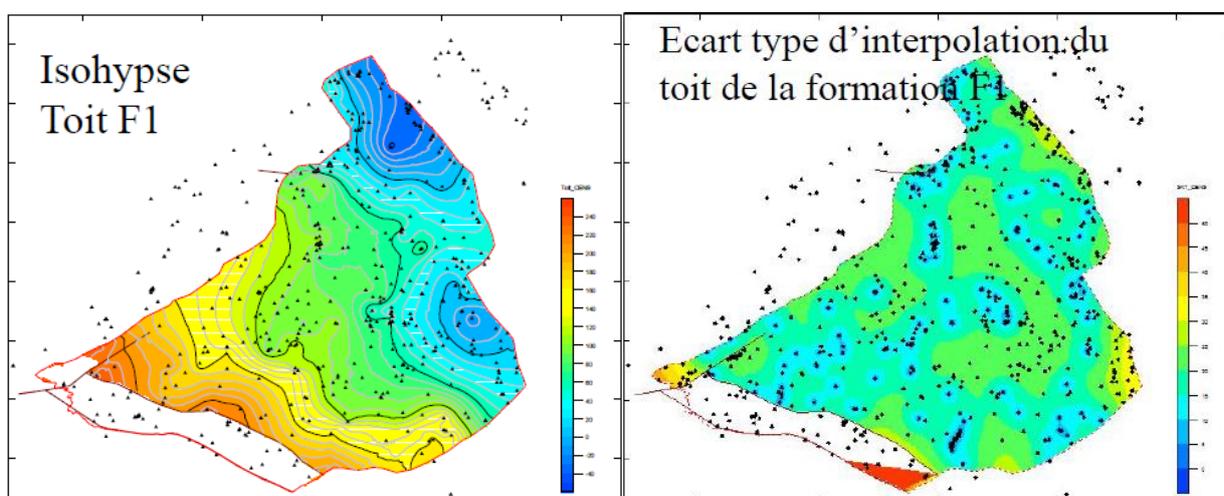


Fig.49 : Représentation de l'incertitude par interpolation de la répartition des données d'entrée (BRGM).
A représente l'altitude (m) du toit de la formation F1, résultat de l'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme.
B représente l'écart type de l'erreur de krigeage.

Représentation temporelle

La représentation de l'incertitude peut se faire par écart type d'interpolation (Fig.49B).

- Le schéma de gauche (Fig.49A) représente les courbes de niveau d'altitude du toit de la formation géologique F1 (isohypse) qui est le résultat du calcul géostatistique (interpolation par krigeage avec modèle de variogramme) avec le positionnement des forages réalisés (points noirs).
- Le schéma de droite (Fig.49B) représente l'écart type de l'interpolation, c'est-à-dire la spatialisation de l'observation, et donc la représentation des incertitudes.
 - Zones bleues : l'incertitude est faible car il y a de nombreux forages.
 - Zones vertes : l'incertitude est élevée car il y a peu de forages.
 - Zones jaunes et rouges : l'incertitude est très élevée car il n'y a pas de forage ou la zone est en bordure du périmètre d'étude.

L'origine des incertitudes est également liée à :

- La variabilité temporelle du phénomène (statistique et probabilité) ;
- Le manque ou l'imperfection de la connaissance.

L'interprétation par plusieurs experts permet de raffiner l'information (en particulier pour spécifier une borne supérieure et une borne inférieure, mais cela ne conduit

²⁴ Théorie des sous-ensembles flous : représentation mathématique de l'imprécision relative à certaines classes d'objets (fondement de la logique floue)

pas obligatoirement à une donnée exacte). D'autres sources d'informations sont nécessaires pour diminuer l'incertitude.

Le chapitre 9.6 expose de nouvelles pistes de représentation des incertitudes avec les nouvelles technologies de machine learning (Intelligence Artificielle).

5.6 Gestion des incertitudes

Travaux souterrains

Les travaux souterrains sont éminemment soumis aux incertitudes, du fait de la méconnaissance du sous-sol dans sa globalité et l'interprétation nécessaire des quelques données captées.

Fascicule 69 du CETU

Les incertitudes liées à la géotechnique sont amplement abordées dans le fascicule 69 (2013 – Mise à jour 2019) du CETU²⁵, comme cela a été décrit dans le précédent livrable. Ce fascicule 69 comprend trois cahiers :

- A - Données brutes
- B - Interprétation des données
- C - Solutions techniques

Le management du risque technique est réalisé au moyen d'un registre des risques qui permet d'identifier, d'analyser et d'évaluer chaque risque.

Le fascicule distingue :

- Le risque acceptable, qui permet de poursuivre la conception ou les travaux ;
- Le risque non acceptable, qui exige des analyses complémentaires et des mesures de traitement spécifiques.

Le management des risques géologiques est traité en 3 phases :

- Bilan des connaissances et incertitudes, recueilli dans le registre des incertitudes (défaut d'information pour une meilleure compréhension de la connaissance des évènements, de ses conséquences ou sa vraisemblance) ;
- Appréciation du risque, avec ses conséquences et son évaluation ;
- Traitement du risque, relevé dans le registre des risques.

Aléa et registre des incertitudes

Le terme « aléa » n'est jamais utilisé. Tout risque est impérativement identifié et quantifié.

Le registre des incertitudes permet d'identifier les évènements 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 évènement affectant les objectifs) : Très forte/Fortes/Moyennes/Faible.
- **Niveau de risque** (combinaison Vraisemblance et Conséquences) :
 - inacceptable,
 - important (à surveiller),
 - significatif (mais acceptable),

²⁵ 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/>)

Recommandations de AFTES

- 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

L'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) a émis des recommandations sous la forme de 2 fascicules²⁶ qui ont été élaborés en collaboration avec le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS), le Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR) et le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement (CFG) :

- Recommandation AFTES GT32R2F1 : Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques (Juillet 2012).
- Recommandation AFTES GT32R3F2 : Prise en compte des risques techniques dans les projets d'ouvrages souterrains en vue de la consultation des entreprises (Septembre 2016).

Elles se justifient par le fait qu'il n'existe pas, à date, de méthodologie partagée pour caractériser les incertitudes géotechniques, ni pour encadrer les analyses de risques, et parce que certains contrats de conception-construction, concession ou PPP ont pu conduire à des illusions quant aux modes d'affectation de ces risques.

L'AFTES considère que les incertitudes et risques géotechniques doivent être **identifiés, représentés et évalués** aussi tôt et objectivement que possible, et que les méthodes constructives doivent être explicitées dans le DCE, puis validées par les deux parties – le but étant que la survenance d'évènements géotechniques incertains **impacte le moins possible le coût et le délai** de réalisation de l'ouvrage.

Au préalable de l'émission du DCE, l'étude des incertitudes et risques géotechniques doit être un processus itératif répété à la fin de chaque phase EP, AVP, PRO, et doit suivre 3 étapes :

1. Le bilan des connaissances et incertitudes géotechniques (cahiers A et B) :
 - compilation des données factuelles (cahier A).
 - analyse de la fiabilité des données pour établir le contexte géotechnique (cahier B).
 - synthèse géotechnique (MSG) et profil en long géotechnique (cahier B)
 - registre des incertitudes géotechniques (le « négatif » du MSG) qui récapitule toutes les inconnues et incertitudes sans analyser leurs conséquences (en termes de Génie Civil).
2. L'appréciation des risques qui en découlent (cahier C) :
 - identification des risques (incertitudes et conséquences sur les conditions de réalisation de l'ouvrage).
 - analyse des risques, qui consiste à quantifier la vraisemblance des évènements incertains et la gravité de leurs conséquences (coût, délai, sécurité), qui varie selon les objectifs et priorités définis par le maître d'ouvrage.
 - évaluation du risque (critères d'acceptabilité) qui détermine les risques nécessitant un traitement pour ramener leur gravité à une valeur acceptable.
3. Le traitement de ces risques (en réduire l'importance, voire les supprimer) :
 - réduction de la vraisemblance par de nouvelles reconnaissances.
 - réduction des conséquences par modification du tracé, du profil, des méthodes.

²⁶ <https://www.aftes.fr/fr/product-category/publications-fr/>

Concernant la terminologie, les définitions suivantes ont été retenues :

- **risque** : effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs
- **source de risque** : tout élément qui, seul ou combiné à d'autres, présente un potentiel intrinsèque d'engendrer un risque
- **appréciation du risque** : ensemble du processus d'identification du risque et d'évaluation du risque
- **identification des risques** : processus de recherche, de reconnaissance et de description des risques
- **événement** : occurrence ou changement d'un ensemble particulier de circonstances
- **analyse du risque** : processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau de risque
- **niveau de risque** : importance d'un risque ou d'une agrégation de risques exprimée en termes de combinaison des conséquences et de leur vraisemblance
- **conséquence** : effet d'un événement affectant les objectifs
- **vraisemblance** : probabilité que quelque chose se produise
- **évaluation du risque** : processus de comparaison des résultats de l'analyse du risque avec les critères de risque afin de déterminer si le risque et/ou son importance sont acceptables ou tolérables
- **critères de risque** : termes de référence vis à vis desquels l'importance du risque est évaluée
- **traitement du risque** : processus destiné à modifier un risque
- **risque résiduel** : risque subsistant après le traitement du risque

Par ailleurs, l'AFTES a apporté également des recommandations pour l'élaboration des éléments suivants et la **figuration des objets géologiques incertains** (interfaces, failles, changements de faciès, hétérogénéités locales) :

- coupes géologiques (données à représenter, figuration des incertitudes) ;
- modèles géologiques 3D ;
- cartes d'affleurements ;
- cartes géologiques interprétées ;
- schémas géologiques de principe ;
- coupes documentaires et coupes interprétatives ;
- profils en long géotechniques (associés au MSG).

En soulignant que les réserves émises par le géologue sont peu à peu oubliées et que le profil en long géotechnique prévisionnel (qui dérive d'un modèle géologique représentant **l'idée que l'on se fait**, à un moment précis et à partir des données disponibles, de la configuration des terrains dans l'espace) finit par acquérir un « statut » qui dépasse largement ses intentions initiales.

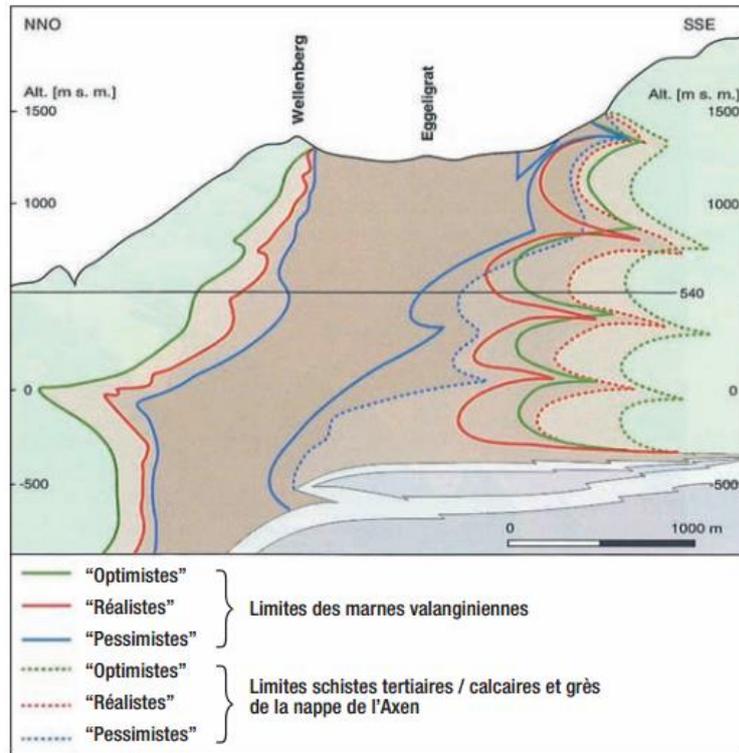


Fig.50 : Exemple de représentation graphique de plusieurs hypothèses géologiques - AFTES

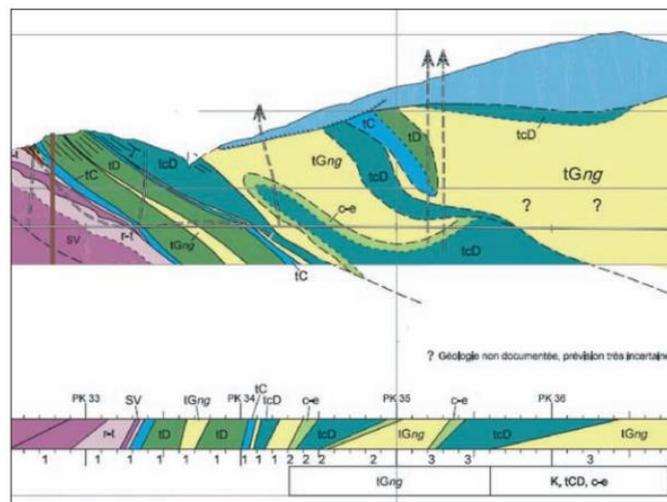


Fig.51 : Coupe géologique prévisionnelle avec représentation de l'incertitude par traits obliques au droit de la côte du projet - AFTES

Pour ce qui est de la **représentation graphique en 3D des incertitudes** sur les contacts l'AFTES recommande une représentation sous forme d'une zone volumique d'incertitude le long des contacts, limitée par les positions extrêmes estimées de ces contacts - cette représentation doit être restreinte aux contacts considérés comme majeurs du point de vue de leur incidence (représenter les positions extrêmes plausibles des contacts majeurs).

D'autres modes de représentation 3D de l'incertitude sont également possibles par utilisation des méthodes de **modélisation stochastiques** où l'on construit plusieurs

modèles géologiques, compatibles avec les données, mais constituant des variantes possibles de la réalité. Traduits **en voxels** (Fig.52), on peut calculer pour chaque cellule 3D la probabilité d'être dans une formation géologique donnée, et on permet une représentation volumique de l'incertitude - on peut par exemple représenter l'ensemble des cellules 3D qui ont une probabilité supérieure à 80% d'être dans une formation donnée, ce qui délimite un objet 3D qui aurait pu être de forme très complexe.

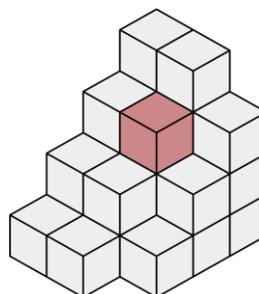


Fig.52 : Voxel (3D Pixel) – Cube dans une matrice 3D

Ouvrages d'Art

Définition de l'auscultation par l'Ifsttar

Plusieurs laboratoires de recherche, le CEREMA et des associations travaillent actuellement dans le domaine de la donnée des ouvrages d'art français, visant à proposer des solutions pour suivre l'évolution du patrimoine du réseau routier national.

Le cahier interactif de l'Ifsttar « Auscultation des ouvrages d'art »²⁷ propose la définition suivante :

L'auscultation des ouvrages d'art désigne :

- l'ensemble des activités techniques mises en œuvre pour acquérir, analyser et interpréter des mesures sans a priori quant à la finalité de cette activité ;
- la surveillance métrologique effectuée sur des ouvrages pour les surveiller et détecter des évolutions anormales.

L'auscultation est donc un ensemble d'exams et de mesures spécifiques, c'est-à-dire des mesures visuelles ou physiques et la mise en œuvre d'essais, qui vise à mieux connaître l'état réel d'un ouvrage pour aboutir à un diagnostic de sa pathologie.

Certaines méthodes d'auscultation peuvent être utilisées avec une fréquence plus ou moins régulière pour effectuer un suivi du comportement d'une structure au cours du temps ; cette activité entre dans le cadre de la surveillance renforcée ou de la haute surveillance telles que définies par le fascicule 03 de l'ITSEO du CEREMA²⁸, et non de l'auscultation.

L'auscultation nécessite au préalable une analyse du dossier d'ouvrage et une inspection détaillée dont les résultats permettent d'orienter la méthodologie ou le type d'auscultation à mettre en œuvre. Elle nécessite également l'intervention d'équipes compétentes et l'utilisation de moyens spécialisés.

Effectuée le plus couramment lorsque l'état de l'ouvrage est douteux ou défectueux, elle peut aussi être appliquée dans le cas d'un ouvrage en état normal, lorsqu'il est envisagé d'apporter à celui-ci une modification touchant à la structure. C'est par exemple le cas, lors

²⁷ <https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CIII/index.html>

²⁸ <https://www.cerema.fr>

de l'élargissement d'un ouvrage existant en béton, en bon état apparent, dont il faut connaître l'état, la nature et la position des armatures ou la capacité portante des fondations.

Pour les ouvrages les plus sensibles, une instrumentation est mise en place et la surveillance s'effectue en continu. On parle alors d'instrumentation de l'ouvrage.

L'auscultation est également un outil de pronostic de l'évolution de l'ouvrage et d'estimation de sa durée de vie. Ce pronostic fait appel à des modèles de vieillissement dont les paramètres peuvent être évalués par des mesures et affinés au fur et à mesure du suivi de l'ouvrage.

Le graphique Fig.53 suivant présente l'état des connaissances publié par l'Ifsttar en 2017. L'évaluation d'indicateurs issus des données d'auscultation ou d'instrumentation et comparée aux données calculées ou modélisées par le jumeau numérique reste du domaine de la recherche. Cependant, il est indispensable d'être en mesure d'extraire et de stocker les informations qui seront indispensables au recalcul :

- Données géotechniques (voir Chapitres 5.4 et 5.5).
- Phasage d'exécution et mesures environnementales (T, hygrométrie).
- Matériaux, caractéristiques mécaniques avec la moyenne mesurée sur chantier et la variabilité des mesures.
- Caractéristiques complémentaires des matériaux obtenues en laboratoire (retrait, fluage de dessiccation, fluage long terme...).

La structuration des IFC doit permettre d'extraire ces données pour un recalcul.

Les prérequis sont précisés dans les travaux de F.Benboudjema [1] et C.Rospars et al. [2].

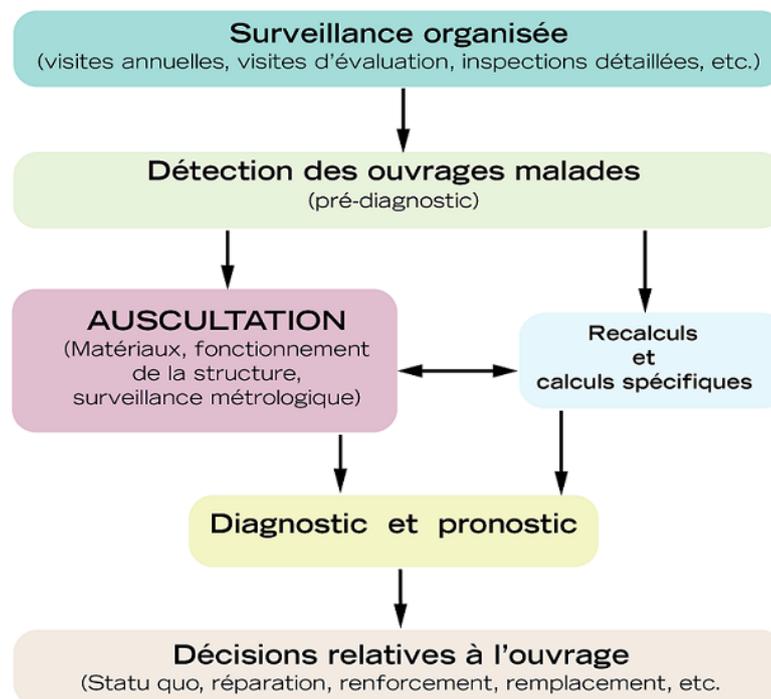


Fig.53 : Principe de surveillance et d'auscultation des ouvrages d'art (cahier interactif de l'Ifsttar)

Stockage des données

Le lien entre un modèle numérique de l'ouvrage d'art sous format IFC et des mesures réalisées au fil de l'eau est l'enjeu du suivi de l'évolution de cet ouvrage. Il est nécessaire de faire un lien entre le modèle figé « Tel-Que-Construit » de l'ou-

L'état de la recherche

ouvrage livré, avec la base des données captées régulièrement du « Tel-Que-Maintenu ». En effet, il est nécessaire de suivre l'évolution des caractéristiques de l'ouvrage (historique des valeurs) à partir d'une référence connue au moment de la livraison de l'ouvrage. Le but n'est pas seulement de vérifier que les paramètres de l'ouvrage sont toujours dans leur plage admissible fonctionnelle, mais que la dérivée de ces paramètres ne tend pas vers un seuil non admissible.

C'est la raison pour laquelle il faut bien distinguer la géométrie de l'ouvrage et les métadonnées associées aux objets composant l'ouvrage, afin d'anticiper la maintenance et les réparations éventuelles.

Pour étudier le vieillissement des Ouvrages d'Art, la recherche est confrontée à la définition des indicateurs qui doivent être comparables entre les mesures et les calculs.

Il faut connaître *a minima* les modules et limites (F_t et F_c) des matériaux en plus de leur dénomination C40 ou nuance d'aciers. Mais aussi les données mécaniques des matériaux, c'est-à-dire leur valeur moyenne et leur variabilité (liée à la variabilité de la réalisation sur chantier et issus des essais de convenance et des essais complémentaires de laboratoire, comme le fluage par exemple).

Ce qui reste encore du domaine de la recherche, c'est la comparaison d'une mesure "ponctuelle" réelle sur un ouvrage (donnée de capteur) avec une valeur (quantité mécanique) moyenne, issue d'un calcul déterministe et localisée au point de mesure (là où se trouve le capteur).

Rôle de l'association IMGC Ingénierie de la Maintenance du Génie Civil

L'ingénierie de la Maintenance du Génie Civil (IMGC²⁹) est une association ouverte à tous les acteurs intervenant dans l'acte de la maintenance, une communauté investie dans la préservation du patrimoine routier français, axée sur l'ingénierie du diagnostic et la maîtrise d'œuvre de réparation, organisée en trois collèges.

Elle propose gratuitement plusieurs publications :

- « Maitrise des risques par l'instrumentation » paru en 2022, qui rappelle les différents usages de l'instrumentation et les possibilités actuelles de l'analyse des données captées.
- « Carnet d'entretien des ouvrages de génie civil – 1 Les ponts »³⁰ à destination des maires des communes et des présidents d'intercommunalités françaises, pour leur rappeler leurs obligations légales en termes d'entretien du patrimoine des ouvrages d'art de leur territoire.

²⁹ <https://imgc.fr/>

³⁰ <https://imgc.fr/wp-content/uploads/2022/09/carnet-dentretien-des-ouvrages-de-genie-civil.pdf>

6. MODES DE REPRÉSENTATION DES TOLÉRANCES

6.1 Rappels des enjeux

Prise de décisions

Dans le précédent livrable « Incertitudes et Tolérances : Enjeux et Définitions »³¹, tous les termes associés à la notion de tolérance ont été définis.

- La tolérance est la « variation admise de la valeur spécifiée pour une dimension ». Elle est calculée à partir des précisions des instruments de mesure, mais aussi selon les méthodes de mesures.
- Le respect des tolérances réglementaires, contractuelles comme mécaniques et thermiques, contribue à la qualité et la pérennité des constructions.
- La tolérance d'exécution est à déterminer en fonction de son contexte (type de projet, contexte contractuel, périmètre du projet...).
- La tolérance d'exécution est un critère pour la prise de décision des méthodes de construction.

Gestion des risques associés

Le peu de documentation et de réglementation, mais aussi d'articles de recherches sur ce sujet, laissent à penser que la tolérance dans le secteur de la construction est un non-sujet.

En fait, dans le cas où l'entreprise principale d'exécution 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.

Le principe est de contrôler en permanence sur site la bonne implantation des outils servant à la mise en œuvre des matériaux et des matériels, et de suivre les écarts du Tel-Que-Construit avec le Tel-Que-Conçu, afin de les corriger. De plus, la conception des ouvrages exige de prendre des « marges de sécurité » dans le dimensionnement afin d'éviter des adaptations importantes qui s'évéraient nécessaires sur site (à la suite de dérives de côtes, de problèmes de constructibilité...).

L'apport de la modélisation et des représentations numériques des ouvrages permettent de mieux identifier, évaluer et maîtriser les risques liés au respect des tolérances.

6.2 Informations attributaires des IFC

Attributs complémentaires des classes IFC

Le sujet est rarement évoqué par buildingSMART International. Pourtant, dans les premiers documents qui ont servi de base au développement des IFC4.3³², on trouve les tables de définition des attributs concernant :

- Les tolérances (PSet Tolerance - Fig.54).
- Les incertitudes (PSet Uncertainty - Fig.55).
- Les risques (PSet Risk - Fig.56 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

³¹ MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022_Jul22 (sur le site www.minnd.fr)

³² <http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/content/scope.htm>

**PSet Tolerance pour
traiter la tolérance
géométrique
dimensionnelle**

Une proposition de sémantique (réalisée par Nick Nisbet – AE3C) concernant ces domaines existe donc déjà mais n’a jamais été implémentée, ni même expérimentée.

Ces tables pourraient d’ailleurs être utilisées dans les IFC 2x3 ou les IFC4.0 sans contraintes.

L’idée de ces tables est que ce n’est pas au BIM et aux IFC de résoudre les problèmes de tolérances et d’incertitude, mais de documenter l’information (dans le but par exemple, d’obtenir une mesure entre deux objets avec l’affichage de la tolérance embarquée dans les paramètres de l’objet).

La question est de savoir si ces informations doivent être portées par les objets ou les systèmes, dans la mesure où l’objectif n’est pas seulement de les identifier, mais aussi de les gérer puisque ces valeurs vont évoluer au fur et à mesure du développement du projet.

Le PSet Tolerance³³ de la Fig.54 concerne principalement la tolérance géométrique des dimensions d’un objet, c’est-à-dire la plage indicative de tolérance associée à la forme, la position ou la planéité de l’objet dans les différents axes du repère (le pourcentage indiqué est le niveau de confiance dans la valeur de la tolérance).

L’objectif est de pouvoir modéliser un objet en 3D avec une valeur de tolérance, c’est à dire une alerte sur la qualité des valeurs géométriques affectées à l’objet.

Name	Property Type	Data Type	Description
ToleranceDescription	IfcPropertySingleValue	IfcText	General description of the tolerance associated to the element or feature, its source, and implications.
ToleranceBasis	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_ToleranceBasis	Indication of the basis of the tolerance requirement
OverallTolerance	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range tolerance associated to the intended shape and position in XYZ.
HorizontalTolerance	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range tolerance associated to the horizontal shape and position in X, if different to the overall tolerance.
OrthogonalTolerance	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range tolerance associated to the horizontal shape and position in Y, if different to the overall tolerance.
VerticalTolerance	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range tolerance associated to the vertical shape and position in Z, if different to the overall tolerance.
PlanarFlatness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range flatness associated to the intended shape and position in XYZ.
HorizontalFlatness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range flatness associated to the horizontal surface in XY, if different to the overall flatness.
ElevationalFlatness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range flatness associated to the elevational surface in ZX, if different to the overall flatness.
SideFlatness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range flatness associated to the side surface in YZ, if different to the overall flatness.

³³ http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/Pset_Tolerance.htm

Name	Property Type	Data Type	Description
OverallOrthogonality	IfcPropertySingleValue	IfcPlaneAngle-Measure	Indicative (95%-100%) range orthogonality associated to the intended shape and orientation in XYZ.
HorizontalOrthogonality	IfcPropertySingleValue	IfcPlaneAngle-Measure	Indicative (95%-100%) range orthogonality associated to the horizontal shape and orientation in X, if different to the overall orthogonality.
OrthogonalOrthogonality	IfcPropertySingleValue	IfcPlaneAngle-Measure	Indicative (95%-100%) range orthogonality associated to the horizontal shape and orientation in Y, if different to the overall orthogonality.
VerticalOrthogonality	IfcPropertySingleValue	IfcPlaneAngle-Measure	Indicative (95%-100%) range orthogonality associated to the vertical shape and orientation in Z, if different to the overall orthogonality.
OverallStraightness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range straightness associated to the intended shape.
HorizontalStraightness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range straightness associated to the horizontal shape in X, if different to the overall straightness.
OrthogonalStraightness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range straightness associated to the horizontal shape in Y, if different to the overall straightness.
VerticalStraightness	IfcPropertySingleValue	IfcPositiveLength-Measure	Indicative (95%-100%) range straightness associated to the vertical shape in Z, if different to the overall straightness.

Fig.54 : IFC4.3 Property Set Tolerance (buildingSMART 2019)

PSet Uncertainty pour traiter la tolérance spatiale

Le PSet Uncertainty³⁴ de la Fig.55 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** concerne la tolérance spatiale (localisation, forme) d'un objet, c'est-à-dire sa position ou sa forme indicative dans diamètre exprimé en pourcentage (le pourcentage indiqué est le niveau de confiance dans la valeur du diamètre).

Name	Property Type	Data Type	Description
UncertaintyBasis	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_UncertaintyBasis	Indication of the basis of the uncertainty
UncertaintyDescription	IfcPropertySingleValue	IfcText	General description of the uncertainty associated to the element or feature, its source, and implications.
HorizontalUncertainty	IfcPropertySingleValue	IfcPositive-LengthMeasure	Indicative (95%-100%) range diameter associated to the vertical shape and position in X, if different to the linear uncertainty.
LinearUncertainty	IfcPropertySingleValue	IfcPositive-LengthMeasure	Indicative (95%-100%) range diameter associated to the overall shape and position in XYZ.
OrthogonalUncertainty	IfcPropertySingleValue	IfcPositive-LengthMeasure	Indicative (95%-100%) range diameter associated to the horizontal shape and position in Y, if different to the horizontal uncertainty.
VerticalUncertainty	IfcPropertySingleValue	IfcPositive-LengthMeasure	Indicative (95%-100%) range diameter associated to the vertical shape and position in Z, if different to the linear uncertainty.

³⁴ http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/Pset_Uncertainty.htm

Fig.55 : IFC4.3 Property Set Uncertainty (buildingSMART 2019)

PSet Risk est relative aux types de risques prédéfinis

Le PSet Risk³⁵ de la Fig.56 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** identifie les types de risques prédéfinis, avec une indication de l'activité ou du processus associé susceptible de déclencher le risque.

On n'y trouve pas de chiffres (pas d'évaluation de la probabilité d'apparition du risque) mais seulement des types de risques. Cette liste ne mentionne pas non plus le degré d'apparition du risque (très faible, faible, modéré, élevé, très élevé). La liste prévoit d'associer au risque ses causes et conséquences.

Le risque peut être affecté à de nombreux agents : un produit, un groupe d'objets, une zone, un processus, une personne... Ce qui est important, c'est de pouvoir partager cette information, comment mettre une alerte sur un modèle (par exemple un point d'exclamation dans un triangle) pour indiquer qu'il y a un risque identifié.

Name	Property Type	Data Type	Description
RiskName	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	A locally unique identifier for the risk entry that can be used to track the development and mitigation of the risk throughout the project life cycle
RiskType	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskType	Identifies the predefined types of risk from which the type required may be set.
NatureOfRisk	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	A description of the generic nature of the context or hazard that might be encountered.
RiskAssessment-Methodology	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	An indication or link to the chosen risk assessment methodology, for example PAS1192-6 or a chosen ISO13100 annex.
UnmitigatedRisk-Likelihood	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the likelihood of the hazard prior to any specific mitigation.
UnmitigatedRiskConsequence	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the consequence of the hazard prior to any specific mitigation.
UnmitigatedRiskSignificance	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the significance of the risk given the likelihood and consequence prior to any specific mitigation.
MitigationPlanned	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	The planned (agreed and irrevocable) mitigation of the likelihood and consequences of the hazard.
MitigatedRisk-Likelihood	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the likelihood of the hazard given the planned mitigation.
MitigatedRiskConsequence	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the consequence of the hazard given the planned mitigation.
MitigatedRiskSignificance	IfcPropertyEnumeratedValue	PEnum_RiskRating	Identifies the significance of the risk given the mitigation of likelihood and consequence.
MitigationProposed	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	Any proposed, but not yet agreed and irrevocable, mitigation of the likelihood and consequences of the hazard.
AssociatedProduct	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	An indication or link to any associated product or material that may trigger the hazard. If used directly on an

³⁵ http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/Pset_Risk.htm

Name	Property Type	Data Type	Description
AssociatedActivity	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	annotation or semantic object. for an alternative see group use encoding template An indication or link to any associated activity or process that may trigger the hazard. If used directly on an annotation or semantic object. for an alternative see group use encoding template
AssociatedLocation	IfcPropertySingleValue	IfcLabel	An indication or link to any associated location or space that may trigger the hazard. If used directly on an annotation or semantic object. for an alternative see group use encoding template

Fig.56 : IFC4.3 Property Set Risk (buildingSMART 2019)

Types de risque

La liste proposée des types de risque de la Fig.57 (RiskType³⁶) est non structurée (classement par ordre alphabétique). Elle mériterait d'être hiérarchisée, mais aussi d'être associée à une bibliothèque d'atténuations suggérées afin de réduire le risque.

Type	Description	Type	Description
ASBESTOSEFFECTS	Asbestos effects	MATERIALEFFECTS	Material effects
ASPHIXIATION	Asphyxiation	MATERIALSHANDLING	Materials handling including manual handling
BUSINESS	Business	MECHANICALEFFECTS	Mechanical effects
BUSINESSISSUES	Business Issues	MECHANICAL_LIFTING	Mechanical lifting operations
CHEMICALEFFECTS	Chemical effects	MOBILE_ELEVATEDWORK-PLATFORM	Mobile Elevating Work Platform operations
COMMERCIALISSUES	Commercial issues	NOISE_EFFECTS	Noise effects
CONFINEMENT	Confinement	OPERATIONALISSUES	Operational issues
CRUSHING	Crushed by excavation	OTHERISSUES	Other issues
DROWNINGANDFLOODING	Drowning and flooding	OVERTURNINGPLANT	Overturning plant or moving machinery
ELECTRICSHOCK	Electric shock	PUBLICPROTECTIONISSUES	Public protection issues
ENVIRONMENTALISSUES	Environmental issues	SAFETYISSUE	Safety issue
EVENT	Event	SILICADUST	Silica dust
FALL	Fall	SLIPTRIP	Slip or trip on the same level
FALLEDGE	Fall from open edge	SOCIALISSUES	Social issues
FALLFRAGILEMATERIAL	Fall through fragile material	STRUCK	Struck
FALLSCAFFOLD	Fall from scaffold	STRUCKFALLINFOBJECT	Struck by falling object
FALL_LADDER	Fall from ladder	STRUCKVEHICLE	Struck by moving vehicle
FIRE_EXPLOSION	Fire/explosion	TOOLUSAGE	Tool usage
HANDLING	Handling	TRAPPED	Trapped
HAZARD	Hazard	UNINTENDED-collapse	Unintended collapse
HAZARDOUSDUST	Hazardous dust	VIBRATION	Vibration
HEALTHANDSAFETY	Health and Safety	WELFAREISSUE	Welfare issue
HEALTHISSUE	Health issue	WOODDUST	Wood dust
INSURANCE	Insurance	WORKINGOVERHEAD	Working overhead
INSURANCE_ISSUES	Insurance Issues	OTHER	required category not on scale
LEAEFFECTS	Lead effects	NOTKNOWN	Value is unknown
MACHINERYGUARDING	Machinery Guarding	UNSET	Value has not been specified

³⁶ http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/PEnum_RiskType.htm

Fig.57 : IFC4.3 Property Set Risk – RiskType (buildingSMART 2019)

6.3 Représentation graphique

Phases Conception et Construction

Comme on a pu le constater dans le précédent livrable concernant ce sujet, la représentation graphique des tolérances n'est généralement pas réalisée, sauf sur des modèles de charpentes métalliques, dont les plans associés permettent d'ajouter des annotations sur les débattements nécessaires à l'assemblage, à la soudure ou au montage après déformation des éléments mis en place.

Pourtant de nombreux projets de génie-civil ou d'infrastructures nécessitent une réflexion attentive qui doit se traduire par une représentation, ou du moins par une note explicative de traitement de ces sujets.

En voici quelques exemples fréquents :

- Tolérances d'implantation de cage d'armatures d'acier et d'inserts dans des voiles de béton particulièrement armé ou précontraint, en tenant compte des enrobages, des précisions d'implantation des inserts, ou des équipements additionnels pour la manutention, le maintien des coffrages pendant le bétonnage...
- Tolérances d'assemblages d'éléments manufacturés sur des éléments en béton coulés en place, nécessitant l'implantation de tiges scellées ou des platines sur lesquelles seront soudés des supports de réseaux...
- Implantation de réseaux souterrains, par rapport à la surface du Terrain Naturel (TN) ou par rapport à d'autres réseaux existants, dont la précision est relative aux données d'entrée parfois mal connues...
- Utilisation de profils-types en travers à extruder le long de l'alignement du projet, et qui doivent s'adapter au TN existant, avec la tolérance liée à la connaissance du TN et à la précision des engins de terrassement.
- ...

Tous ces « réglages » doivent être réalisés dans les règles de l'art et la réglementation existante, tout en tenant compte de la réalité du contexte et des conditions de mises en œuvre. Or les tolérances sont difficilement représentables sous forme graphique, et doivent donc être documentés afin d'informer les points de vigilance identifiés pendant la conception, à traiter impérativement pendant la mise en œuvre. Cela est donc sujet à des exigences de performance et des prises de décisions, voire des transferts de responsabilité lorsque des adaptations sont appliquées sur le chantier.

Les livrables du groupe de travail GT5 de MINnD « Retro-engineering en phase conception, construction et exploitation-maintenance » donnent des recommandations pour connaître le contexte du projet, ce qui permet bien évidemment d'adapter la conception et la réalisation des ouvrages à l'existant, avec des tolérances et des incertitudes mieux maîtrisées.

Maintenance / Exploitation d'un Bâtiment ou d'une Gare

L'exploitation d'un bâtiment, d'une gare (extérieure ou souterraine) ou d'un ouvrage parfaitement localisé dans l'espace n'exige pas tout à fait les mêmes critères que ceux nécessaires à l'exploitation d'une infrastructure linéaire.

On trouvera ci-après l'état de l'art de deux entreprises significatives pour la gestion de bâtiments et de gares (SNCF Gares et Connexions et Bouygues Energie et Services), ainsi que la synthèse des recommandations.

REX SNCF Gares et Connexions

Au sein de SNCF Gares et Connexions, le déploiement du BIM et des modèles 3D en phase de maintenance et d'exploitation est en cours de mise en œuvre. La base de données de l'exploitation /maintenance est basée sur :

- Le DOE numérique pour les travaux neufs.
- La rétro-modélisation du patrimoine existant.

Les besoins en termes de données géométriques sont limités. L'intégration des systèmes fonctionnels (par connaissance terrain) est plus importante, puisque cela permet d'avoir un inventaire des équipements existants (cette base est pour l'instant statique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de convergence avec les données dynamiques de la GMAO, qui fournit des informations quant au bon fonctionnement et aux performances des systèmes).

En marge de la GMAO (pauvre en fonctionnel), il, existe une bibliothèque de synoptiques sur plans (sémantiques et base logique des systèmes).

L'usage le plus pertinent des modèles Tels-Que-Maintenus est la localisation de l'intervention (bâtiment, local...). La géométrie des équipements n'est pas nécessaire. En effet, lors du remplacement d'un équipement, c'est l'équivalence fonctionnelle ou économique qui prime, et jamais l'équivalence géométrique.

La demande de DOE numérique s'explique principalement par la simplification de la livraison et de la prise en main des ouvrages pour assurer l'exploitation et la maintenance. Les tolérances ne sont pas précisées.

L'enjeu du data management, c'est le maintien à jour des données du patrimoine.

SNCF Gares et Connexions emploie désormais des BIM Data managers dont les missions sont :

- La structuration des informations.
- Le recensement des besoins des agents terrains.
- La jonction entre les travaux et l'exploitation/maintenance.

REX Bouygues Energie et Services

Au sein de Bouygues Energie et Services, l'usage du BIM et des modèles 3D en phase de maintenance et d'exploitation est très récent. Et l'usage le plus demandé actuellement reste la connaissance du patrimoine.

En ce qui concerne le rétro-BIM ou rétro-ingénierie (c'est-à-dire la modélisation 3D de bâtiments existants), il s'agit principalement de réaliser un inventaire et de créer une maquette numérique destinée au Facility Management, dont le niveau d'information est très différent de celui généralement fourni avec le DOE numérique.

En ce qui concerne un bâtiment neuf, et lorsque le DOE numérique est contractuel, l'opération est plus simple car la base d'information est correcte et relativement bien structurée et renseignée.

Recommandation : Présence de l'exploitant/mainteneur dès les phases commerciales amont, afin d'exiger une base unique de données structurées. Il est évident que lors d'une opération en PPP (c'est-à-dire lorsque le constructeur est également l'exploitant), l'intégration des demandes est prise en compte dès le début du projet. De plus, dans ce cas de figure, la durée du contrat d'exploitation est de l'ordre de 25 ans, alors que traditionnellement, les contrats sont renouvelés régulièrement (contrat d'un an renouvelable 2 fois). La situation donnant un horizon de long terme est propice à la création d'une base de données riche et fiable des équipements dans leur contexte.

État des lieux du DOE

Dans tous les cas, il est primordial de définir correctement les usages en phase d'exploitation, afin de ne considérer que les données nécessaires avec le niveau d'information adapté. Le but est de ne pas noyer l'exploitant dans une information trop riche, inexploitable et qu'il ne peut pas maintenir à jour, au fur et à mesure des modifications.

De nos jours encore, le DOE reste une mission contractuelle, mais dont le contenu semble systématiquement insatisfaisant au regard des interventions à réaliser et des connaissances à posséder pour intervenir rapidement en toute sécurité. En voici quelques raisons :

Constat	Commentaire
DOE établi par le constructeur	Mission contractuelle, mais qui ne profite pas au constructeur
Le constructeur privilégie volume et quantité	La qualité de l'information s'en ressent alors qu'elle est primordiale
Pas de processus de récolement adapté	Le dernier indice EXE passe directement au statut DOE
Pas ou peu de vérification par la MOE	Absence de compétences disponibles en fin de chantier, plus de budget
Pas de composition type (norme ou standard)	Classement par lot plutôt que par logique exploitation (mais pas d'expression de besoin non plus)

Recommandations pour le DOE numérique d'un bâtiment

La confiance dans le DOE numérique d'un ouvrage s'établit par les critères suivants :

- **Structuration.**
- **Localisation.**
- **Fiabilité et Intégrité.**
- **Unicité.**

Pour cela, les recommandations sont les suivantes :

- Tous les composants doivent être nommés et classés selon une structure organisée en systèmes, afin de pouvoir naviguer au sein d'une arborescence fonctionnelle et opérationnelle.
- Tous les équipements de tous les lots doivent être modélisés et bien localisés (local, étage, bâtiment...).
 - Il n'est pas nécessaire d'avoir la géométrie exacte des équipements (l'enveloppe est souvent suffisante, y compris l'enveloppe de l'équipement ouvert et les zones à laisser vacantes pour une intervention).
 - Il n'est pas nécessaire d'avoir une géolocalisation précise. Les tolérances d'implantation ne sont pas indispensables, y compris dans les faux planchers, les faux plafonds ou les chemins de câbles.
 - Il n'est pas nécessaire de représenter les câbles dans leur chemin de câbles. Seules les boîtes de dérivation et les terminaux doivent être représentés (c'est là que les problèmes arrivent !).
- Les maquettes TQC doivent avoir un poids inférieur à 300 Mo, afin que les temps de manipulation, d'ouverture et de traitement soient raisonnables, mais aussi pour des raisons de stockage.
- Le niveau de détail des objets de la maquette ne doit pas dépasser le LOD300 ou ND3 alors que le niveau préconisé est généralement bien supérieur (voir chapitre 7.2 suivant).
- Le renseignement des propriétés des objets doit être adapté aux usages.
 - L'appartenance à un système est indispensable, ainsi que la filiation (parents/enfants d'un même système, ce qui permet d'alimenter les synoptiques, ainsi que les schémas des coffrets électriques et tableaux divisionnaires).

Réversibilité des données du DOE

- La performance du composant ou du système (lors du changement d'un composant, il est nécessaire de connaître les performances attendues afin de le remplacer par un équipement adapté).
- Les propriétés indispensables doivent être correctement renseignées et limitées aux usages (lors d'une intervention ou du remplacement d'un composant, la mise à jour des propriétés est généralement laborieuse).
- Une photo peut accompagner l'objet, dans la mesure où il représente l'objet dans son contexte (une image d'une armoire a peu d'intérêt, sauf si l'image représente l'armoire au milieu de tous les autres équipements d'un même local, afin de comprendre son encombrement global et son accessibilité avant intervention).
- La donnée doit être fiable, c'est à dire juste et mise à jour au fur et à mesure qu'elle évolue.
- La responsabilité des données et des métadonnées doit être identifiée, et les modifications tracées.
- Il ne doit y avoir qu'une seule source de vérité. C'est pourquoi la donnée doit être unique (mise à part sa sauvegarde) pour éviter toute perte de confiance à la suite d'un constat d'écarts de valeurs entre deux propriétés identiques mais avec des valeurs différentes.

La notion de réversibilité des données concerne la capacité de :

- changer d'outil de GMAO (pour des raisons d'obsolescence d'outil ou de disparition de l'éditeur du logiciel) ;
- changer de mainteneur (attribution du contrat FM à un autre prestataire qui utilise d'autres outils).

Cette notion de réversibilité est de plus en plus fréquemment exigée des clients, ce qui demande une réflexion sur :

- la pérennité des formats de données (privilégier des formats neutres, non-propriétaires, comme les IFC) ;
- la classification utilisée (privilégier un standard international comme Omni-Class, UniFormat ou des dérivés, même si ces classifications ne sont pas entièrement adaptées à la logique d'exploitation, mais qui simplifieront un mapping éventuel vers une autre classification).

Maintenance / Exploitation d'une infrastructure linéaire

L'exploitation et la maintenance d'une infrastructure linéaire et des ouvrages qui la composent nécessitent quelques critères complémentaires, principalement en termes de localisation.

Outre les critères identifiés dans l'exploitation et la maintenance d'un bâtiment (structuration, localisation, fiabilité, intégrité, unicité des données), la géolocalisation le long de l'axe de référence de l'infrastructure est primordiale, ainsi que la connaissance du débord par rapport à l'alignement. Cette localisation dans un repère linéaire permet de situer des zones particulières, des équipements, des désordres... et de déclencher des interventions, avec une convention très compréhensible par tous (dans la mesure où le sens de circulation des voies est également connu, pour des infrastructures séparées par une glissière ou un terre-plein central non franchissable).

La représentation 3D de cette information n'est absolument pas indispensable, puisque l'enfouissement des réseaux est connu par rapport à la surface du Terrain Naturel (TN), et donc qu'une représentation 2.5D (c'est-à-dire 2D sur un SIG + distance par rapport à la surface) est souvent largement suffisante.

La représentation 3D de certains ouvrages est parfois nécessaire, afin de mieux comprendre l'ouvrage dans son contexte et de prévoir l'accessibilité aux composants spécifiques devant être inspectés et maintenus (appuis à pot d'un tablier, position de capteurs d'auscultation...). Ces informations sont d'ailleurs souvent localisées dans le repère local de l'ouvrage lui-même. La tolérance exigée de ces représentations n'est donc pas primordiale, puisque le DOE livré avec l'ouvrage doit contenir le détail de ces équipements. Dans le cas où le DOE ne contient pas ces informations (par exemple, un ouvrage très ancien pour lequel aucun plan n'est disponible), un relevé et une rétro-modélisation spécifique à l'usage attendu, permettra d'intervenir et de satisfaire aux besoins.

D'autres représentation 3D d'ouvrages permettent de simuler certains comportements (fuite d'hydrocarbure dans un bassin de rétention d'eaux pluviales, zone d'inondation à la suite d'un évènement météorologique exceptionnel...), mais ces représentations ne nécessitent pas une précision et des tolérances serrées.

Les demandes de représentations 3D et des tolérances associées sont encore peu exprimées par les exploitants-mainteneurs, car les usages sont encore peu maîtrisés, mais aussi parce que les coûts de mise à jour des modèles 3D et des bases de données associées, à la suite des interventions et changements, restent élevés par rapport au gains apportés. C'est pourquoi, la composition du DOE numérique d'un ouvrage d'art ou d'un tunnel restent encore à définir et à généraliser.

6.4 Quelques exemples significatifs

Exemples significatifs de tolérances dans le domaine sportif

En sport, c'est bien connu, il suffit d'un cheveu, d'un ongle, d'un centième de seconde pour transformer une victoire en défaite, un record en performance banale ou vice versa. Afin d'être dûment homologués, les équipements sportifs doivent respecter des tolérances strictes pour leur homologation :

- Piscine de longueur 50m spécifiée dans texte officiel de la FINA³⁷ : la marge d'erreur est de 0 à +3cm, c'est-à-dire de 50,00m à 50,03m, mais jamais en dessous de 50,00m. On peut citer l'exemple de la piscine Antigone à Montpellier non homologuée, car trop courte.
- Piste d'athlétisme extérieure de 400m, pour laquelle il faut prendre en compte la tolérance concernant la mesure de la piste par rapport à la ligne d'arrivée, ainsi que des positions des différentes lignes de départ et des marques de repérage, qui sont de 0 à +2cm, mais jamais en dessous de 400m.

Pour chaque discipline sportive et chaque enceinte recevant des manifestations sportives et du public, de nombreux textes existent.

- Il existe des normes nationales, comme les textes de l'AFNOR :

[www.sports.gouv.fr/IMG/pdf/10 - 2020 normes sports novembre 2020.pdf](http://www.sports.gouv.fr/IMG/pdf/10_-_2020_normes_sports_novembre_2020.pdf)

et les textes de référence du ministère des Sports :

www.sports.gouv.fr/pratiques-sportives/equipements-et-sites/reglementation/article/normes-afnor

- Il existe également des normes élaborées par les fédérations internationales de chaque discipline sportive. En effet, les fédérations sportives délégataires

³⁷ FINA : Fédération Internationale De Natation

ont le pouvoir d'élaborer les règles techniques propres à leur discipline et les règles fédérales relatives aux équipements sportifs requises. Par exemple :

https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_Apparatus%20Norms.pdf

Exemples de tolérances dans le domaine des infrastructures et du génie-civil

Centrale nucléaire

De nombreux exemples peuvent être cités dans le cadre de projet de construction et qui concernent principalement des tolérances liées à des travaux réalisés en place :

- Terrassements, fondations et radiers d'ouvrages (les bases de toute construction), dont les tolérances sont surtout altimétriques (en z).
- Tassement d'ouvrages de grandes dimensions, pendant la construction, ou pendant l'exploitation en raison d'assèchement des sols par exemple.
- Tassement d'ouvrages situés sous des tunnels en cours de creusement.
- Déformations différées du béton : phénomènes de fluage et de retrait.
- Assemblage d'éléments manufacturés ou préfabriqués avec des parties d'ouvrages réalisées en place.
- ...

On citera en particulier le cas des centrales nucléaires, dans lesquelles l'implantation des platines supports a des tolérances de pose très précises. Ces platines sont encastées dans le béton (et donc mises en place dans le coffrage et les armatures en acier avant le coulage du béton). Les tolérances de positionnement des platines sont de $\pm 0.5\text{cm}$ dans les 3 axes par rapport à leur implantation théorique. En effet, sur ces platines seront soudés des supports (Fig.58), qui recevront des équipements manufacturés réalisés en usine (réseaux et conduites divers) et dont les tolérances de fabrication sont très serrées.



Fig.58 : Platines (coulées dans le béton) support du process nucléaire

Nouvelle Route du Littoral à la Réunion

Tolérance d'implantation de la carapace d'accropodes : les accropodes des digues de la nouvelle route du littoral de la Réunion sont des blocs de béton pesant 14 à 26 tonnes, avec 6 branches, enchevêtrés les uns dans les autres selon une disposition précise, et qui constituent une carapace de protection des digues contre la houle.

La tolérance de pose est très faible, car la solidité de la carapace dépend de la précision de l'imbrication des accropodes. Un relevé numérique par nuage de points est réalisé immédiatement après la pose et comparé avec le modèle théorique, par une analyse visuelle. Si la tolérance n'est pas respectée, l'accropode est repositionné (Fig.59).

À la suite d'un cyclone, certains accropodes ont été détériorés ou déplacés. De nouveaux relevés numériques ont été réalisés et analysés. Les blocs endommagés ont été remplacés et d'autres ont été repositionnés afin de respecter les tolérances initiales.

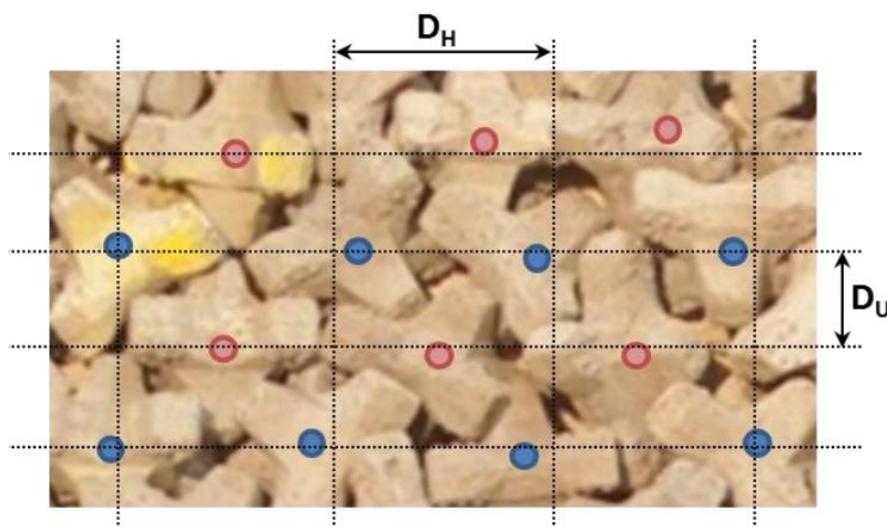


Fig.59 : Maille théorique de pose d'une carapace d'accropodes

Troisième Pont d'Abidjan

Tolérance d'implantation des massifs d'ancrage : analyse de l'encombrement potentiel des massif d'ancrage des glissières de sécurité et de signalisation, au regard des réseaux enterrés peu profonds.

Représentation graphique :

- des réseau enterrés peu profonds ;
- de l'enveloppe des massifs de fondation des panneaux de signalisation et des massifs d'ancrage des glissières de sécurité.

Les collisions sont détectées automatiquement par le logiciel (Fig.60) et des décisions sont prises pour éviter tout risque d'endommagement des réseaux. Si des risques minimes restent identifiés, les massifs concernés demeurent des points d'attention particulière pendant l'exécution des travaux sur site.

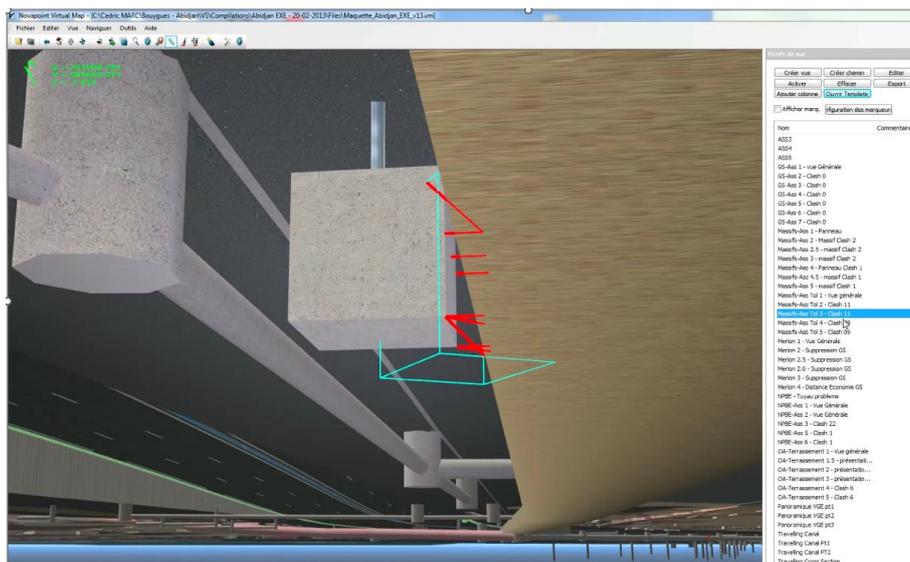


Fig.60 : Collision probable entre enveloppe des massifs d'ancrage de panneau de signalisation et réseaux enterrés peu profonds (©Vianova pour Bouygues TP, 2016)

**Projet Ligne I4 du GPE –
Puits Glarner utilisé
pour le montage et le
lancement du tunnelier**

Descente des éléments de tunnelier dans un puits encombré : analyse des collisions potentielles entre les éléments du tunnelier et la géométrie réelle du puits de démarrage du creusement du tunnel, étayé par de nombreux buttons de soutènement des parois moulées (Fig.61).

Représentation graphique :

- des éléments du tunnelier avec les équipements mobiles de descente (palonniers, attaches...);
- de la géométrie exacte du puits avec les buttons de soutènement des parois.

Détection de collisions molles, c'est-à-dire de collision entre des objets dont la géométrie est augmentée de tolérances (enveloppe plus large que le réel), afin de compenser les écarts de manœuvre du grutier.

Cette analyse permet de prendre des décisions quant aux :

- modes opératoires de descente des éléments dans le puits ;
- équipements de sécurité à mettre en œuvre ;
- ressources et moyens à mobiliser pour faciliter les manœuvres délicates.



Fig.61 : Descente d'éléments de tunnelier dans le puits Glarner de la Ligne 14 du GPE
 (© Céline Clanet pour Bouygues TP, 2015)

Dépollution de sols

Afin de maîtriser la phase de terrassement et les optimisations du mouvement des terres, des campagnes de reconnaissance des déblais sont réalisées au préalable. Avant l'exécution des travaux, deux types de classification sont définies :

- un suivi géotechnique : permettant d'obtenir une caractérisation géotechnique des déblais permettant ainsi de définir la nature du terrain.
- un suivi environnemental : permettant de confirmer avant travaux la qualité des terres excavées, pour établir les filières de traitement/évacuation/réutilisation et le plan de mouvement des terres.

Un principe de représentation des zones polluées peut être un maillage de cubes (par exemple 5m x 5m x 1m de profondeur), avec une colorisation en fonction de la concentration de polluant (en général mg/kg) (Fig.62). Le calcul se fait par interpolation entre plusieurs sondages (entre 3 et 5) dans un rayon d'action limité, dont l'incertitude est réduite en fonction de la méthode d'interpolation utilisée :

- l'interpolation par le plus prochain voisin, qui consiste à utiliser la valeur de concentration du sondage le plus proche dans la maille concernée. Cette méthode est la méthode au temps de calcul le plus court, mais la moins précise.
- pondération inverse à la distance (IDW), plus précise mais qui nécessite un paramétrage correct pour obtenir une représentation spatiale interpolée fiable.
- interpolation spatiale par krigeage, la plus utilisée en géostatistique, très précise mais qui nécessite un bon ajustement du variogramme (loi de comportement du polluant dans le sol selon sa localisation) à toutes les valeurs mesurées et localisées. C'est la méthode la plus fiable mais qui représente le temps de calcul le plus long.

Ces représentations autorisent des calculs de volumes de terres polluées à extraire et traiter. Elles pourraient être utilisées en données d'entrée des engins de terrassement, afin d'automatiser les mouvements de terre et la destination des matériaux excavés.

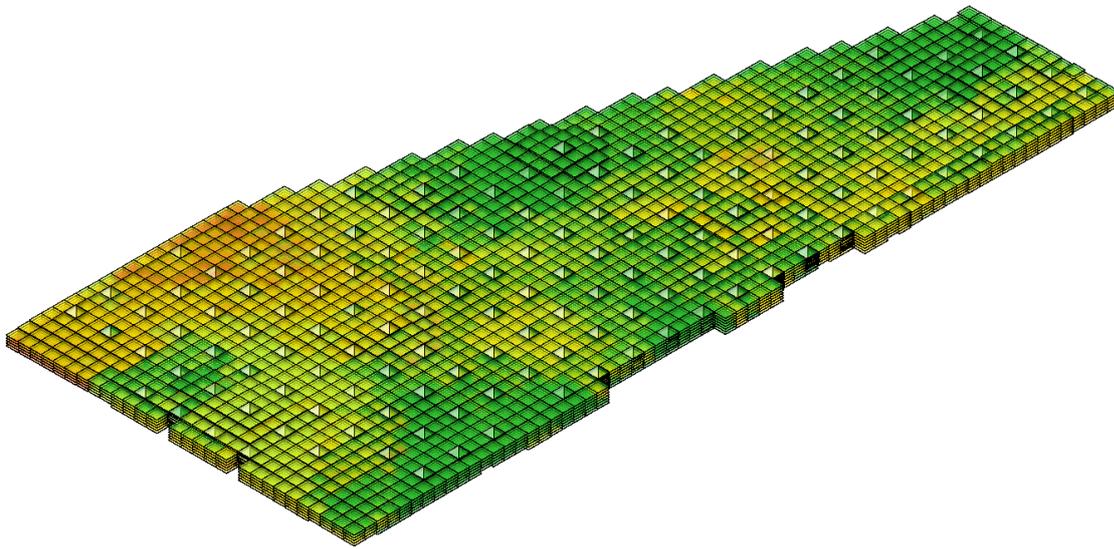


Fig.62 : Modélisation 3d de la pollution d'une zone à terrasser (interpolation par krigeage – COLAS)

Représentation de réseaux enterrés

La société Deutsche Bahn réalise actuellement un démonstrateur pour faire l'inventaire des équipements enterrés sous les voies ferroviaires du réseau national allemand. La méthode utilisée est basée sur une technologie GPR (Ground Penetrating Radar) : 6 antennes, installées sur une motrice qui parcourt les voies à 120 km/h, réalisent 20 scans/m. La précision horizontale est de l'ordre de ± 1 m par rapport à l'abscisse curviligne de la voie ferrée (point kilométrique), et la précision verticale de $\pm 10\%$. Les images radar obtenues sont traitées automatiquement et une méthodologie a été mise en œuvre pour représenter en 3D les objets identifiés.

La Fig.63 montre la représentation des équipements identifiés avec l'incertitude associée :

- chaque flèche pointe sur une position avec réflexion (un objet rencontré) ;
- la longueur de la flèche est proportionnelle à la profondeur de l'objet ;
- la couleur de la flèche représente la classe d'objet identifié (par exemple, la couleur jaune représente un tube) ;
- le cercle horizontal représente la déviation horizontale possible ;
- le carré sous l'extrémité de la flèche représente la déviation verticale possible ;
- la flèche possède des attributs qui caractérisent l'analyse.

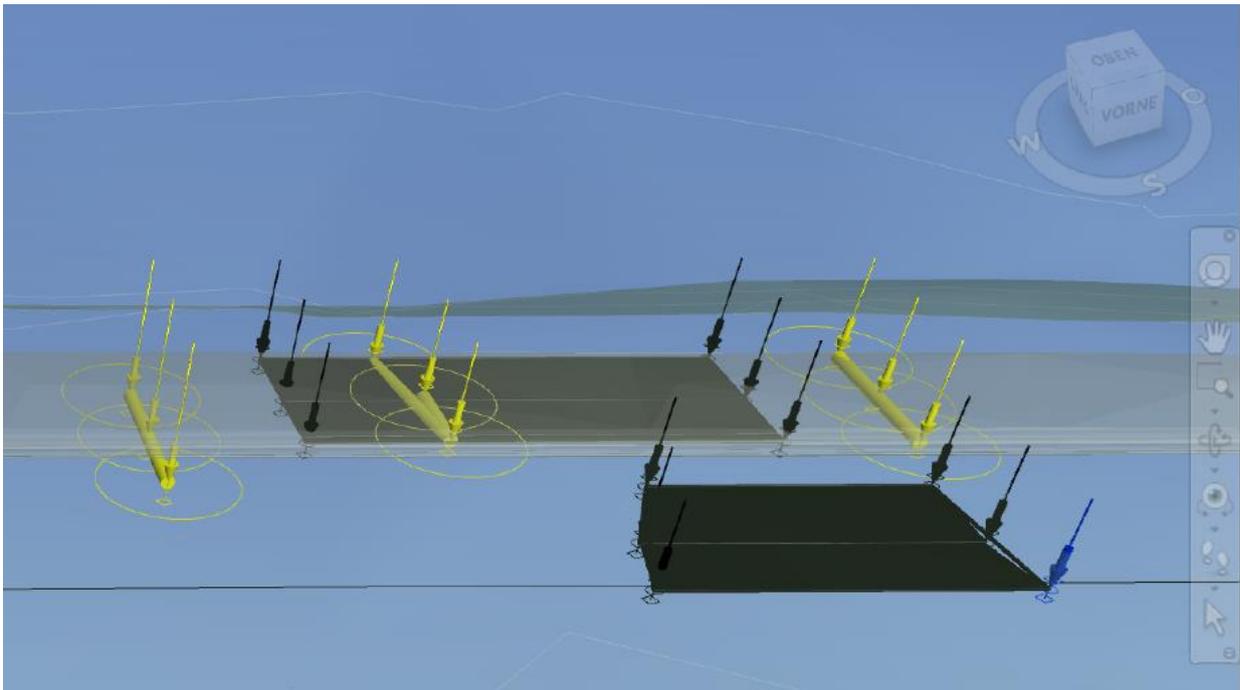


Fig.63 : Représentation des incertitudes de réseaux enterrés sous des voies ferroviaires (J.Wolf – DB Engineering GmbH)

Représentation de réseaux

On peut représenter les composants manufacturés d'un système assemblé sur site avec un code couleur destiné à donner une indication des tolérances d'assemblage (Fig.64).

- les composants du système représentés en **rouge**, sont des composants manufacturés non modifiables (vannes, raccords en T...). On ne considère alors que la tolérance de fabrication du composant en usine ;
- les composants du système représentés en **blanc** sont manufacturés et coupés à la longueur exacte en atelier, avant leur assemblage sur site. La tolérance de leur longueur est parfaitement connue et l'élément ne sera pas modifié sur site ;
- les composants du système représentés en **jaune** sont manufacturés et livrés avec une sur-longueur pour une adaptation sur site en fonction des ajustements nécessaires. Leur tolérance est connue mais pas stricte, et la longueur de l'élément sera adaptée à la configuration du site et de l'assemblage avec les autres éléments en contact.

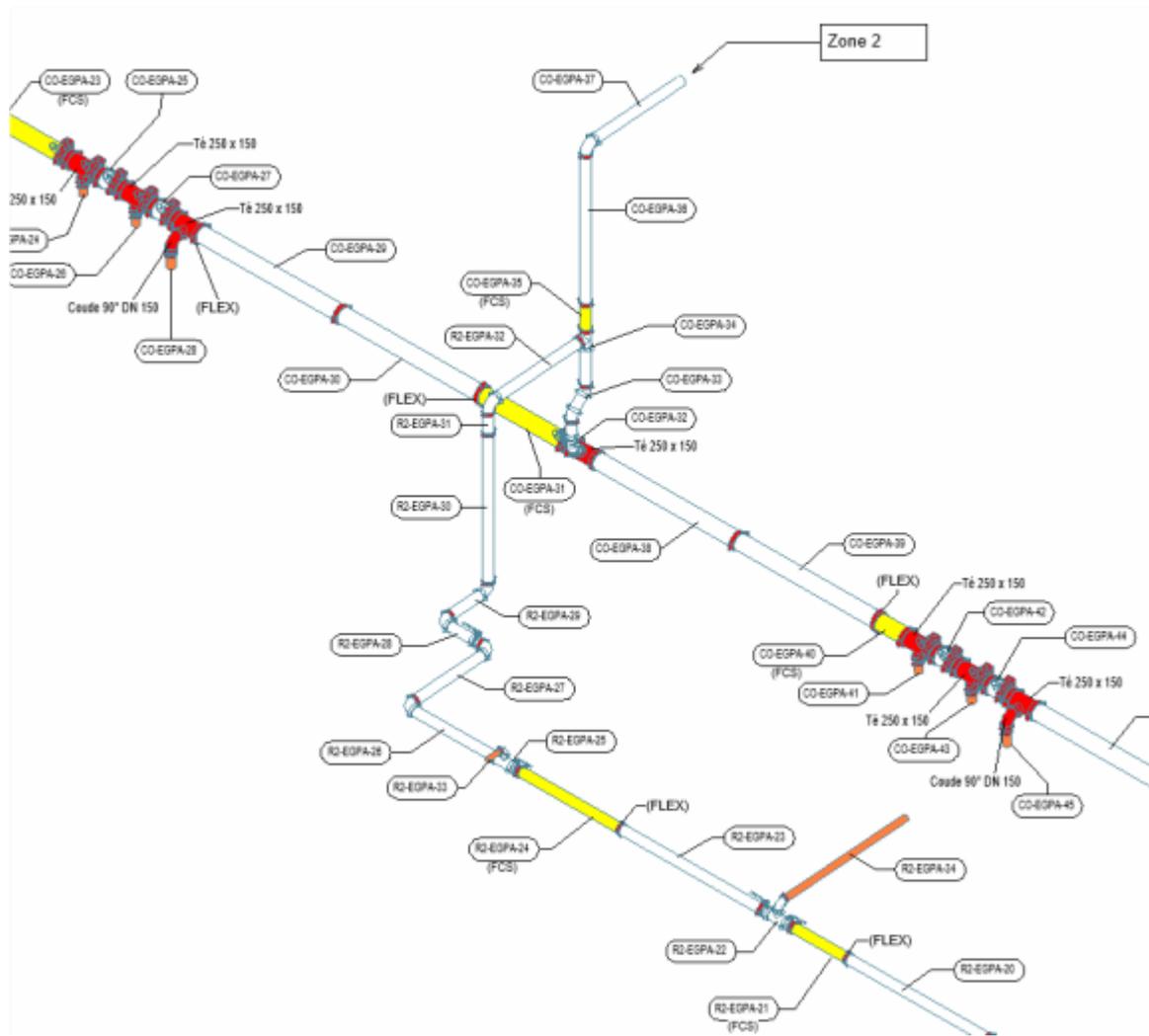


Fig.64 : Schéma de réseau (Bouygues Energie et Services)

7. NIVEAUX D'INFORMATION NÉCESSAIRE

7.1 Rappels des enjeux

Les données d'un projet

La mise en place de l'environnement commun de données associé à la gestion d'un projet oblige les acteurs à identifier, qualifier et organiser les différentes catégories d'information en fonction des besoins mais aussi des méthodes associées aux usages définis.

Il faut donc définir les types d'objets (géométriques/géographiques/données associées) pour en faire une classification puis mettre en place le système d'organisation de ces informations.

7.2 Augmentation de la précision pendant le développement

Niveau de développement, niveau de détail

Tout projet BIM doit inclure une stratégie de modélisation, conçue en fonction des objectifs préalablement définis avec le client et les partenaires. Au cœur de la stratégie, il y a une volonté de ne sélectionner que les éléments qui doivent être modélisés, et avec quel niveau de détail de représentation, en fonction de la phase considérée du projet. La qualité d'un modèle est déterminée par son LOD.

LOD peut désigner deux concepts différents, qui peuvent coïncider dans certaines situations : le niveau de développement (Level Of Development) et le niveau de détail (Level Of Detail).

- Le niveau de développement d'un modèle BIM fait référence à la quantité d'informations pertinentes pour le développement du projet et nécessaires pour prendre des décisions concrètes.
- Le niveau de détail désigne la quantité totale d'informations contenues dans l'élément BIM.

Différentes spécifications ont été développées selon les besoins et les pays.

Niveaux de développement définis par BIMForum

Au niveau mondial, la plus reconnue à l'heure actuelle est la spécification LOD développée aux États-Unis par l'organisation BIMForum³⁸. Elle s'attache à décrire différents niveaux de développement pour chaque type d'objet composant le bâti.

LOD 100 Les éléments du modèle peuvent être représentés par un symbole ou de manière générique. L'objet ne contient aucune information supplémentaire.

Niveau : concept.

LOD 200 L'objet contient une dimension paramétrique spécifique qui fait référence aux exigences d'espace dans le modèle. À ce niveau, la taille, les quantités, la forme et / ou l'emplacement sont approximativement définis par rapport à l'ensemble du projet.

Niveau : représentation sommaire.

LOD 300 Ce type d'objet contient déjà 60% d'informations. Outre ses dimensions géométriques, l'objet contient des informations fonctionnelles. C'est le niveau auquel l'élément est défini graphiquement et les autres données spécifiées sont précises : quantités, taille, forme ou emplacement par rapport à l'ensemble du projet.

³⁸ <http://bimforum.org/lod/>

Niveau : représentation précise.

LOD 400 L'objet contient toutes les informations fonctionnelles nécessaires à son développement, y compris les informations des niveaux précédents. L'objet est défini géométriquement en détail, ainsi que sa position, appartenant à un système de construction spécifique, son utilisation et son assemblage en termes de quantités, dimensions, forme, emplacement et orientation.

Niveau : fabrication.

LOD 500 L'objet contient tous les éléments d'informations vérifiées sur le terrain. Ce niveau permet la mise à jour de la maquette numérique afin d'être conforme à ce qui a été réalisé.

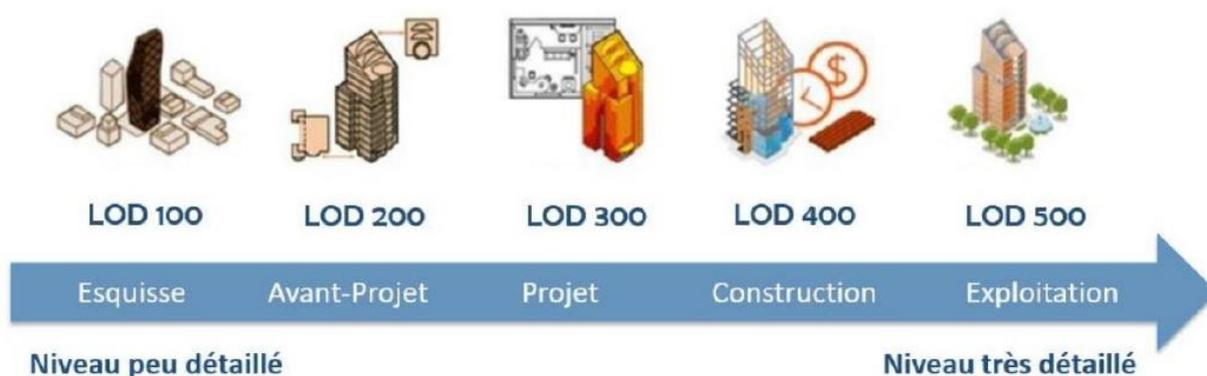
Niveau : Tel Que Construit (As-built).

Fig.65 : LOD appliqués aux IFC (selon BIMForum)

Niveaux de développement définis par Syntec Ingénierie

En France, une spécification plus synthétique des niveaux de développement par phase de projet a été réalisée par Syntec Ingénierie et publiée dans un « Cahier Pratique Le Moniteur - BIM/Maquette Numérique³⁹ ». Son objectif est de définir des exigences sur le contenu général de la maquette numérique à chaque phase et pour les différents lots de la construction.

Voici les différents Niveaux de Développement définis par Syntec Ingénierie.

ND (Niveau de Développement)	Correspondance Loi MOP
ND1	Esquisse
ND2	Avant-Projet Sommaire, Permis de Construire
ND3	Avant-Projet Détaillé, Présynthèse, PRO/DCE
ND4	Synthèse, Études d'exécution, Construction
ND5	Dossier des Ouvrages Exécutés
ND6	Exploitation

LOD pour Exploitation / Maintenance : Comme cela a été constaté au chapitre 6.3 précédent, le LOD attendu par l'exploitant est plutôt du niveau LOD300 ou ND3. Un LOD supérieur nécessite une énergie considérable pour maintenir à jour la base de données des équipements maintenus, sans valeur aucune ajoutée.

³⁹ <https://www.syntec-ingenierie.fr/wp-content/uploads/2019/06/2014-05-09-cahier-moniteur-bim-maquette-contenu-niveau-developpement.pdf>

Notion de flou

La notion de flou concerne à la fois la représentation géométrique, mais aussi la qualité des données disponibles.

Ce sujet est abordé plus en détail en Annexe A – Flou de l'information » de ce livrable.

Flou de représentation géométrique

Autrefois, sur un dessin 2D réalisé à la main, le projeteur pouvait jouer sur les épaisseurs de traits et les échelles de la représentation, voire même indiquer par un « nuage » une zone non encore définie.

Dans une représentation 3D sur un écran, la notion de flou n'existe pas. La fonction ZOOM utilisée sur un modèle géométrique vectoriel, permet de faire un gros plan infini sur un détail d'objet représenté par des pixels.

Flou de qualité des données

De plus, la qualité de la conception dépend fortement de la qualité et l'homogénéité des données disponibles. Le problème n'est pas de concevoir sans données, mais d'introduire des évaluations de la qualité des données, ou de leur manque de qualité, dans le processus de conception lui-même. Pour assembler des données dans un même modèle, il faut s'assurer que leurs degrés de précision sont compatibles. On ne peut pas assembler des LOD différents, ni des informations collectées avec des précisions géométriques différentes.

LOIN

Afin de définir le niveau de détail attendu dans une phase donnée et pour un objet donné, la notion de LOD change pour s'appeler désormais LOIN (Level Of Information Need, ou Niveau du besoin d'information), décrite au paragraphe 11.2 de la norme ISO 19650-1. En effet, la notion de LOD est controversée car les pays l'utilisent avec des dénominations et des échelles associées différentes.

La norme se dénomme **NF EN 17412-1** (Novembre 2020) : Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : Concepts et principes. Elle a été normalisée **ISO/DIS 7817** en janvier 2022.

Introduction de la norme NF EN 17412-1 ou ISO/DIS 7817

« Le présent document énonce les concepts et les principes permettant de définir le niveau du besoin d'information et les livraisons d'information dans le cadre des processus d'échange d'informations au cours du cycle de vie des actifs bâtis à l'aide de la modélisation des informations de la construction (BIM). Ces concepts et principes peuvent apporter des bénéfices clairs à tous les participants aux différentes phases du cycle de vie des actifs bâtis, car ils permettent une compréhension commune du bon niveau d'information nécessaire à un moment donné. La définition du niveau du besoin d'information vise notamment à éviter la livraison d'une quantité d'informations trop importante. Il convient que l'échange d'informations garantisse la livraison des bonnes informations pour l'objectif convenu afin de faciliter les processus de vérification et de validation. »

Contexte de la norme NF EN 17412-1 ou ISO/DIS 7817

L'échange d'informations, ainsi que les aspects associés tels que les exigences d'échange d'informations, et la livraison d'informations sont définis et expliqués dans le contexte de deux normes connexes :

- EN ISO 19650-1, 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 ;
- EN ISO 29481-1, Modèles des informations de la construction - Protocole d'échange d'informations - Partie 1 : Méthodologie et format.

Principe de la norme NF EN 17412-1 ou IS/DIS 7817

Le principe du LOIN est de définir une "boîte à outils" en réponse aux besoins du projet qui explique la nature d'un livrable, en termes de géométrie, de propriétés, de documentation, de complétude...

LOIN et EIR

C'est par cette notion de LOIN que le client définit les besoins d'informations. Le but est de réconcilier ces ensembles de vues dans un document commun harmonisé avec des définitions partagées de « Level Of... ».

Comme cela est défini dans l'EIR (Exchange Information Requirements) de la norme ISO 19650 (voir chapitre 9.2 de ce document), il convient d'utiliser le niveau du besoin d'information pour spécifier les exigences d'échange d'informations.

Le niveau du besoin d'information décrit la granularité des informations échangées en termes d'information géométrique, d'information alphanumérique et de documentation. Des objectifs différents ont leurs propres besoins en information géométrique, en information alphanumérique et en documentation.

Il convient d'utiliser le niveau du besoin d'information pour discuter et trouver un accord sur la livraison d'informations entre deux acteurs ou plus.

Le niveau du besoin d'information décrit les exigences d'informations qui peuvent être interprétées par l'homme et la machine.

Gestion des tolérances et LOIN

La gestion des tolérances relatives à une valeur est associée à l'usage des données et au niveau de tolérances accepté. En phase amont du projet, les tolérances requises seront généralement plus élevées qu'en phase d'exécution. Pour exemples :

- un nuage de points pour réaliser des études de prix ou des esquisses pourra ne pas être aussi dense ou précis qu'en phase de réalisation des travaux.
- une campagne de sondages géologiques sera approximative en phase préliminaire, et sera complétée avant le démarrage des travaux.

Cette approche peut être comparée à celle des LOIN : il s'agit avant tout d'adapter la tolérance sur une valeur aux besoins de qualité exprimés par l'utilisateur de la valeur. La tolérance associée à une valeur doit être nécessaire et suffisante à l'atteinte de l'objectif attendu.

De plus, la tolérance de fabrication d'un objet ou d'un ouvrage a une incidence directe sur le coût de fabrication de ce produit. Le coût réel de fabrication est divisé en deux parties (Fig.66) :

- Le coût de fabrication pour les produits acceptés sans défaut (CPSD).
- Le coût résiduel déterminé par les pièces rejetées, car hors tolérance.

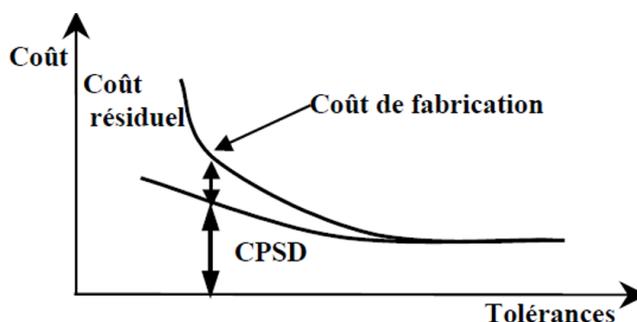


Fig.66 : Coût de fabrication en fonction des tolérances (D.Lepadatu [10])

7.3 Sobriété numérique

Sobriété numérique

La sobriété numérique (ou frugalité numérique) est une démarche qui vise à réduire l'impact environnemental du numérique en limitant les usages du numérique, c'est-à-dire :

- concevoir des services numériques plus sobres ;
- modérer ses usages numériques quotidiens.

Infobésité

Nous sommes tous surexposés à l'information numérique et confrontés à une avalanche de données. L'infobésité est une notion subjective qui décrit pour un individu, le sentiment d'être submergé par la connaissance potentielle, par le flux ininterrompu d'informations qu'il ne parvient ni à absorber ni à trier. C'est une incapacité à faire refluer le trop plein, à maîtriser son environnement documentaire.

Numérique responsable ou numérique raisonné

Le numérique responsable (ou Green IT) est une démarche d'amélioration continue qui vise à réduire l'empreinte écologique, économique et sociale des technologies de l'information et de la communication (TIC).

Le principe est d'avoir un meilleur usage des ressources en travaillant à la sobriété numérique, ou plutôt, à un numérique raisonné. Par exemple, l'intelligence artificielle conçue de manière responsable, permet, en traitant des volumes très importants de données, de développer des solutions innovantes (par exemple pour diminuer les mouvements de terres d'un chantier de terrassement) avec un impact moindre sur l'environnement.

La donnée et son usage

Le niveau de détail d'une information est lié à son usage.

Par exemple, il n'est pas souhaitable d'échanger une donnée géométrique avec un niveau de détail élevé, alors que seule l'enveloppe de l'objet ou une représentation simplifiée est suffisante pour son usage par le destinataire de cet échange (cf Fig.67).

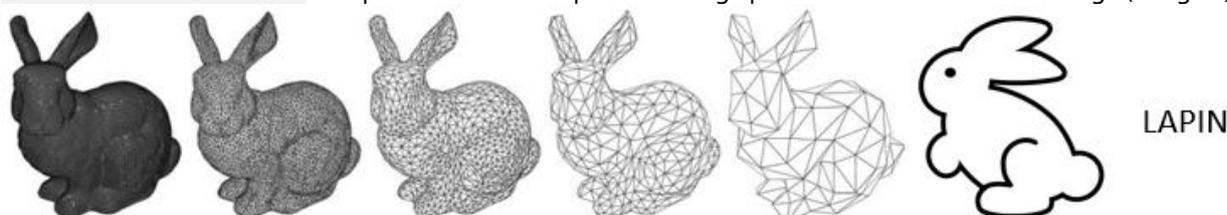


Fig.67 : Principe de sobriété numérique : simplification du modèle jusqu'à sa plus simple expression, en fonction des usages

Notion de « suffisance »

Une information trop riche surcharge les échanges et « pollue » le destinataire avec une donnée non adaptée à son utilisation. C'est le principe de la « suffisance » : ne livrer que ce qui est nécessaire et suffisant, pas moins, pas plus.

Il est donc nécessaire de définir pour chaque usage, chaque phase de développement et chaque acteur, le niveau d'information attendu. C'est le principe-même des LOIN (Niveau du besoin d'information - Chapitre 7.2) et de l'EIR (Besoin d'échange d'Information - Chapitre 9.2).

Pour cela, l'EIR permet de définir le niveau d'information nécessaire de chaque donnée attendue par chacun des acteurs d'un projet, et cela en fonction de la phase de développement de ce projet.

Smart Data vs Big Data

Les entreprises utilisent de plus en plus les données récoltées pour déterminer leurs stratégies marketing, concurrentielles et globales. Données structurées ou

Big Data

non, pertinence des informations, données intelligentes ou mégadonnées : comment distinguer le smart data du big data ?

Big data signifie en français « mégadonnées ». Il désigne un important volume de données qui est produit au quotidien par des capteurs et IoT.

Pour collecter les données du Big Data, on prend en compte la règle des 3V :

- **Volume** : capacité de traiter des données en masse (étant donné le volume de données, les calculs ne peuvent donc plus être concentrés au même endroit).
- **Variété** : capacité de traiter des données brutes, semi-structurées ou non structurées, de sources variées.
- **Vélocité** : capacité de traiter et de partager rapidement les données, au rythme de leur production. Pour réduire le temps de connexion, les données doivent donc se trouver le plus proche possible de l'endroit où elles seront utilisées.

Smart Data

L'expression Smart Data signifie « données intelligentes ». Il s'agit d'un traitement des données stratégiques qui consiste à sélectionner les informations les plus pertinentes parmi le volume important de données possédées, dans un délai assez court.

Pour collecter les données du Smart Data, on prend en compte la règle supplémentaire des 2V :

- **Véracité** : afin d'éviter des erreurs dans les futurs calculs, la fiabilité des données doit être assurée en permanence, au moment de la collecte ou de leur utilisation.
- **Valeur** : capacité de se concentrer sur les données qui apportent une valeur ajoutée et de laisser de côté les autres informations.

Il est également primordial de tenir compte du règlement général sur la protection des données (RGPD). L'objectif est de vérifier que les données récoltées et triées sont bien en règle avec les normes européennes concernant les données personnelles.

Complémentarité

Le Smart Data peut être vu comme une évolution logique du Big data. Le Big data récupère automatiquement une grande quantité de données non structurées, alors que le smart data prend la peine de faire un tri intelligent de ces données avec un algorithme spécifique. Les données du smart data sont donc plus exploitables que celles du Big data. Par conséquent, les deux approches sont complémentaires : les deux approches doivent être utilisées pour obtenir de meilleurs résultats.

Data Lake et Data Warehouse

Les termes Data Lake et Data Warehouse sont utilisés très couramment pour parler du stockage des Big data, mais ils ne sont pas interchangeables.

- Un Data Lake est un vaste gisement (lac) de données brutes non transformées dont le but n'a pas été précisé.
- Un Data Warehouse est un référentiel de données structurées, nettoyées et filtrées qui ont déjà été traitées et qualifiées dans un but spécifique.

Structure des données
Objectif des données
Utilisateurs
Accessibilité

Data Lake	Data Warehouse
Brutes	Traitées / Transformées
À déterminer	Données actives
Data scientists	Spécialistes métiers
Accès facile, mises à jour rapides	Modification complexes et coûteuses

Data Lake ou Data Warehouse ?

Les grandes différences en matière de structure, de processus, d'utilisateurs et d'agilité générale rendent chaque modèle unique et spécifique. En fonction des

besoins spécifiques, le choix d'un data lake ou d'un data warehouse adapté sera déterminant pour la performance d'un projet ou d'une entreprise.

- Pour un projet en cours de construction : le data lake est parfaitement adapté pour des analyses en fonction des besoins immédiats du chantier, pour répondre à des demandes qui n'avaient pas été identifiées à l'avance.
- Pour un ouvrage en cours d'exploitation : le data warehouse est parfaitement adapté pour évaluer des performances et constater des tendances. Le data warehouse stocke moins de données mais elles sont plus intelligentes.
- Pour une entreprise qui gère de nombreux projets : le data warehouse est plus adapté pour comparer des résultats et des performances entre plusieurs projets, puisqu'il s'agit alors de comparer des indicateurs déterminés. Mais un data lake permet également de chercher de nouveaux indicateurs et donc des pistes de progrès.

Besoin d'information liée à l'usage

Le besoin d'information est lié à son usage. Quelques règles de bon sens permettent de limiter le volume de données échangées :

- n'échanger que ce qui est suffisant : il faut donc savoir d'abord ce qui est juste suffisant au destinataire de l'échange ;
- réduire les échanges de données : mettre à disposition les données sur une plateforme collaborative ou un CDE, et informer les utilisateurs potentiels de leur livraison (mais surtout ne pas envoyer par mail des fichiers lourds à plusieurs destinataires) ;
- structurer les données pour faciliter leur filtrage (en particulier au moyen des MVD pour les fichiers au format IFC – Voir ci-dessous) et permettre des analyses rapides d'indicateurs.

IDM

L'Information Delivery Manual (IDM⁴⁰) est une méthode développée par buildingSMART permettant de spécifier précisément les processus et les informations échangées à chaque étape d'un projet de construction, voire sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage.

Cette méthodologie permet de documenter tout type de processus. Elle décrit le type, le format et le contenu des informations que les intervenants doivent s'échanger.

L'objectif principal d'un IDM est d'assurer que les données nécessaires sont bien transmises d'un acteur à un autre, afin de permettre l'exécution des tâches successives et de parvenir à l'établissement d'un processus défini.

Le développement d'un IDM se base sur les informations suivantes :

- le cas d'usage traité ;
- les acteurs et les rôles impliqués ;
- l'environnement informatique ;
- les conditions contractuelles.

Les IDM sont définis par la norme ISO 29481-1:2010 "Building information modeling - Information delivery manual - Part 1 : Methodology and format"

MVD

Le schéma IFC est un modèle conceptuel de données orienté objet qui se présente sous la forme d'un ensemble de classes d'objets et de relations. L'ensemble des objets et des relations qu'il est possible de décrire à l'aide d'un IFC, n'est pas toujours utile pour répondre à un cas d'usage défini.

⁴⁰ <http://iug.buildingsmart.org/idms>

Un IDM permet d'identifier les informations utiles à un cas d'usage. Mis en relation avec les objets et les relations qui existent dans un modèle de données IFC, un IDM permet de définir une vue spécifique. Ce sous-ensemble du modèle IFC est appelé Model View Definition (MVD). Il contient seulement les informations utiles et nécessaires.

Un MVD peut être créé à l'aide d'outils informatiques spécifiques tels que ifcDoc⁴¹, sur la base des exigences d'un IDM. Le contenu d'un MVD peut être enregistré et échangé dans un format spécifique mvdXML.

DOE Numérique

À la fin d'un chantier, la maîtrise d'œuvre doit remettre au maître d'ouvrage le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE) qui est la base documentaire de l'ouvrage tel qu'il a été construit et qui comprend donc :

- les plans conformes à la réalisation,
- les notices techniques,
- les notes de calcul,
- les matériaux utilisés,
- tout autre document rendant compte de sa conception et de sa construction.

Besoins Exploitant / Mainteneur

Les besoins du mainteneur et les besoins de l'exploitant sont différents :

- Le mainteneur a la charge du « bien-être de l'ouvrage ». Ses besoins sont donc orientés connaissance et gestion du patrimoine bâti pour répondre à des besoins de performance des équipements, d'évolution, de réparations, voire même des opérations de déconstruction.
- L'exploitant a la charge du « bien-être des usagers ». Ses besoins sont donc orientés performance des services apportés aux utilisateurs de l'infrastructure, en termes de sécurité, de confort, de qualité...

La structuration des données et les besoins de niveaux d'information (fiabilité, précision, documentation, niveau de détail) ne sont donc pas les mêmes, et très différents des besoins des ingénieries et des entreprises de construction dans les phases précédant la livraison de l'ouvrage.

Éléments du DOE en marchés publics

L'ensemble de la filière s'accorde à dire qu'il est difficile de retrouver une information pour un ouvrage quand celle-ci est en format papier. Le numérique, même s'il doit être organisé, permet de gagner en fiabilité et en temps.

DOE Numérique

Le DOE numérique vient conclure tout le travail fait en BIM par les équipes en amont de la livraison de l'ouvrage. À terme, il devrait remplacer le DOE papier qui reste obligatoire aujourd'hui. Le DOE numérique est la maquette numérique du projet enrichie de toutes ses données de conception et d'exécution.

Afin de rendre cette pièce devenue maîtresse exploitable, il est nécessaire d'y implémenter :

- les données nécessaires pour suivre les exigences contractuelles exprimées dans le contrat de performance ;
- les données nécessaires à la maintenance de l'ouvrage ou de l'infrastructure ;
- des données fiables et structurées, faciles à retrouver.

Pour remplir son rôle, le DOE doit donc faire l'objet d'un travail extrêmement structuré. Un DOE conforme au Tel Que Construit – As Built - pourra être remis au maître d'ou-

⁴¹ http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/accompanying-tools/ifcdoc/application/ifcdoc-application-v1.1.9/at_download/file

vrage, dans un format de données pérenne et ouvert (compatible avec d'autres systèmes de gestion de données). Il est aussi à noter qu'un travail de mise à jour permanent du DOE doit se faire en phase exploitation/maintenance car il faut pouvoir compter sur une base de données structurée, fiable et à jour.

Dans tous les cas, la constitution d'un DOE fiable nécessite un nettoyage de la base de données, afin de ne livrer que ce qui est réellement nécessaire aux opérations de maintenance et d'exploitation, sans oublier les autres étapes probables de la vie de l'ouvrage (élargissement, réversibilité, déconstruction...).

8. NOTIONS DE QUALIFICATION ET DE VALIDATION D'ATTRIBUTS

8.1 Contrôles automatiques

Contrôle d'une maquette numérique

Le processus de contrôle d'une maquette numérique doit être rigoureux et exhaustif, afin d'instaurer la confiance entre les partenaires qui utilisent cette maquette ou ces maquettes pour des usages différents et à différents stades de développement du projet.

Certains contrôles visuels peuvent être envisagés. Après agrégation de plusieurs maquettes, on peut facilement vérifier :

- l'affichage de toutes les maquettes ;
- la bonne géolocalisation de toutes les maquettes (vérification grossière que le point de repère est le même pour tous les modèles importés) ;
- la bonne altimétrie de toutes les maquettes ;
- la même unité pour toutes les maquettes (incohérences lors de l'agrégation de modèles aux unités métriques et de modèles aux unités anglo-saxonnes).

Mais pour des vérifications plus précises, qu'elles concernent la géométrie ou des attributs d'objets, de nombreux logiciels sont désormais disponibles pour contrôler automatiquement les valeurs au regard des attentes exprimées dans la convention BIM ou le Plan d'Implémentation du BIM sur projet.

Outils logiciels

Voici quelques exemples de logiciels (liste loin d'être exhaustive) de contrôle automatique de maquettes. La liste des fonctionnalités évolue à chaque nouvelle version. Elle est décrite sur le site Internet de chacun des éditeurs de logiciel cités. Selon le logiciel, il peut être utilisé en mode SaaS sur le cloud ou en mode autonome, et peut contrôler des formats de fichiers spécifiques propriétaires ou des fichiers IFC.

Nom du logiciel	Éditeur
usBIM.checker	ACCA Software
Solibri office	Nemetschek
SimpleBIM	Datacubist
Icheck	Bureau Veritas Solution
Navisworks Manage	Autodesk
...	

Processus

Plusieurs outils logiciels existent donc sur le marché pour réaliser des contrôles automatiques d'analyse de qualité et de fiabilité des données, et de nombreuses entreprises ont développé leur propre outil interne pour leurs besoins.

Le principe est basé sur la même logique : l'outil scanne tous les attributs des objets d'une maquette 3D et les compare à des règles de qualité attribuées à des familles d'objet.

Par exemple, l'outil vérifie que la classe de résistance du béton est définie pour chaque élément de structure et que sa valeur fait partie d'une liste alphanumérique complète du type C8/10 C12/15 C16/20 C20/25 C25/30 C35/40...

Liste des règles à respecter pour la validation des attributs des objets d'une maquette numérique

L'outil donne une alerte si la règle n'est pas respectée (valeur absente ou nulle, valeur non comprise dans la liste fermée attendue ou autre), et génère un rapport de cohérence entre les données du fichier et la liste de contrôle.

Pour valider les attributs des objets d'une maquette numérique, la liste des règles à respecter est la suivante :

- L'attribut existe (avec le bon nom, dans la bonne langue).
- L'attribut est renseigné (une valeur est renseignée, le champ n'est pas vide, le champ n'est pas un caractère « espace »).
- La valeur de l'attribut respecte le format attendu (caractères numériques, caractères alphanumériques, respect du nombre de caractères, booléen ou autre).
- La valeur de l'attribut est dans la liste fermée des valeurs attendues.
- La valeur est dans la plage de valeurs attendues (avec éventuellement une tolérance sur la valeur).

Gestion des collisions et des manques

La détection des collisions géométriques entre objets et la détection des attributs non ou mal renseignés nécessitent une gestion rigoureuse afin de :

- résoudre tous les conflits au sein de la maquette, avant de les rencontrer sur le chantier ;
- renseigner et corriger tous les champs d'attributs manquants, afin d'obtenir une base données fiable et à jour dans le but de réaliser des inventaires, de passer des commandes... et de renseigner le DOE livré avec l'ouvrage construit.

Cette gestion doit être décrite dans la convention BIM (nommage du conflit, indicateur du statut de résolution, affectation pour sa résolution...), afin d'obtenir un tableau de bord de l'avancement global du processus de validation des objets et de leurs attributs.

8.2 Critères d'acceptation

Pourcentage d'acceptation

Étant donné le nombre d'attributs à vérifier, les outils de contrôle automatique sont capables de donner un ratio de qualité de la maquette 3D analysée.

Par exemple, la société Socotec (certification de conformité BIM d'une maquette, basée sur la solution Solibri Office) donne :

- Un pourcentage admissible de champs non ou mal renseignés (par exemple, le modèle est validé si 80% des contrôles sont bons).
- Des non-conformités critiques : au-delà de 5 non-conformités critiques, le modèle n'est pas validé.

Indicateur d'état de validation

On peut donc définir un indicateur d'état de validation d'une maquette numérique, c'est-à-dire un pourcentage permettant d'avoir le degré de validation des attributs d'une maquette numérique.

Le principe est de calculer le ratio des attributs correctement renseignés par rapport à l'ensemble des attributs des objets du modèle à un instant donné. Cela signifie que ce ratio peut augmenter ou diminuer au fur et à mesure de la conception (nouveaux objets sont modélisés ou intégrés à la maquette fédérée) ou au fur et à mesure de la construction sur

Exhaustivité et échantillonnage

Pondération des critères

le chantier ou de l'intégration dans les ouvrages construits (éléments As-Built et équipements réellement mis en œuvre). Le but étant bien sûr d'obtenir une maquette dont le ratio tend vers 100% d'attributs correctement renseignés au regard des valeurs attendues (voir la « liste des règles à respecter » du paragraphe précédent). Des tableaux de bord indiquent alors le ratio global de complétude, afin de suivre la résolution des manques ou des valeurs non conformes pour la maquette globale et chacun des modèles fédérés (Fig.68 et Fig.69).

Le contrôle automatique permet un contrôle des attributs au regard de valeurs attendues, mais un échantillonnage par un contrôleur peut être envisagé afin de vérifier la justesse des informations saisies (qu'une machine ne saurait pas évaluer).

De plus, une pondération des critères d'analyse peut être proposée, afin de s'affranchir de certaines erreurs non critiques. Pour cela, il faut distinguer les champs obligatoires des champs recommandés ou des champs optionnels.

MODEL DATA VALIDATION REPORT

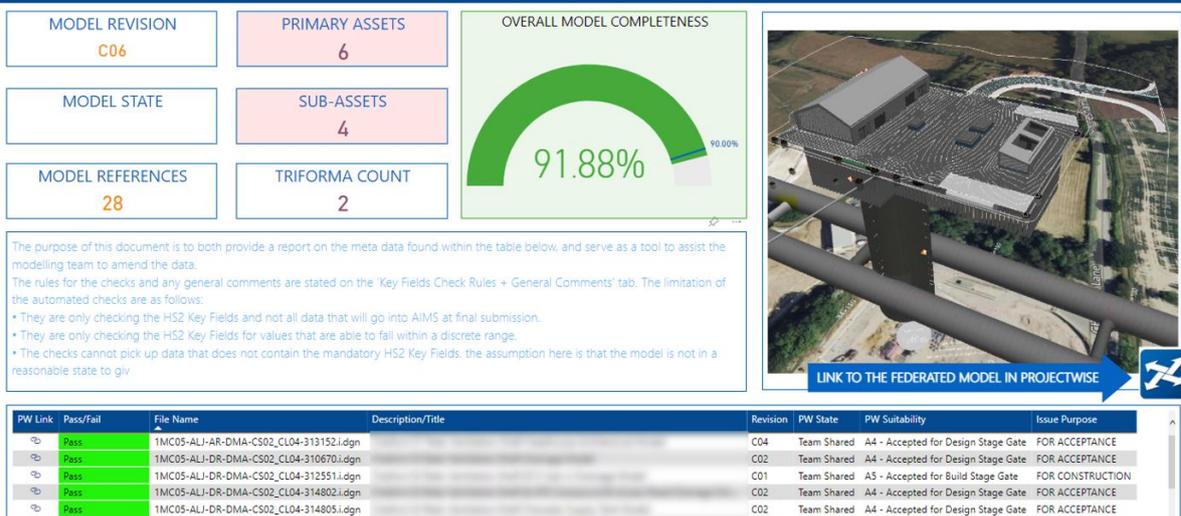


Fig.68 : Tableau de bord de suivi de la complétude de la maquette numérique globale d'un projet (AlignJV)

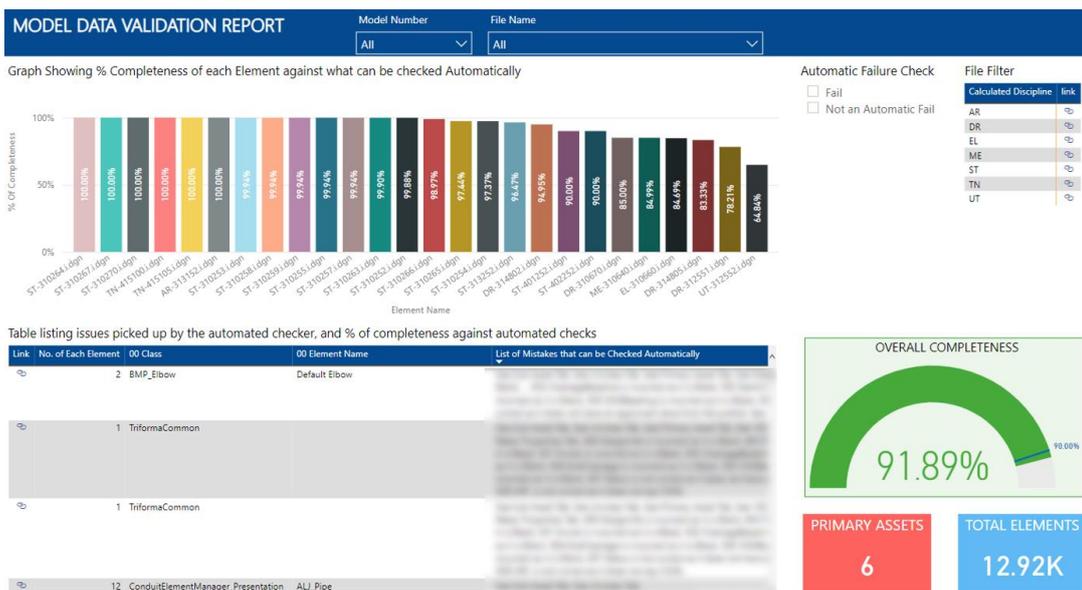


Fig.69 : Tableau de bord de suivi de la complétude des modèles fédérés dans une maquette globale (AlignJV)

9. RECOMMANDATIONS POUR LA FILIÈRE INFRA

9.1 Modes de représentation dans un modèle IFC

IFC et tolérances

Comme cela a été présenté au chapitre 6.2, un PropertySet est proposé pour décrire la notion de tolérance dans les classes IFC. Ce PropertySet n'est actuellement jamais implémenté car l'usage en est encore limité dans le secteur de la construction et parce que le sujet est complexe : les tolérances sont différentes selon les formes géométriques, et la tolérance doit être attribuée à chaque mesure, mais pas systématiquement à chaque dimension.

La valeur représentée graphiquement est la valeur nominale, c'est-à-dire la valeur attendue. Il faudrait donc imaginer un mécanisme pour identifier la valeur nominale et la valeur mesurée (valeur nominale + écart).

L'exemple d'un voussoir de pont a été étudié, afin de représenter le voussoir avec ses écarts de construction, le fluage du béton du jour J et les estimations des fluages à venir. La solution proposée a été de définir un nouvel objet spécifique « Tolérance » dans le dictionnaire de donnée de buildingSMART. Mais le concept est encore à approfondir.

Cet objet « Tolérance » associée à un objet, représenterait l'écart admissible associé à la forme de l'objet (et non pas une tolérance sur chaque mesure), qu'il faudrait donc plaquer à l'objet nominal théorique.

La figure Fig.70 montre l'exemple de 2 cubes à accoler pour réaliser un parallélépipède (pavé nominal). Pour cela, on introduit un objet « écart » qui représente l'objet nécessaire pour compenser les erreurs du premier cube, afin de représenter le pavé Tel-Que-Construit.

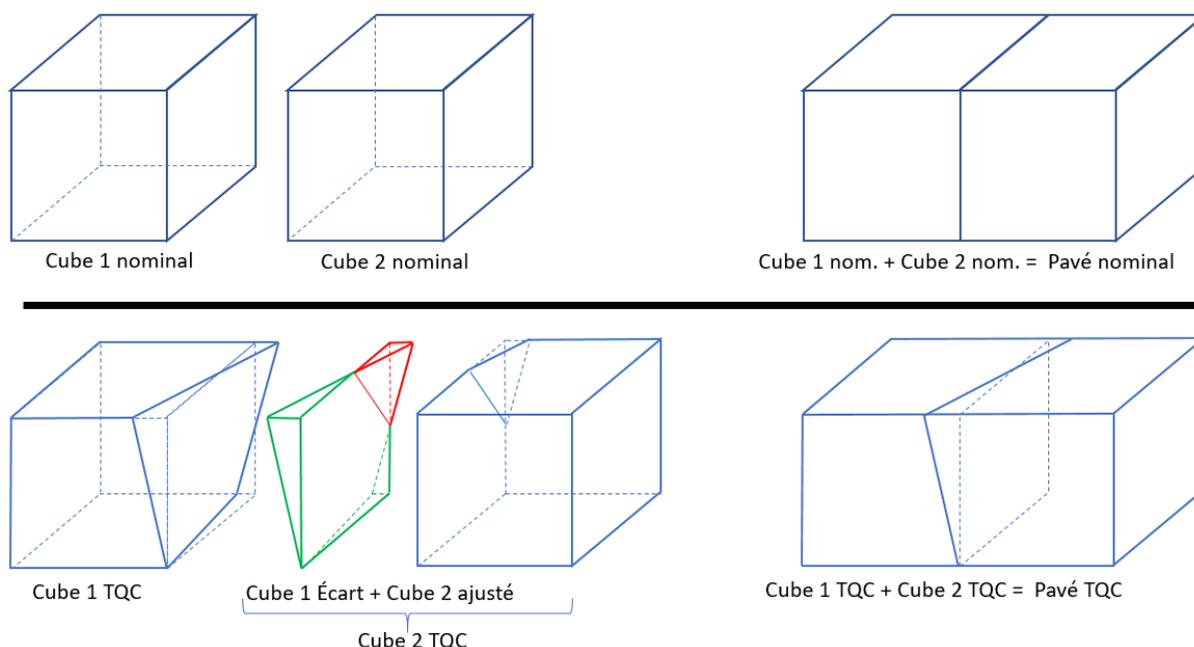


Fig.70 : Recherche sur la représentation des écarts en IFC

9.2 Exigences et Modèles dans le contexte de la norme ISO 19650

La série des normes NF EN ISO 19650

Les exigences de la norme

La série des normes ISO 19650 précise les différents modèles numériques nécessaires à l'échange d'informations pour un projet entre une « partie désignante » (par exemple un maître d'ouvrage) et une « partie désignée » (par exemple un maître d'œuvre, un bureau d'études, une entreprise...). Les différents cas de la figure Fig.71 représentent les différentes exigences d'information (IR – Information Requirements) et les modèles d'informations (IM – Information Models) attendus.

Quatre types d'exigences sont identifiés⁴² :

1. Les OIR – Organizational Information Requirements. Il s'agit des exigences « de haut niveau » exprimées par l'organisateur du projet (par exemple le maître d'ouvrage). Elles peuvent porter sur l'empreinte carbone de l'ouvrage, sur des objectifs de matériaux recyclés, sur le respect de la biodiversité d'un ouvrage linéaire...
2. Les AIR – Asset Information Requirements. Il s'agit des exigences d'informations portant sur l'actif bâti pour la phase d'exploitation et de maintenance. Elles décrivent par exemple la dénomination des différents locaux, la localisation des équipements techniques, les spécifications des systèmes d'éclairage...
3. Les PIR – Project Information Requirements. Il s'agit des exigences d'informations en lien avec la livraison de l'actif bâti. Elles portent sur les phases de conception et de réalisation du projet. Elles décrivent par exemple le géoréférencement de l'ouvrage, les spécifications des travaux à réaliser, les contraintes acoustiques du site...
4. Les EIR – Exchange Information Requirements. Il s'agit des exigences d'échanges d'informations. Elles regroupent l'ensemble des exigences exprimées dans les OIR, AIR, PIR et portent sur la fourniture d'informations relatives à des ouvrages, des produits ou des services. La partie désignante (par exemple le maître d'ouvrage) exprime dans les EIR l'ensemble des informations qu'elle attend, à quel moment, avec quel niveau de développement, les moyens utilisés pour leur délivrance ainsi que tout le processus de production, de partage et de publication des informations. Les contrôles des informations lors des échanges sont également décrits. Ils permettent de vérifier et de valider les informations échangées. En France, les EIR peuvent correspondre à un cahier des charges BIM portant sur l'ensemble des informations délivrées (maquettes, notices, plans, plannings, nomenclatures, fiches produits...).

EIR et OIR relèvent de la vision opérationnelle d'un ouvrage au sens de l'ingénierie des systèmes.

Les modèles d'informations de la norme

Les modèles d'informations délivrés par la ou les parties désignées sont de deux sortes. Chacun représente un référentiel d'informations structurées, utile pour les prises de décisions durant tout le cycle de vie :

1. Le **PIM** – Project Information Model. Il s'agit du modèle d'informations permettant la réalisation du projet. Il peut par exemple contenir les détails géométriques du projet, l'emplacement des équipements, les exigences de performance lors de la conception, la planification, l'évaluation des coûts, les séquences de construction, les détails de coactivité, les ouvrages provisoires, les

⁴² Sources: Plan BIM 2022 / Ministère chargé du logement.

détails des structures, systèmes, composants et équipements installés, y compris les exigences de maintenance, pendant la construction du projet, mais aussi les documents de management de projet (gestion des risques, OPR...). Le PIM n'est pas livré au client avec l'ouvrage bâti, car il contient le savoir-faire et la propriété intellectuelle des entreprises (par exemple les séquences de construction et les méthodes de montage), sauf si une clause contractuelle précise que les données seront livrées sans pour autant céder aussi l'autorisation d'utilisation sur un autre projet.

2. L'**AIM** – Asset Information Model. Il s'agit du modèle d'informations permettant la réalisation de l'exploitation et de maintenance de l'actif. Il peut par exemple contenir des informations sur les surfaces utiles des locaux, la base de données de toutes les interventions de maintenance, les gammes pour remplacer des équipements techniques... L'AIM ne doit pas être confondu avec le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE) qui représente la géométrie des structures et détaille les systèmes installés, mais rarement les informations nécessaires à l'exploitation opérationnelle.

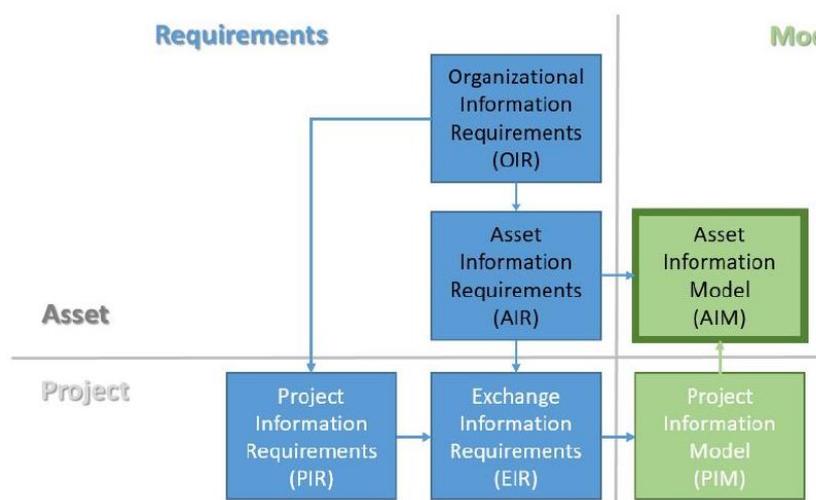


Fig.71 : Modèles définis par la norme ISO 19650-1

Gestion des tolérances

Les tolérances de construction et d'assemblage doivent être définies dans les documents de conception et de construction, c'est-à-dire dans le PIR qui alimente principalement le PIM (voir Fig.72).

Cela exige parfois des modélisations spécifiques, à la fois de l'ouvrage à construire (Système à faire) et sur les méthodes constructives (Système pour faire). Ces tolérances doivent être précisées dans les cas d'usage décrits dans le BEP (BIM Exécution Plan ou Plan de mise en œuvre du BIM) et donc dans l'EIR qui précise les informations à échange tout au long du cycle de vie du projet.

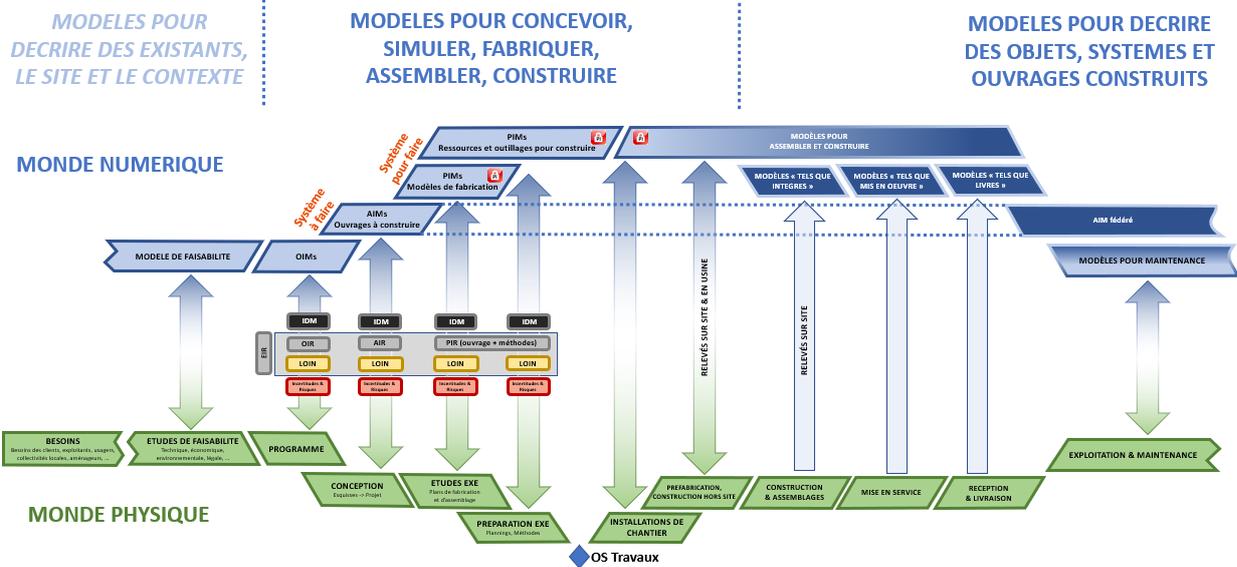


Fig.72 : Réconciliation Monde physique et monde numérique

9.3 Prérequis pour gérer les Incertitudes et Tolérances

Structuration de données

Contextualisation

Classification

Dans le chapitre 3 du premier livrable « Enjeux et Définitions » du Groupe de Travail « Incertitudes et Tolérances », les incertitudes ont été identifiées à chaque étape d'un projet de construction, avec leur source, leur degré d'incidence et la responsabilité du risque associé.

Il en a résulté que de nombreuses incertitudes sont atténuées par des relevés complémentaires (pour mieux connaître le contexte : bâti et systèmes existants, géologie...) et des relevés au fil de l'eau (pour mieux connaître ce qui vient d'être réalisé afin de s'adapter aux écarts), mais aussi par la gestion des risques. En effet, celle-ci permet de gérer ces incertitudes pendant la vie du projet afin de les diminuer et de les éliminer, voire de les transformer en opportunités.

Au-delà de ces considérations, un prérequis reste indispensable pour gérer correctement les incertitudes : la structuration des données.

On peut différencier deux types de structuration : la contextualisation et la classification.

La contextualisation, c'est l'ajout de métadonnées pertinentes pour contextualiser la donnée brute. Quelques exemples de métadonnées:

- Date et heure de captation.
- Responsable ou auteur de la captation.
- Lieu de la captation.
- Appareil de mesure utilisé.
- ...

La contextualisation permet de lier la donnée à d'autres bases de données, afin d'étendre le champ des actions disponibles, en corrélation avec un ensemble d'informations connexes.

La classification, c'est l'ajout d'attributs pour caractériser un objet, afin de pouvoir le classer dans une arborescence fonctionnelle. Quelques exemples d'attributs :

- Famille d'appartenance (type d'objet).
- Système concerné.

- Local d'installation.
- Matériau.
- Caractéristiques physiques (par exemple pour une porte : classe de résistance au feu, conductivité thermique, isolation acoustique...).
- ...

La classification des données permet un traitement rapide, car celles-ci sont déjà « transformées » dans un but spécifique : on peut les représenter sous forme arborescente, les filtrer et les retrouver automatiquement pour des inventaires, des localisations au sein d'un système ou d'un local précis...

La classification est adaptée à l'usage de la donnée. C'est une des raisons pour lesquelles il n'existe pas de classification universelle des données de la construction, car les besoins en phase de construction (classification organique, c'est-à-dire de composants à assembler, avec une performance unitaire) sont très différents des besoins en phase d'exploitation et de maintenance (classification systémique, c'est à dire de composants assemblés en systèmes à maintenir, avec une performance globale).

	Besoins / Missions	Enjeux de la structuration	Mesures d'atténuation
Données d'entrée (contexte du projet)	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance du contexte anthropique (réseaux et bâti existants...) • Connaissance du contexte non anthropique (biodiversité, eaux...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité de nommage des objets et des matériaux • Identification des systèmes et réseaux existants 	<ul style="list-style-type: none"> • Base de données (données propriétaires ou openData)
Conception	<ul style="list-style-type: none"> • Gestion des exigences opérationnelles • Performance des systèmes et performance globale (système de systèmes) • Cohabitation de systèmes / Connection aux systèmes existants • Insertion dans contexte • Calcul de métrés (volumes et quantités) 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité de nommage des objets et des matériaux par l'ensemble des partenaires • Identification des systèmes • Mapping avec nommage des objets manufacturés 	<ul style="list-style-type: none"> • Rétro-modélisation (géométrie) • Rétro-engineering (attributs et méta-données)
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionnement (quantité et performance) des engins et des matériels de construction • Coactivité • Collisions entre matériels de mise en œuvre • Gestion des aléas de chantier 	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des matériels de chantier (performance, encombrement, logistique de stockage et de mise en œuvre) • Suivi de l'avancement du chantier (nommage des objets réalisés en place & des équipements installés) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nomenclature des objets cohérente avec mise en œuvre (plots de bétonnage...) • Suivi rigoureux des attributs • Alimentation DOE au fil de l'eau
Livraison des ouvrages et de systèmes	<ul style="list-style-type: none"> • Tests unitaires de performance de chaque système • Tests des systèmes dans leur contexte • DOE numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi des tests et des levés de réserves • Référentiel de performances au moment de la livraison 	<ul style="list-style-type: none"> • Nomenclature des systèmes (codification et arborescence)
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des systèmes (localisation, performance, procédures d'intervention ou de changement...) • Contrat de service fonctionnel • Satisfaction des exigences 	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des systèmes et de leurs composants (localisation, performances attendues, liens avec documents techniques, contrôle de la fiabilité des données...) • Suivi & Historique des interventions 	<ul style="list-style-type: none"> • Classification des objets (codification et arborescence) en lien avec systèmes et localisation dans l'ouvrage et en lien avec contrat de service fonctionnel • Liens avec GMAO et GTC

	Besoins / Missions	Enjeux de la structuration	Mesures d'atténuation
		<ul style="list-style-type: none"> • Réversibilité & Portage des données 	
Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des besoins des usagers (indicateurs de performance) • Contrat de service opérationnel • Satisfaction des besoins 	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des besoins (performances attendues, suivi des indicateurs) • Réversibilité & Portage des données 	<ul style="list-style-type: none"> • Classification des besoins, en lien avec contrat de service opérationnel

9.4 Recommandations d'architecture logicielle du projet

Schéma en V ou en Racine carrée pour le développement du projet

Schéma en Racine carrée ✓

Le « schéma en V », habituellement utilisé dans l'industrie pour représenter la fabrication d'un produit manufacturé, se décline différemment dans le domaine de la construction des ouvrages publics, car il doit absolument tenir compte de la réglementation française d'attribution des marchés et de la phase d'exploitation des ouvrages construits.

Le schéma de la vie d'un ouvrage se représente donc plutôt sous la forme d'une racine carrée (voir Fig.73).

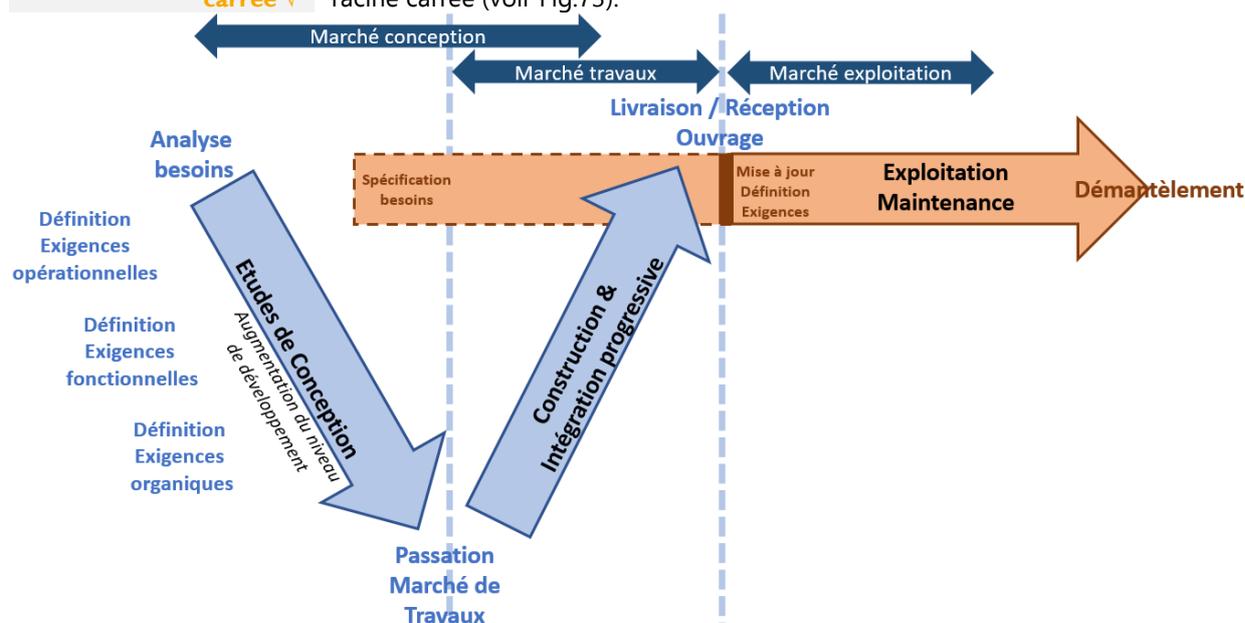


Fig.73 : Schéma en V de l'industrie adapté au domaine de la construction (Schéma en Racine carrée)

- Les obligations de la loi MOP sont représentées avec les 3 marchés qui se succèdent :
 - Marché de conception attribué à une maîtrise d'œuvre, dont un jalon principal est la **passation du marché de travaux** ; le marché de conception chevauche le marché de travaux ;
 - Marché de travaux attribué à une entreprise de construction, qui commence donc à la **passation du marché de travaux** et se termine à la livraison/réception des ouvrages au maître d'ouvrage au nom de l'exploitant ;
 - Marchés d'exploitation/maintenance, attribués à un exploitant, dont le premier démarre à la livraison de ouvrages et se termine lors du **démantèlement** de l'ouvrage.

- La barre horizontale orange « Exploitation/Maintenance » est volontairement prolongée vers la gauche en traits pointillés, car il est encore trop rare que l'exploitant puisse spécifier, dès la conception, ses besoins en termes de maintenance.
- Le début du cycle commence par l'**analyse des besoins** du client (le maître d'ouvrage), qui se traduit immédiatement par la **définition des exigences opérationnelles**, qui doivent être mesurables et vérifiables lors de la livraison des ouvrages.
- La barre descendante du V représente l'augmentation du niveau de développement des études de conception. Les exigences opérationnelles se traduisent en exigences fonctionnelles (les systèmes à mettre en œuvre) puis en exigences organiques (les composants des systèmes). Le développement se termine lorsque les systèmes et structures atteignent le niveau « PRO », c'est-à-dire lorsque les études d'exécution des travaux peuvent débuter.
- Généralement, dans l'industrie, le bas du V se traduit par la construction des différents composants du produit à réaliser, et la branche montante représente l'intégration des systèmes. Dans le domaine de la construction, le bas du V correspond à la passation du marché, puisque les ouvrages sont construits sur site, avec l'intégration progressive des équipements et des systèmes au fur et à mesure de la réalisation des travaux.
- Après réception des travaux, l'exploitant doit reformuler les exigences du client en relation avec les ouvrages livrés.
- Le cycle se termine au démantèlement des ouvrages, ou à la suite de leur réhabilitation, qui entraîne une nouvelle boucle de spécifications des exigences.

Itérations des études et Validations continues

Le schéma en Racine carrée se complète avec les informations suivantes (Fig.74).

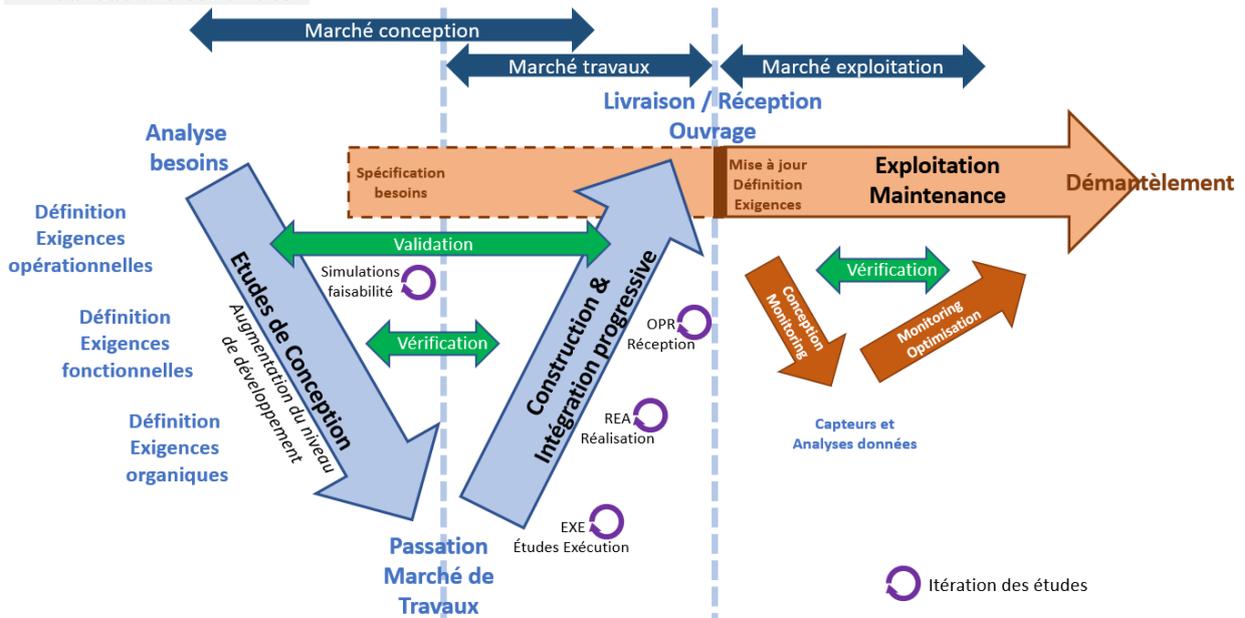


Fig.74 : Itérations de développement des études et Validation progressive de l'intégration

- Toutes les études de conception (simulations, faisabilité...) sont des processus itératifs, puisque chaque système de l'ouvrage bâti (structure, équipements,

circulation...) est d'abord conçu indépendamment des autres systèmes, générant alors des informations impactant ces autres systèmes. Il est possible que plusieurs itérations soient nécessaires avant que ne soient réalisées intégration et convergence.

- De même, toutes les études réalisées pendant la phase de construction (Exécution, Réalisation, Opérations Préalables de Réception) sont également itératives, puisque chaque ouvrage est replacé dans son environnement existant (contexte bâti), mais aussi tient compte des phases temporaires de réalisation des travaux.
- Validation des exigences : Les exigences ayant été définie par le maître d'œuvre à partir de l'analyse des besoins du maître d'ouvrage, il convient de vérifier avant la livraison de l'ouvrage que ces exigences sont bien satisfaites tout comme les besoins du maître d'ouvrage.
- Au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage et de l'intégration progressive des équipements, il convient de valider le bon fonctionnement de chaque système couvrant une fonction attendue, mais aussi du bon fonctionnement de l'ensemble des systèmes dans leur contexte définitif.
- De même, pendant la phase d'exploitation/maintenance, il convient de vérifier que l'auscultation des ouvrages et des équipements est satisfaisante à la suite de la mise en œuvre des capteurs et des processus d'analyse des données saisies automatiquement ou manuellement.

Prise en compte des incertitudes et tolérances

Dans ce schéma en Racine Carrée, on retrouve les étapes où se situent les notions de tolérances et d'incertitudes (Fig.75).

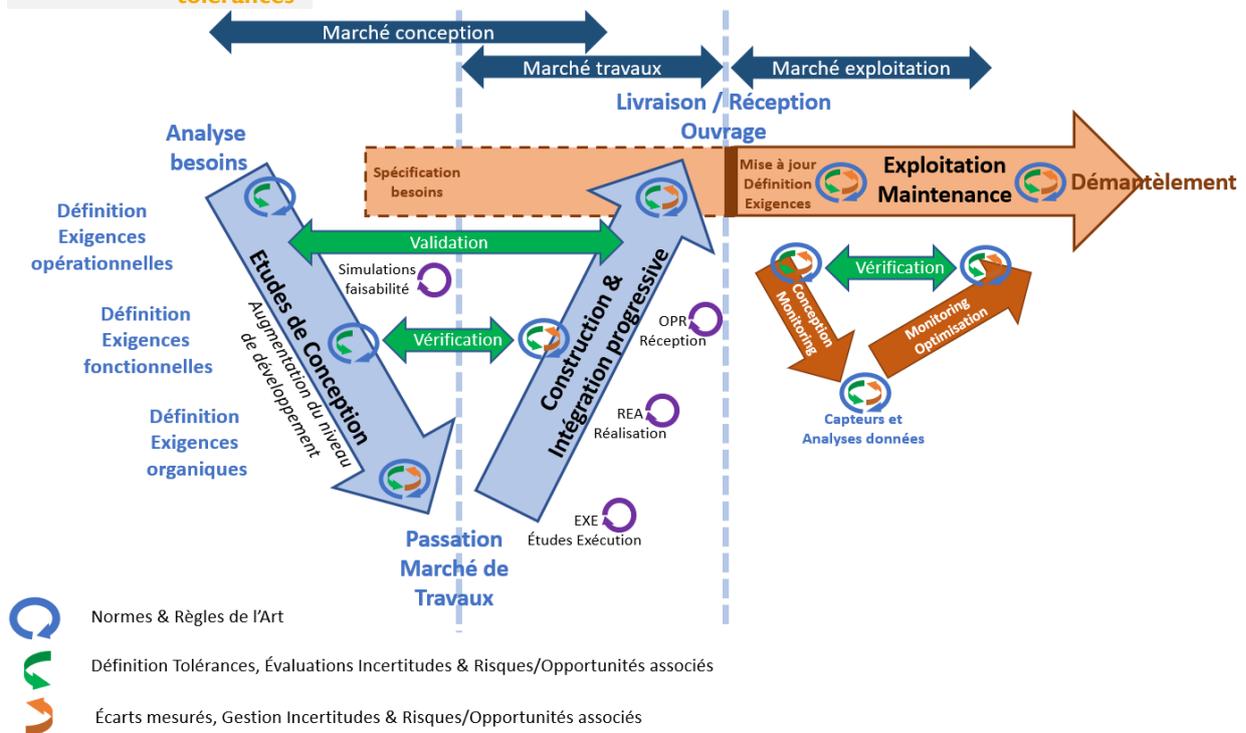


Fig.75 : Définition des incertitudes et tolérances et Vérification des écarts

Elles sont liées aux processus de validation et de vérification des exigences et de la bonne exécution des études.

Le schéma représente trois types de définition et de constats, adaptés à la phase du projet :

- les normes et règles de l'art ;
- les tolérances admissibles et l'évaluation des incertitudes et des risques/opportunités associés ;
- les écarts mesurés et la gestion des incertitudes et risques/opportunités associés.

Selon la phase du projet, ces définitions et constats prennent plusieurs critères :

- définition des exigences : cela commence bien sûr par la définition des normes et clauses à respecter (par exemple : CCAG, CCTP, ISO19650...) et des règles de l'art de la construction, puis par la définition des tolérances admissibles pour les différents systèmes qui composeront l'ouvrage ;
- études de conception : les normes et règles de l'art sont évidemment respectées, les tolérances sont affinées et les incertitudes sont gérées par mesure des risques résiduels associés ;
- construction : les écarts avec les tolérances sont mesurés et corrigés, les risques associés aux incertitudes sont atténués, voire même maîtrisés ;
- livraison de l'ouvrage : Les opérations préalables à la réception permettent de relever les écarts avec les exigences initiales et d'atténuer les incertitudes résiduelles ;
- réception de l'ouvrage : le mainteneur fait une mise à jour des exigences, vis-à-vis de la réalité des ouvrages réalisés et du DOE fourni. De nouvelles tolérances et incertitudes sont définies en fonction des besoins des usagers et des équipes de maintenance ;
- exploitation/maintenance : les écarts avec les tolérances d'exploitation sont relevés et corrigés, afin de respecter le cahier des charges des exigences (en termes de confort des usagers et de comportement physique de l'ouvrage) ;
- monitoring et auscultation : les processus d'analyse des données de l'ouvrage en exploitation (par captation automatique de données issues de capteurs ou par relevés manuels d'information) permettent de vérifier la bonne cohérence entre les valeurs acceptables attendues et la réalité, mais aussi la bonne adéquation des données captées avec les systèmes à piloter.

Architecture logicielle cible d'un projet

Briques logicielles contenant des incertitudes

L'architecture logicielle type d'un projet de construction repose sur un assemblage de briques métiers, qui doivent non seulement dialoguer entre elles, mais également avec les systèmes informatiques existants des parties prenantes du projet (par exemple, comme illustré sur la Fig.76 qui présente le système informatique du MOA et de l'Entreprise de construction, en lien avec le système cible du Projet).

La plupart des briques logicielles métiers contient des données incertaines, qui seront gérées par la composante « Gestion des risques » du projet. Celle-ci alimentera la composante « Gestion des risques » du MOA, dans le but de consolider tous les risques de tous les projets en cours pour ce MOA.

On trouvera par exemple des incertitudes dans les briques techniques suivantes :

- modélisation : connaissance du contexte (bâti existant et géologie)...
- simulations : données d'entrée, précisions des algorithmes, interprétation des résultats...
- méthodes : constructibilité, déformations, aléas météorologiques, qualification de la main d'œuvre, dimensionnement des engins (nombre et performance), enchaînement des séquences de construction...

Data mining et Reporting

- logistiques : retards de livraison, erreurs de stockage, disponibilité des moyens de manutention...
- estimation et planification 4D : corrélation de toutes les incertitudes évoquées ci-dessus, qui impactent le coût et de délai du projet.

Mais on gèrera également les incertitudes dans les briques logicielles suivantes :

- GED : erreurs de nommage, retards de livraison, mauvaise indexation de documents...
- Gestion de contrat : indicateurs de performance mal évalués...
- Suivi des modifications : erreurs et retards de saisie, données non mises à jour, retards de décisions...

Les procédures de gestion des risques permettent d'identifier ces types d'incertitude et d'y pallier par des procédures claires que tous les contributeurs doivent s'approprier et appliquer avec rigueur.

Le data mining est l'analyse de données depuis différentes perspectives et le fait de transformer ces données en informations utiles, en établissant des relations entre les données ou en repérant des modèles réguliers de comportement.

Ces analyses sont alors exposées dans des rapports ou sur des tableaux de bord (par exemple, sous PowerBI), afin de faciliter les prises de décisions par la connaissance des informations à chaque instant, mais aussi par leurs courbes d'évolution.

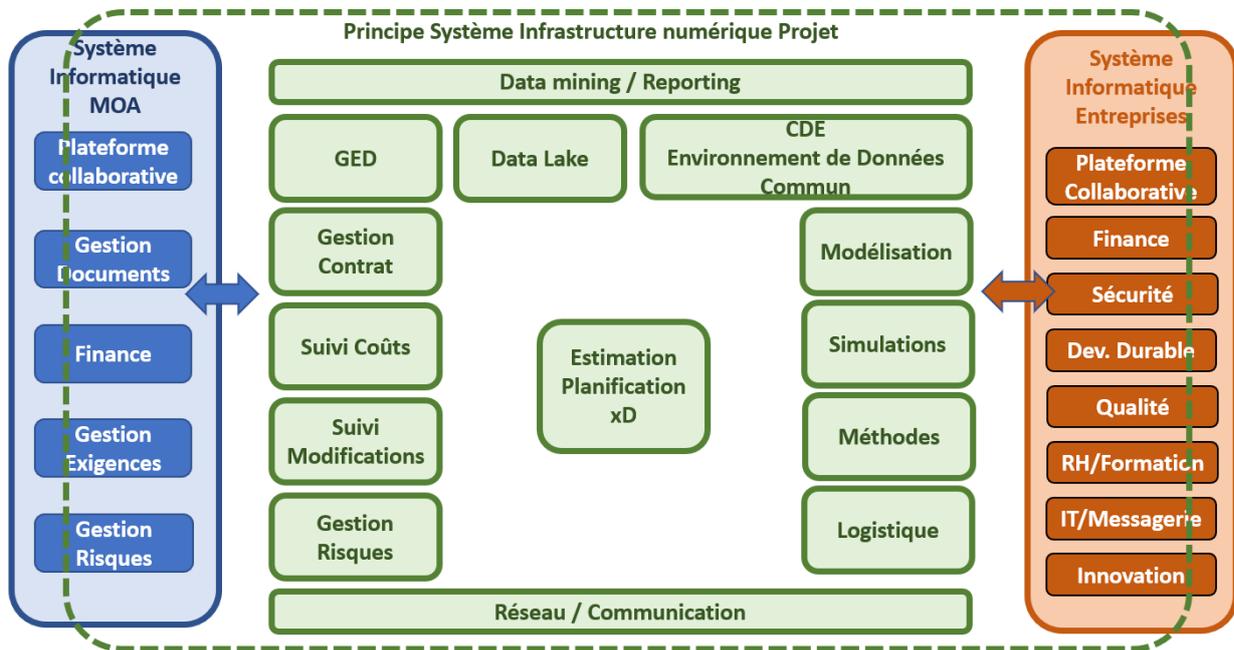


Fig.76 : Architecture logicielle cible

Portfolio des logiciels techniques

Plus d'une cinquantaine de logiciels techniques sont généralement utilisés sur un grand projet de construction, classés dans 8 grands thèmes techniques (Fig.77). Un projet de construction d'une centrale nucléaire nécessite jusqu'à plus de 150 logiciels techniques.

Même si l'on constate une utilisation de plus en plus fréquente du format interopérable IFC pour échanger des données entre logiciels, beaucoup de transformations

d'un format vers un autre sont encore réalisées, au moyen de passerelles simples de type Excel ou plus sophistiquées de type FME (de l'éditeur Safe Software).

Il est bien évident que les conversions d'un format vers un autre entraînent naturellement des incertitudes et des inquiétudes sur la qualité des résultats, mais aussi des inexactitudes pendant des transformations géométriques entre logiciels de modélisation dont les moteurs graphiques sont rarement exactement compatibles (nombre de facettes d'un cercle, maillages de triangulations, décimales de coordonnées réelles...). Dans tous les cas, la conversion doit être éprouvée et les non-conformités identifiées, afin de gérer les tolérances obtenues et les pertes d'information potentielles.

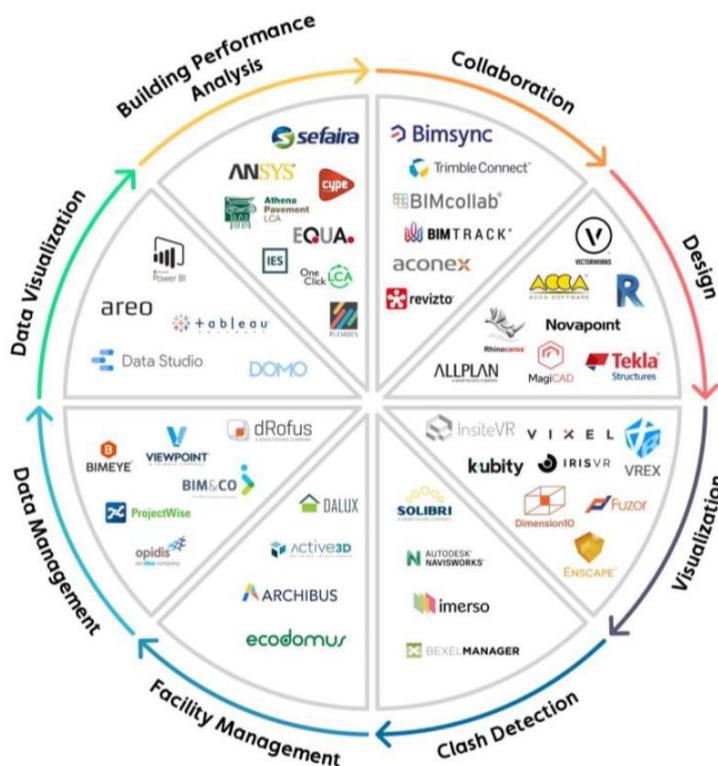


Fig.77 : Logiciels techniques utilisés pendant les différentes étapes d'un projet de construction

9.5 Réalités augmentée, virtuelle et mixte

Les technologies Rx

L'objet de ce chapitre n'est pas de définir précisément les différentes technologies de réalité augmentée, virtuelle, voire mixte, mais de proposer des usages en relation avec la gestion des tolérances et des incertitudes.

En effet, la demande de ces technologies (dites Rx) est croissante et de nombreux démonstrateurs ont été réalisés pour des applications de maintenance opérationnelle.

Réalité augmentée RA

La Réalité augmentée est une technique qui superpose à la réalité sa représentation numérique actualisée en temps réel. La Réalité augmentée n'est autre que l'affichage de la réalité, enrichie par des données virtuelles s'affichant pour compléter les éléments présentés. L'équipement nécessaire est une paire de lunettes spéciale ou une tablette.

Réalité virtuelle RV

Elle permet d'obtenir des informations précises et interactives autour d'une situation définie. Très utilisée depuis quelques années, elle connaît un grand essor au sein du monde industriel.

À la différence de la réalité augmentée, la réalité virtuelle crée une réalité entièrement virtuelle. En effet, la réalité virtuelle immerge un individu au moyen d'un casque fermé, dans une réalité construite de toutes pièces par l'ordinateur et qui n'a pas forcément de relation avec le monde réel.

Un cas d'application de la Réalité Virtuelle, c'est la visite de bâtiments ou d'ouvrages à distance, dans un univers fictif ou un univers réel numérisé.

Réalité mixte RM

La Réalité Mixte est composée des deux réalités précédentes. Elle combine la Réalité augmentée avec la Réalité virtuelle, pour créer un troisième type d'univers. Son utilisation est souvent basée sur des casque de réalité mixte à la visière transparente (de type Microsoft HoloLens), qui permettent de superposer des éléments virtuels animés à la réalité et d'interagir avec eux.

Les usages et perspectives de la Rx

Les usages actuels de ces technologies dans le monde industriel sont principalement orientés « maintenance », et donc basés sur la RA et la RM. Le principe est de gérer l'interaction de l'humain avec le produit, c'est-à-dire d'informer ou de guider l'opérateur en fonction de sa position, de ce qu'il constate, de ce qu'il fait.

La qualité de cette technologie repose sur la fiabilité des données, stockées dans un entrepôt de données, qui comprennent une série d'informations spécifiques à chaque discipline, donc une série de maquettes dédiées à chaque intervention. C'est un jumeau numérique du produit en exploitation, maintenu à jour au fur et à mesure des modifications apportées.

Cela nécessite donc une grande fiabilité du modèle numérique, de la documentation et de l'information géométrique dans des formats pérennes, mais aussi une réconciliation de la base d'informations après chaque intervention et chaque changement.

Perspectives

D'autres usages sont également envisagés en phase de construction, pour proposer aux compagnons sur chantier des modes opératoires, des informations complémentaires de mise en œuvre, des points de vigilance... mais aussi des cursus de formation sur des matériels dangereux ou des outils spécifiques.

9.6 Nouvelles technologies d'analyses de données

Intelligence Artificielle, Machine learning et Deep Learning

Les technologies actuelles ouvrent de nouveaux horizons concernant l'analyse de données pour réaliser des simulations et diagnostics automatiques, à partir de jeux de données contextualisées et de courbes d'apprentissage algorithmique.

Les expressions « Intelligence Artificielle », « Machine Learning » et « Deep Learning » se sont popularisées. Elles ne sont pas synonymes. En voici les principales distinctions.

Intelligence Artificielle

Les premiers systèmes d'Intelligence Artificielle (IA) consistaient en des programmes informatiques qui s'appuyaient sur des règles capables de résoudre des problèmes assez complexes. Plutôt que d'intégrer au code chaque décision que le logiciel était censé prendre, le programme se divisait en une base de connaissances et un moteur d'inférences. Les développeurs enrichissaient alors la base avec des informations factuelles, et le moteur interrogeait ces dernières pour parvenir à un résultat.

Les algorithmes modernes sont capables d'apprendre à partir de données historiques, ce qui les rend pertinents pour une plus vaste gamme d'applications.

Machine learning

Si l'IA débouche parfois sur des performances surhumaines dans certains domaines, il reste cependant beaucoup de chemins à parcourir avant qu'une IA puisse réellement concurrencer l'intelligence humaine. Pour le moment, aucune IA n'est en mesure d'apprendre comme le font les humains, c'est-à-dire en s'inspirant simplement de quelques exemples. Pour comprendre un sujet, quel qu'il soit, une IA doit s'entraîner sur des montages de données (même si cette volumétrie tend à diminuer avec l'IA « frugale »).

Le Machine Learning (ML), ou apprentissage automatique, ou apprentissage statistique, est un sous-ensemble de l'Intelligence Artificielle.

La machine apprend toute seule en ingérant d'énormes quantités de données et en détectant des schémas récurrents. Pour fonctionner, nombre d'algorithmes de Machine Learning font appel à des formules statistiques et au Big Data.

Deep learning

Le Deep Learning (DL) ou apprentissage profond, est un sous-ensemble du Machine Learning sur la base d'algorithmes encore plus sophistiqués (réseaux neuronaux en particulier). Si cette approche implique toujours que la machine apprenne à partir de données, elle constitue un nouveau jalon important dans l'évolution de l'IA.

Le Deep Learning a été développé à partir de notre connaissance des réseaux neuronaux. Il doit son adoption à la puissance de calcul devenue disponible à moindre coût ainsi qu'aux avancées des algorithmes. Le Deep Learning s'est révélé révolutionnaire dans la reconnaissance des objets et la compréhension du langage naturel.

Machine Learning pour le calcul des incertitudes

Le principe est de représenter les incertitudes, mais aussi les effets et la propagation des incertitudes. Mais le temps de calcul des modélisations reste élevé, même avec des technologies de calcul haute performance ou de calcul distribué.

L'idée est donc de ne réaliser que quelques simulations, et d'utiliser les technologies de Machine Learning pour prédire les autres résultats.

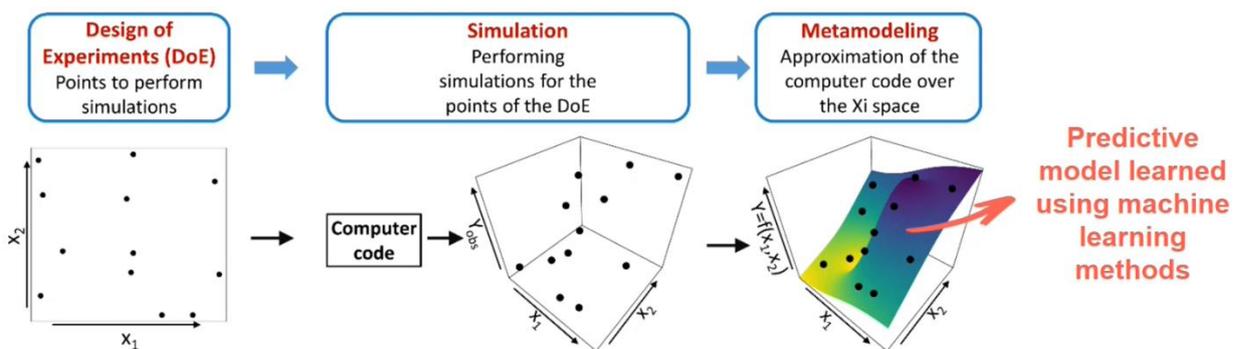


Fig.78 : Modèles prédictifs calculés par Machine Learning (BRGM)

Modèles prédictifs

La figure Fig.78 ci-dessus montre le principe du Machine Learning appliqué à la géophysique.

- Le schéma de gauche représente la répartition des scénarios à réaliser avec les paramètres d'entrée x_1 et x_2 . Pour obtenir toutes les possibilités, il faudrait couvrir tout l'espace de données, mais le temps de calcul ne serait pas raisonnable.
- Le schéma central expose les résultats Y des simulations obtenues avec les paramètres d'entrée du schéma de gauche.
- Le schéma de droite est le résultat du traitement par machine learning, en exploitant les premières observations du schéma central. Le principe est de connaître le lien entre les

Principe du Machine Learning

Perspectives du Machine Learning

Perspectives d'IA et ML pour le Jumeau Numérique

IA pour maintenance des Ouvrages d'Art

paramètres de calcul et les résultats des simulations, et de couvrir l'ensemble des possibles en créant un modèle prédictif de l'ensemble des résultats (c'est-à-dire également dans les zones où aucun calcul n'a été réalisé car les paramètres d'entrée n'existaient pas).

La saisie de nouvelles valeurs dans le schéma de gauche permet d'affiner le modèle prédictif de droite par ajout de résultats de simulation.

L'algorithme de ML identifie les « drivers » de la simulation, c'est-à-dire les paramètres qui ont le plus d'influence ou qui contribuent le plus aux résultats.

Le ML permet donc de faire des prédictions à court et moyen termes (ce qui est différent des projections à long termes, qui sont systématiquement liées à un scénario d'évolution).

Dans toutes ces approches, il y aura toujours un problème de technologie, mais aussi un problème de représentations de la connaissance des experts. En effet, IA et ML permettent de préciser et d'approfondir le rapport de l'expert mais ne le remplacent pas, car ils nécessitent :

- des données entrée ;
- des hypothèses ;
- des traitements ;
- des nuances de résultats.

Le ML devient de plus en plus sophistiqué, et ressemble désormais à une « boîte noire », alors qu'il est indispensable de conserver l'intelligibilité des résultats, afin de maintenir la confiance des décideurs dans l'interprétation de ces résultats.

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 4, le Jumeau Numérique d'un ouvrage en exploitation est basé sur la captation de données récentes ou quasi-temps réel, qui permettent d'alimenter des algorithmes de simulation, d'optimisation ou de prédiction. Ces algorithmes sont de plus en plus souvent issus de technologies IA et ML, c'est-à-dire qu'ils permettent des extrapolations à partir de jeux de données parfois limités.

Ces Jumeaux Numériques pourraient donc proposer des solutions pour satisfaire des besoins en termes de gestion des risques, par des modèles prédictifs de comportement face à des aléas ou des utilisations d'équipements sur de longues durées.

De plus, ces Jumeaux Numériques pourraient proposer des solutions pour répondre aux besoins du secteur de la construction en termes de conduite de la trajectoire environnementale, par des simulations de scénarios de maintenance moins consommateurs de carbone, moins dépensiers en ressources énergétiques, plus vertueux en recyclage de matériaux en impacts sur la biodiversité.

L'intelligence artificielle apprend au fur et à mesure de l'apport de données, ce qui rend son analyse de l'évolution des dégradations des ouvrages d'art plus précise.

La Federal Highway Administration américaine (FHWA) collecte depuis 1992 des informations d'inspection accessibles en openData sur l'ensemble des 15 000 ouvrages d'art en béton précontraint du Texas⁴³. Un algorithme d'IA a analysé les notes de l'état de dégradation des ouvrages afin d'évaluer l'évolution des dégradations. Cette analyse est beaucoup plus rapide et précise que des méthodes statistiques traditionnelles, car l'algorithme modifie ses propres paramètres au fur et à mesure de l'ajout de nouvelles données dans la base, afin de converger vers des modèles prédictifs plus fiables. Cela permet d'élaborer des plans

⁴³ Article du Moniteur du 18 mars 2022 « Infrastructures – Des ponts américains sous haute surveillance »

de maintenance plus efficaces au niveau d'un territoire, non seulement pour les grands ouvrages sous surveillance constante, mais aussi pour connaître l'évolution des dégradations des petits ouvrages (pour mémoire, la France possède à ce jour environ 200 000 ouvrages d'art, dont environ 12 000 très usités et monitorés sur des réseaux concédés).

9.7 Recommandations et perspectives pour la filière

Chaîne de création et d'analyse des informations

Comme nous avons pu le constater tout au long de ce chapitre, les recommandations et perspectives sont relatives à l'ensemble des composants de la chaîne de création et d'analyse des informations : format, norme, structuration, logiciel et technologies.

Format de données

Le format de donnée privilégie le format openBIM IFC. Cependant, ce format ne contient actuellement pas de mécanisme pour traiter ces sujets, du fait que ces concepts ne peuvent pas être intégrés directement dans les objets et les systèmes, puisque qu'ils sont évolutifs tout au long du cycle de vie du projet. Seuls des PropertySets peuvent décrire les incertitudes, les tolérances et les risques associés, mais leur gestion doit être réalisée dans des logiciels spécialisés, alimentés par des informations mises à jour continuellement au fur et à mesure du développement du projet. En effet, ces propriétés, quand elles sont gérées dans les logiciels de CAO standards ne permettent pas de tenir compte de l'environnement direct, ni surtout de leur aspect temporel, puisqu'elles évoluent dans le temps.

Norme d'échange de données

La série des normes ISO 19650 propose de pallier ces sujets par des exigences décrivant les échanges de données, leur niveau de définition, les responsabilités associées et les échéances de livraison. De ces exigences découlent des modèles d'informations, fiables, partagés, uniques et intègres, qui doivent à chaque instant être remis en cohérence avec le monde physique, afin d'atténuer les incertitudes et satisfaire les tolérances exprimées.

Structuration des données

La structuration des données (codification et arborescence) mais aussi structuration des processus permettent de mettre en œuvre des mesures d'atténuation, par une maîtrise des besoins d'information exprimés par chaque acteur et d'une meilleure continuité numérique (fluidité et interopérabilité) pendant les changements de phases du projet.

Architecture logicielle du projet

L'architecture logicielle, indispensable à la cohérence d'ensemble, permet de concilier les besoins de chaque métier, tout en évitant les transformations de formats de données. Cette architecture favorise le data mining et le reporting par la contextualisation des données entre elles. La mise à disposition de ces informations et de leurs modèles d'évolution permet de prendre des décisions grâce à la diminution des incertitudes et à la confirmation du respect des tolérances, donc par une maîtrise des risques associés. Elle permet même d'identifier des opportunités à saisir pour transformer une crainte en succès.

Technologies d'affichage des données

Les technologies d'affichage de données et d'immersion au sein des données (Rx), qui autorisent de mieux appréhender l'insertion d'un ouvrage dans son contexte, la complexité de sa topologie ou de ses séquences constructives. Ces nouvelles « grilles de lecture » mettent à portée de tous des données hétérogènes et permettent d'anticiper le comportement d'un processus ou d'un ouvrage dans son environnement direct. Ces technologies autorisent donc une meilleure compréhension de phénomènes, et permettent donc d'identifier les risques et incertitudes, qu'il faut ensuite analyser pour les atténuer et les faire disparaître.

Technologies d'analyses des données

Enfin, les nouvelles technologies d'analyse de données, qui ouvrent de nouvelles possibilités de calculs, de corrélation, de contextualisation, de diagnostics et de prédictions, par extrapolation à partir de jeux de données limités, ou inversement très volumineux et donc inexploitablement directement par l'homme.

Approche globale du cycle de vie de la donnée

Au-delà de ces préconisations et perspectives, il est absolument primordial d'avoir une approche globale sur le cycle de vie de la donnée, c'est-à-dire sa génération ou sa collecte, son stockage, son exploitation, sa mise à jour... Pour cela, dès le début de ce cycle de vie, il faut penser au modes d'exploitation, de gouvernance et d'enrichissement de la donnée.

10. IMPACTS SUR LA GESTION DES RISQUES

10.1 La gestion des risques

La culture du risque

Nous avons constaté dans le livrable précédent⁴⁴ du groupe de travail « Tolérances et Incertitudes » que la culture du risque varie selon les entreprises. La « lecture » du risque repose principalement sur des femmes et des hommes dont l'expertise est basée sur une expérience vécue. Chaque domaine d'expertise comprend un lot de risques « inhérents ». Dans le secteur des industries ou des services comme dans la construction, cette « culture risque » doit irriguer toutes les équipes et l'ensemble des parties prenantes. Cet état d'esprit nécessite beaucoup de psychologie pour convaincre de son utilité (compétitivité, confiance...) et de sa valeur.

Tout comme pour la Qualité, la diffusion de cette pédagogie ne peut se faire que par une démarche volontariste, tant de la part des donneurs d'ordre que du haut de la hiérarchie au sein des organisations contributrices.

Notons le parallèle avec l'injonction du port de la ceinture pour les automobilistes, qui d'obligation dans les années 70 en Occident, est devenue aujourd'hui un réflexe naturel pour les conducteurs comme pour les passagers.

La gestion des risques

À chaque étape du cycle de vie du projet, comme en phase d'appel d'offres, la gestion des risques et des opportunités est un incontournable, au même titre que la gestion contractuelle, des délais, des coûts et de la performance (fonctionnelle, sûreté de fonctionnement, Soutien Logistique Intégré).

La connaissance du risque fournit une aide précieuse, à la prise de décision. Ce risque, « calculé » et non plus seulement subi, s'alimente des retours d'expérience. Ces retours d'expérience à leur tour, étoffent la base de connaissances qui constitue un actif organisationnel valorisable pour toute entreprise économique.

Pourtant, le risque est trop souvent soumis à un biais managérial qui favorise un comportement « déviant » qui aurait malheureusement tendance à se normaliser. Ce phénomène est connu sous l'expression : « normalisation de la déviance ».

Dans le domaine de la construction, cela peut consister à repousser l'identification, voire le traitement du risque, à une phase suivante. Ainsi, en phase de conception effectuée par une équipe A, le risque peut être purement « transféré » sans validation/acceptation préalable à la phase d'exécution réalisée par une équipe B.

Ce type d'attitude peut résulter de :

- Un tropisme ne favorisant que les activités à caractère technique,
- une fausse croyance en la résolution de problème « au pied du mur » sans comprendre la nécessité et les bienfaits de l'anticipation,
- une méconnaissance des enjeux associés au risque,
- un aveuglement court-termiste lié à une déresponsabilisation,
- une absence de démarche de Contrôle Qualité,
- un recours aux seules dispositions de la Providence.

En effet pour ce dernier point, reconnaissons que dans un lot de risques identifiés, un pourcentage significatif ne se concrétisera pas. L'occasion de préciser que même sur les plus grands projets, les menaces vraiment majeures sont d'un

⁴⁴ MINnDs2_GT2.2_incertitudes_tolerances_enjeux_definitions_024_2022

Le risk manager

nombre limité, de l'ordre de la dizaine. Autant faut-il les identifier correctement pour les analyser et les traiter efficacement, car les répercussions peuvent être sérieuses pour la poursuite et la rentabilité du projet.

Réaffirmons ici que la maîtrise du risque est un investissement (temps, coût et compétences) dont le retour sur investissement est garanti pour chaque partie au contrat. Condition *sine qua non*, le risque doit être non seulement compris et appréhendé mais véritablement intégré dans l'ensemble des processus. Le risque doit être adéquatement budgété ce qui est souvent omis ou minimisé pour être paradoxalement « compétitif ».

Outil de leadership et bâtisseur de confiance, le risque est un marqueur de maturité professionnelle, tant pour les entreprises que pour les directions de projet.

Le risk manager est un facilitateur. Cette fonction transversale requiert avant tout un « savoir-être » et des compétences orales et écrites de communicant. Le risk manager devrait être considéré comme l'ambassadeur de la Direction de Projet dans sa démarche risque.

Les risques génériques

Pourtant, la vérité du terrain nous impose un constat selon lequel l'autorité du risk manager est souvent fragilisée, quelque fois victime d'un pilotage de projet défailant et d'arbitrages favorables à court terme aux coûts et aux délais.

Chaque activité ou domaine de compétences connaît des risques inhérents. Ces risques inhérents peuvent devenir « génériques » dans une perspective de capitalisation des connaissances. Pour chaque équipe d'experts, l'exercice des risques génériques est une opportunité de formaliser voire d'interroger leur savoir-faire.

Pour écrire des risques génériques, et pour chaque processus, il s'agit de :

- Identification :
 - décrire (causes, description, conséquences) et les décliner en fonction de catégories de contexte à partir d'une analyse de type PESTEL (politique, économique, socioculturel, technologique, environnemental, législatif), voire géographique ou météorologique.
 - identifier une fonction ou une entité désignée « propriétaire » du risque.
- Attribution à un sous-système physique (cheminement, zone de vigilance...).
- Traitement :
 - formaliser un plan d'action générique (technique et/ou contractuel) en ayant la perspective d'une application concrète en étant le plus « SMART⁴⁵ » possible pour faciliter la future application spécifique :
 - écrire l'objectif avec un verbe d'action à l'infinitif,
 - identifier un (ou plus) critère de réception,
 - établir des échéances et un budget associé,
 - identifier un type de compétences pour réaliser le plan d'actions,
 - identifier si possible un approbateur générique.

Les processus liés à l'analyse et à l'évaluation étant trop spécifiquement liés au contexte et à du spécifique, ces étapes ne peuvent pas faire l'objet d'une étude générique.

L'intérêt de cette réflexion préalable est d'anticiper en amont pour se concentrer le temps du projet venu, sur le particulier et gagner ainsi en efficacité. L'objet étant de suggérer des solutions pour soit :

- tendre vers une menace résiduelle acceptable,

⁴⁵ SMART = Spécifique, Mesurable, Atteignable, Réaliste et Temporel

La matrice des risques

- éliminer la menace en en supprimant la cause,
- exploiter ou maximiser les opportunités.

Dans le cadre de chaque projet, parmi les éléments de définition du contexte, la matrice des risques (une pour les menaces et l'autre symétriquement pour les opportunités) est un élément constitutif important pour l'analyse et l'évaluation du risque.

Les matrices de risque (à ne pas confondre avec les registres de risques) sont établies de manière figée en début de projet. Les critères associés doivent assurer une continuité dans l'évaluation du risque (menace et opportunité).

La définition de la matrice est libre et peut prendre plusieurs formes. Généralement, la matrice des risques croise des seuils d'impact/gravité/sévérité en abscisse et des seuils de probabilité/occurrence/vraisemblance en ordonnée, pour l'analyse qualitative ou semi-qualitative qui permet de mesurer un niveau de risque (ou criticité).

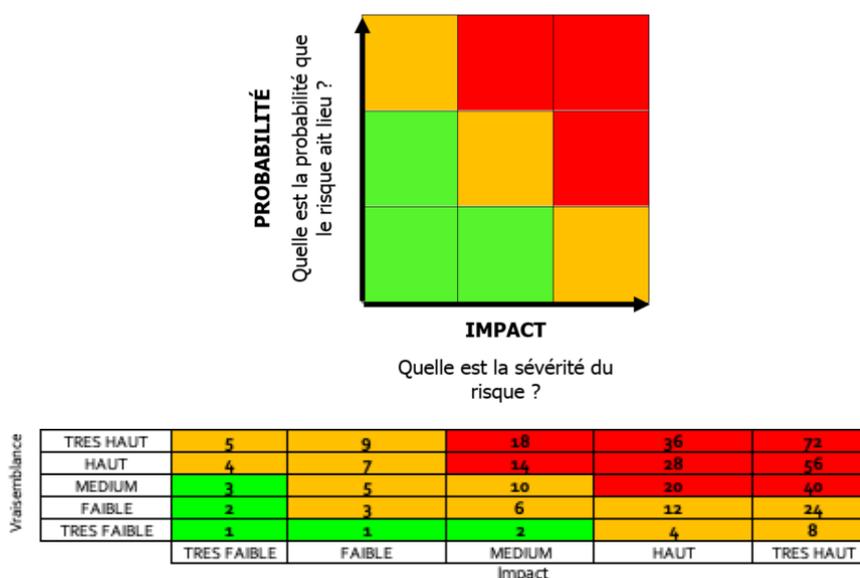


Fig.79 : Exemples de matrice des risques

La matrice des menaces et opportunités est le vecteur qui permet de hiérarchiser les risques afin de les traiter par niveau de priorité. En principe, la matrice de risque est constituée d'une grille 3x3 ou 4x4 ou 5x5 (Fig.79 : Exemples de matrice des risques Fig.79), chaque case étant associée à une couleur et généralement à un nombre. La décomposition en couleurs est variable et agit comme un indicateur de criticité. Le principe repose *a minima* sur un feu tricolore (Vert, Orange, Rouge) Fig.79 : Exemples de matrice des risques. À chaque niveau de couleur est associé un type d'action.

Cette structure est généralement imposée par la MOA et reflète son appétence au risque. Plus il y a de cases rouges moins la prise de risque est acceptée. Dans ce cas, la gestion des risques requiert plus d'attention en temps, ressources et par extension un budget financé conséquent.

Cette matrice des risques est partie intégrante du registre des risques (fichier Excel ou outil dédié). À l'inverse de la matrice des risques, le registre des risques est un document évolutif et recueille les risques et leurs évolutions.

Des métadonnées pour attribuer des risques aux produits

Une passerelle entre métadonnées et registre des risques

Structure des métadonnées

Bibliothèque d'actions

Des métadonnées associées aux produits permettraient de mieux identifier les risques et leur degré de possible matérialisation. Mais comment pourrait-on exploiter ces métadonnées et quels en seraient les usages ?

Dans le cas où des métadonnées pourraient être encapsulées dans les produits ou objets d'une maquette numérique, il serait nécessaire de trouver le moyen d'alimenter automatiquement le registre des risques à partir de la maquette, voire même d'alimenter la maquette à partir de ce registre pour une représentation graphique colorisée en fonction du taux de gravité et de probabilité.

Les métadonnées suivantes pourraient être associées aux produits (objets ou système de la maquette numérique) :

- type de risque ;
- acceptabilité initiale du risque (couleur initiale) ;
- clôture du risque ou acceptabilité résiduelle du risque à l'instant t (couleur en fonction des actions réalisées, des incertitudes levées, de la meilleure appréciation du risque...).

Si le type de risque est « générique », c'est-à-dire s'il est déjà décrit dans une base de risques, une bibliothèque d'actions pourrait suggérer automatiquement des solutions d'atténuation en fonction du contexte du projet (localisation, météo...).

10.2 Représentations des risques dans un modèle BIM

La métadonnée « Risque »

Comme cela a été présenté dans le chapitre 6.2 Informations attributaires des IFC, l'affectation d'un jeu de métadonnées « Risque » aux objets d'une maquette numérique, permettrait de documenter la catégorie du risque et toutes ses caractéristiques pour le gérer. Un niveau de maturité du risque pourrait alors être représenté sous la forme d'un indicateur coloré attaché à la représentation graphique d'un objet ou d'un système.

Avantages	Inconvénients
Représentation graphique : symbole coloré affecté à un objet ou un système	Risque pas toujours affectable à un objet graphique (comment gère-t-on les autres risques ?)
Meilleure visibilité sur les risques et leur localisation (communication interne et externe / compréhension), ainsi que la progression de leur traitement	Développement nécessaire de passerelles entre Registre des risques et Modèle graphique (avec adaptation en fonction de l'appétence du client sur la gestion de risques)
Suivi assuré par le Risk Manager dans le registre des risques	Nécessité de développement d'une base de données de risques génériques et des solutions d'atténuation associées (en relation avec types de projet et contextes)

Niveaux de maturité du risque

Pour l'intégration pleine et entière du risque dans l'expérience BIM, nous pourrions définir des niveaux de maturité du risque (menace ou opportunité) pour anticiper les évolutions du BIM :

- Niveau 0 : Catégorie de risque (aujourd'hui)
- Niveau 1 : Niveau 0 + Identification (à venir)
- Niveau 2 : Niveau 1 + Criticité (à venir)
- Niveau 3 : Niveau 2 + Traitement (à venir)

- Niveau 4 : Niveau 3 + Évolution dynamique (à venir)
- Niveau 5 : Niveau 4 + Contexte et Parties Prenantes (à venir)

II. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

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

De plus, la mise en œuvre d'équipements manufacturés dans des ouvrages de génie-civil réalisés en place, mais aussi les déformations de grandes structures massives, nécessitent une gestion anticipée des tolérances de fabrication et d'assemblage, dont la représentation graphique reste actuellement difficile et mal standardisée.

Dans les deux livrables de MINnD S2, nous avons abordé toutes les notions traitant d'incertitudes et de tolérances pendant les différentes phases d'un projet de construction, et bien sûr, au travers de la gestion des risques qu'elles induisent.

Recommandations générales

- Le niveau de détail d'un projet, d'un système et de ses composants s'améliore au fur et à mesure du développement des études. C'est un des objectifs de l'EIR de la norme ISO19650 qui définit les processus d'échanges de données : la planification de la livraison du LOIN (quoi) dans chaque phase (quand), sous la responsabilité de quel partenaire (qui) et en suivant quels processus (comment).
- Des métadonnées associées aux données sont une source complémentaire de certitude permettant d'augmenter le niveau de connaissance et de confiance : ce sont des informations clés attribuées aux produits, systèmes et objets, et qui autorisent d'identifier les incertitudes et leurs risques associés, afin de les réduire, de les supprimer, voire de les transformer en opportunités, et *a minima*, de les partager entre les différents acteurs du projet, de manière unique et certaine.
- Des principes des IFC PropertySet (as-designed, Tel-Que-conçu) et des IFC-QuantitySet (as-built, Tel-Que-Construct), attributs des objets IFC spécifiques aux tolérances et incertitudes, découle que ce n'est pas au BIM de résoudre les problèmes de tolérances et d'incertitude, mais de documenter l'information (dans le but par exemple, d'obtenir une mesure entre deux objets avec l'affichage de la tolérance embarquée dans les paramètres des objets concernés).

Recommandations en phase de conception

- Faire la distinction, dès la conception, des tolérances affectées au produit et des tolérances affectées au processus de réalisation. En effet, les tolérances du produit peuvent être décrites, puis mesurées et analysées à tout moment. Les tolérances des différents processus de réalisation (calibrage et dérèglement des outils, enchaînement de tâches unitaires, mesures et localisation des objets réalisés en place...) sont évolutives et influencées par des critères extérieurs au produit lui-même. La prise en compte du contexte de réalisation des travaux, dès les phases d'études de conception et de constructibilité, permettront d'identifier les risques et de les gérer afin de les modérer ou de les éliminer.

Recommandations en phase de construction

- La construction d'un ouvrage ou d'un bâtiment nécessite de nombreuses adaptations sur site, en fonction du « réalisé » dans les phases précédentes (et pas uniquement du « prévu »), afin de compenser certaines déformations ou dérives de tolérance liées à la méconnaissance de paramètres (par exemple la géologie). Ces adaptations doivent être documentées et transmises aux partenaires au sein d'une même phase mais aussi entre les différentes phases du projet, afin d'informer tous les acteurs de ce qui a été réellement réalisé et dans quelles circonstances. En effet, ces informations peuvent elles-mêmes influencer sur les

Recommandation en phase d'exploitation / maintenance

phases suivantes avec de nouvelles incertitudes ou la levée de certaines déjà identifiées.

- L'amélioration de la qualité de la construction (ou plutôt la diminution de la non-qualité) mais aussi la maîtrise des délais et des coûts passent par :
 - la précision des échanges de données (échanges frugaux de données) ;
 - la sécurisation et la facilité de l'accès aux données (CDE, PLM) ;
 - la fiabilisation des données (contrôles qualité automatiques) ;
 - la représentation des tolérances (pour identification/compréhension des interfaces et anticipation des enjeux) ;
 - la représentation graphique des incertitudes (pour fiabiliser les rapports, identifier et maîtriser les risques, comprendre et donc faciliter prises de décision).
- Nous avons constaté que les exigences des exploitants/mainteneurs vis-à-vis des données ne concernent jamais les notions de tolérances, mais plutôt des critères de structuration, de localisation, de fiabilité et d'unicité des données permettant une bonne gestion des systèmes mis en œuvre et leur intégration dans l'environnement externe.
- Pourtant, le positionnement de certains équipements (par exemple le fil de rail ou le fil de caténaire d'une voie ferroviaire) dans une plage fonctionnelle admissible est un impératif opérationnel. Mais sa représentation graphique n'est pas indispensable : seules des données renseignées et suivies dans un outil de maintenance (données « Tel Que Maintenus ») sont adaptées à l'exigence et à la convention de service appropriée.
- Une recommandation porte sur la mesure d'un risque, son interprétation et sa contextualisation, car la gravité des risques associés n'a pas la même valeur en fonction de sa localisation ou de son environnement direct.
- Une perspective identifiée est la planification de la maintenance⁴⁶, c'est-à-dire une visualisation complète d'une infrastructure comprenant la géolocalisation des ouvrages et précisant le détail des systèmes à maintenir. Des indicateurs colorisés peuvent afficher l'état courant des systèmes et les opérations de maintenance planifiées ainsi que leur budget affecté, afin d'assurer la performance optimale de l'infrastructure en fonction des budgets annuels alloués.
- Dans l'industrie, nous avons pu constater que l'analyse du respect de la tolérance est généralement appliquée depuis la phase de réalisation et suivie jusqu'en phase d'utilisation, alors que dans le domaine des infrastructures, c'est plutôt en phase de réalisation que cette analyse est prépondérante (même si dans quelques cas, comme les infrastructures ferroviaires, elle reste tout de même significative en phase d'exploitation). C'est pourquoi l'industrie développe actuellement la notion de jumeau numérique afin de réaliser des simulations de modèles virtuels pour anticiper les comportements futurs, mais aussi de mieux gérer des incertitudes des systèmes en exploitation (par gestion des écarts entre le nominal et la réalité observée). Elle le réalise notamment au niveau du Jumeau Numérique des moyens de production.
- On retrouve également de plus en plus de produits dits « connectés » permettant d'exploiter des informations sur le produit pendant sa phase d'exploitation. Mais leur mise en œuvre est encore difficile, notamment par la dimension « localisation spatiale » et « plage temporelle » qui complexifie le lien vers le Jumeau Numérique. Son objectif est principalement de suivre la vie du produit et d'en déduire des évolutions

⁴⁶ Appelée aussi 7D ou 7ème dimension du BIM: Maintenance et informations de gestion globale des installations pour l'ensemble du cycle de vie

et améliorations sur le produit futur, mais encore rarement d'agir directement sur ce dernier en temps réel, pour apporter de meilleurs services aux usagers.

- Dans le secteur de la construction, les usages du Jumeau Numérique de l'ouvrage (afin de réaliser des simulations et des prédictions de comportement) restent encore à définir. Ce Jumeau Numérique sera bien évidemment basé sur le DOE numérique, dans la mesure où la définition du niveau d'information à livrer sera parfaitement défini afin que les données restent juste suffisantes avec les besoins des usages identifiés. Le Jumeau Numérique du chantier (fantôme digital puisqu'il représente un objet vivant qui s'adapte constamment à la construction des ouvrages) demeure un enjeu qui permettra, entre autres, d'améliorer la coactivité, l'organisation du chantier, la sécurité des hommes... Cela passe par des technologies numériques en cours de déploiement, comme les IoT qui autorisent une alimentation en continu de tableaux de bord pour exposer les indicateurs pertinents et faciliter les prises de décisions.
- La gestion des risques d'un ouvrage en phase d'exploitation se base principalement sur un modèle statique, c'est à dire une vision à un instant donné qui permet de vérifier que la plage de fonctionnement est toujours admissible. Pourtant, le suivi de la courbe de dérive de certains paramètres devrait conduire à des actions correctives préventives. Mais les tendances d'évolution d'un ouvrage ou d'une infrastructure ne sont pas généralisables, car l'impact de l'environnement extérieur au fil du temps (dont il n'existe pas de modélisation) est rarement pris en considération. Le Jumeau Numérique utilisé dans le domaine industriel est une représentation d'un ensemble de produits similaires (reproductions d'un prototype), alors que le Jumeau Numérique de la construction représente une instance d'un ouvrage unique dans son contexte spécifique, dont l'enjeu est de prédire, entre autres, quand l'ouvrage va sortir de sa plage de tolérance admissible.
- Concernant l'expression Jumeau numérique, il est absolument nécessaire d'avoir un langage commun et une culture commune, sinon faute de définition partagée **l'expression « Jumeau Numérique » générera de l'incertitude !**

Impacts sur la gestion des risques

Parmi les avantages de la modélisation BIM des données des ouvrages, la coordination et la collaboration, ainsi que la détection précoce des conflits, permettent de prendre des décisions justifiées, d'atténuer les menaces, faire des simulations rapidement, diffuser des plans actualisés, etc.

Un projet de construction traditionnel se caractérise par un nombre important de parties prenantes, une diversité des métiers à intégrer à chaque phase. La convergence des expertises nécessaires pour chaque ouvrage requiert un flux optimisé d'informations et de communications restant largement inspiré du modèle « papier ». Face à cette complexité inhérente, la rupture du flux d'informations et de communications peut déboucher sur des blocages relationnels, voire des litiges entre les acteurs. Ce dernier point constitue une menace majeure quant au respect des spécifications à chaque fin de phase de la conception, à la construction, à l'exploitation et à la maintenance.

L'innovation associée à la modélisation des données grâce au BIM répond en grande partie à ce défi d'intégration. La maquette numérique de l'ouvrage permet de générer un référentiel actualisé, commun et complet des données relatives aux installations, de la conception à l'exploitation et à la maintenance. Le BIM représente un levier organisationnel et technique, source de nombreuses opportunités.

À l'issue de ce travail, nous entrevoyons les promesses de la maquette numérique et de ses déclinaisons (jumeaux numériques) :

- la possibilité d'améliorer de manière significative la satisfaction des parties prenantes quant à un niveau de certitude sur le respect des délais, des coûts et des performances sur tous les projets de construction et les programmes d'infrastructure.
- replacer le risque, menace ou opportunité, au centre de la problématique de la construction grâce au BIM s'appuyant sur la gestion des incertitudes et des tolérances alors que traditionnellement, le management des risques a souvent été le parent pauvre des processus associés à l'acte de construire.
- augmenter la définition initiale du Risque selon l'ISO 31000 « Effet de l'incertitude sur les objectifs du projet » en y adjoignant la notion de tolérance : « Effet de l'incertitude et des tolérances sur les objectifs du projet ». La tolérance associée détermine l'acceptabilité ou non des menaces comme des opportunités.

Aujourd'hui, l'information Risque portée par le BIM est limitée à la typologie du risque. Demain, l'information BIM devra intégrer aussi les données dynamiques liées à l'identification, la criticité, le traitement échéant, voire la caractérisation des parties prenantes et du contexte (premier processus de l'ISO 31 000).

Perspectives

Du fait de l'exhaustivité et la diversité des concepts abordés dans ces 2 livrables, notre analyse finale est évidemment de souligner le caractère primordial de gérer correctement les intolérances et les incertitudes, même si les outils graphiques actuels ne sont pas encore capables de les modéliser et de les exposer complètement.

Dans notre contexte actuel d'urgence climatique, les technologies numériques sont incontournables pour piloter la trajectoire bas carbone. Pour cela, les évaluations ne seront possibles que si des indicateurs comparables sont partagés par tous. Effectivement, cela permettra une meilleure connaissance des ouvrages en exploitation, une meilleure connaissance du bâti construit, une meilleure connaissance du contexte et du sous-sol. La maîtrise des incertitudes est un des leviers de la bonne compréhension de l'environnement impacté par les infrastructures en construction ou en exploitation.

Les suites envisageables de ces 2 livrables seraient donc un approfondissement des nouvelles technologies disponibles, principalement en termes de :

- visualisation des informations de tolérances et d'incertitudes géométriques dans les logiciels de conception 3D, en corrélation avec les modèles mathématiques par exemple. De plus, il serait intéressant d'appréhender les valeurs de tolérances et d'incertitudes non plus « statiquement » sur un élément de la modélisation de l'ouvrage ou du système mais en lien avec son contexte qui lui-même est mouvant, évolutif, incertain. C'est cela qui génère également des « risques » nouveaux.
- simulation prédictive, non plus seulement basée sur des critères d'incertitudes et de tolérances « prévues » par définition, mais également recalibrés régulièrement par capture des données réelles sur l'infrastructure lors de son exploitation. Ce monitoring « dynamique » permettant d'anticiper des aléas hors plages de tolérances, influencés par le comportement dynamique de l'ouvrage et les évolutions de son environnement et d'y remédier avant événement critique comme ont pu le montrer les incidents récents sur les ouvrages.
- Data science et Intelligence Artificielle, afin de dégager des modèles mathématiques à partir de collections de « faits » remarquables, par la contextualisation

des données dans leur environnement proche. Désormais, il s'agit bien d'exploiter les données dans leur contexte et de les corrélérer avec des cas similaires constatés par ailleurs, afin de proposer des pistes de modélisation et de meilleure estimation des incertitudes. Des bénéfices significatifs sont ainsi fortement espérés, même s'il est très difficile de les qualifier ou de les quantifier.

- Réalité augmentée et Réalité virtuelle, afin de faciliter l'accès aux données par une meilleure compréhension des ouvrages et méthodologies à mettre en œuvre, par une immersion de l'utilisateur dans l'ouvrage et son contexte (identification des zones à risques...) et par une « uniformisation » de lecture de ces éléments. En effet, même si la modélisation 3D permet une grille de lecture plus universelle par appropriation de cette représentation, elle reste attachée à la sensibilité personnelle et professionnelle de chacun.

I2. ANNEXE A – FLOU DE L'INFORMATION

Thèse de Charles-Edouard Tolmer (Nov2016)

La qualité des données disponibles

On trouvera ici un court rappel sur la notion de flou introduite dans la thèse de Charles-Edouard Tolmer [3] « Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en œuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines: Prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets » et en particulier dans l'annexe F.

« La qualité de la conception dépend fortement de la qualité des données disponibles. Le problème n'est pas de concevoir sans données, mais d'introduire des évaluations de la qualité des données, ou de leur manque de qualité, dans le processus de conception lui-même ». The sciences of the artificial, Herbert Simon, 1982 [9].

Cette citation illustre parfaitement l'objet de cette section. Plusieurs sujets sont implicites dans la notion de flou mais de manière générale, nous concevons en permanence avec un manque de données comme illustré sur la figure Fig.80.

Le flou informationnel initial s'inscrit dans une réalité de management où le succès d'un projet se « gagne » dès le début, lorsque les données d'entrée sont plus ou moins fiables. L'enjeu est de décider dans un environnement d'incertitudes normalement décroissante.

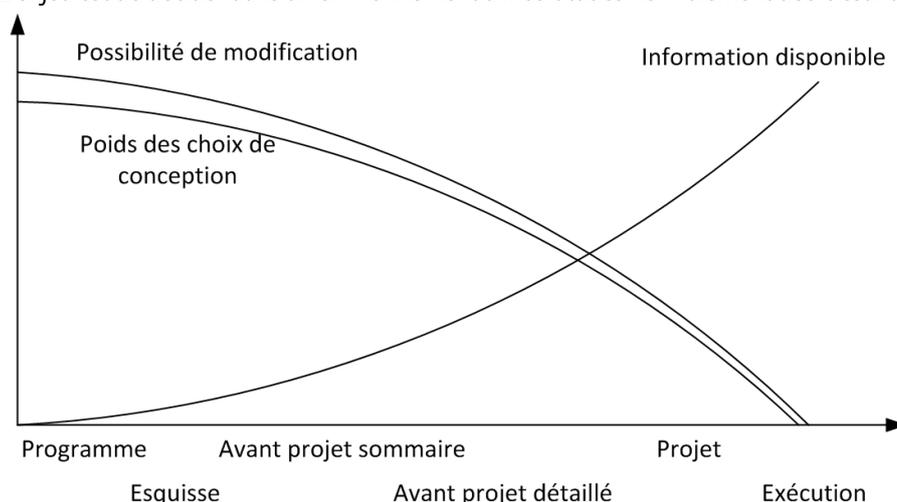


Fig.80 : Illustration du paradoxe du processus de conception adapté de Adolphe (1991) [7] et Diab (2000) [8]

Éléments participants au flou de l'information

C'est d'ailleurs ce qui fait la force de l'humain face à la machine qui ne peut aujourd'hui travailler avec des données partielles. En nous basant sur plusieurs travaux (Miralles, 2008 [4]; Tacnet et al., 2012 [5]; Zoghلامي, 2013 [6]), nous donnons ici les éléments qui participent au flou de l'information :

- **Inconsistance** : contradiction entre deux sources de la donnée ;
- **Imprécision** : approximation de la valeur donnée (« environ X mètres ») ;
- **Incomplétude** : toutes les informations ne sont pas renseignées ;
- **Incertainité** : est-ce que cette information est vraie ? Est-ce que mon interprétation de ce que je vois correspond à la réalité ?

Méconnaissance de l'existence du flou

Le problème n'est pas que l'information soit floue ou incomplète : il est plutôt de ne pas connaître l'existence de ce flou dans les données. Pour prendre des décisions en connaissances de cause, la qualité et la validité de l'information doit être qualifiée. La représentation visuelle de l'information peut ensuite traduire cette imprécision à l'aide des

outils décrits dans la section ci-dessus. Le texturage permet par exemple de traduire visuellement la qualité de l'information : certaines textures particulières peuvent s'ajouter à la représentation d'un objet lorsque sa précision n'est pas suffisante par rapport à une décision à prendre. Le texturage ne doit plus être uniquement la conséquence de la progression de la conception. Il doit par ailleurs faire partie des règles de modélisation du projet. Des annotations graphiques peuvent également participer à la bonne compréhension de l'information représentée et des problèmes à traiter [Guibert et al., 2009]. Un dernier élément sur ce thème mérite d'être évoqué : il s'agit de l'introduction du flou directement dans les modèles conceptuels et pas uniquement sur la représentation des objets. Évoquons par exemple, le Fuzzy PERCEPTORY étudié dans Zoghلامي, 2013 [6]. Il permet de décrire le modèle conceptuel de données géospatiales imparfaites.

I3. ANNEXE B – JUMEAUX HYBRIDES

La notion de Jumeau Hybride

Pour la phase de conception, certains chercheurs⁴⁷ mettent en avant un nouveau type de jumeau : le Jumeau Hybride (Hybrid Twin).

Selon ces chercheurs, le Jumeau Numérique, basé uniquement sur des modèles numériques, ne remplacera pas les **modèles basés sur les connaissances physiques**. Ces derniers, issus des équations de la physique, ont fait leurs preuves dans tous les domaines, que ce soit pour la conquête spatiale, la construction aéronautique ou la conception des immeubles de grande hauteur et des ponts.

Apport du jumeau hybride par rapport au jumeau numérique

Le Jumeau Numérique permet de simuler au plus juste les futures performances d'un produit en conditions d'utilisation. Encore faut-il que le modèle de base soit le reflet du produit tel que fabriqué, non pas uniquement tel que conçu, et qu'il puisse intégrer des phénomènes complexes multi-domaines, multiphysiques, multi-échelles.

Pour répondre à ces lacunes, le **concept de Jumeau Hybride** combine un prototype virtuel intégral, mariant :

- la physique des matériaux,
- le contexte du produit,
- le fonctionnement des systèmes,
- les données d'utilisation.

Ces dernières peuvent :

- être théoriques,
- être passées,
- refléter l'usure des systèmes de production,
- refléter l'utilisation du produit quasiment en temps réel au moyen de données collectées par des capteurs IoT.

Les fabricants industriels peuvent anticiper la performance opérationnelle de leurs produits ou de leur production dès les phases de conception, pour permettre des prises de décision efficaces. Concrètement, il va permettre de faire de la maintenance prédictive et d'optimiser la performance des produits comme des infrastructures.

Association des lois physiques et des données captées

Il reste toutefois des situations pour les systèmes complexes où il est parfois difficile de simuler exactement le comportement de l'objet réel, comme dans le domaine thermique par exemple. Il existe un écart, une incertitude, entre les informations issues du monde réel et des lois physiques.

Pour répondre à ce problème, il est proposé de compléter les modèles « lois physiques » par des données captées sur un objet physique (par exemple une maquette physique, un prototype, un contexte...). Cette association des lois physiques et des données captées permet d'ajuster les simulations en « temps réel », d'affiner les résultats issus des simulations et de diminuer ainsi les incertitudes sur les informations intrinsèques aux deux mondes, réel et conceptuel.

Le Jumeau Hybride alimenté par le flux de continuité numérique

En reprenant les notions d'associativités entre Jumeau Physique et Jumeau Numérique telles qu'exposées par Aidan Fuller, Zhong Fan, Charles Day & Chris Barlow⁴⁸, on peut faire un parallèle vers la génération, l'alimentation et la mise à jour des Jumeaux Physique et Numérique) au concept de Jumeau Hybride.

⁴⁷ Pr Francisco Chiniesta (Médaille d'argent du CNRS 2019)

⁴⁸ Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358, IEEE Access

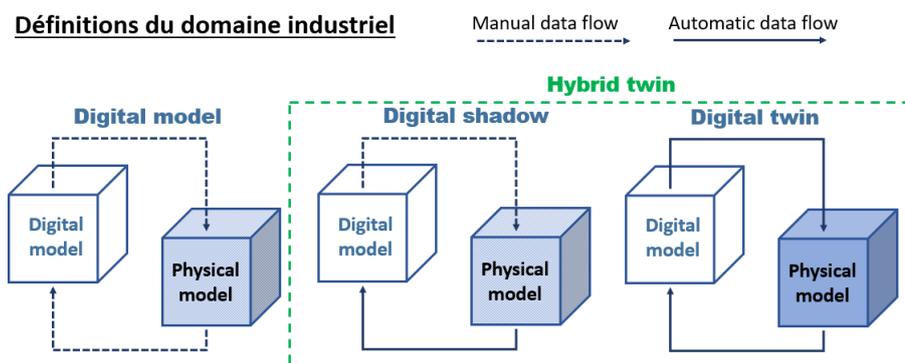


Fig.81 : Le Jumeau Hybride

Le Jumeau Hybride au regard des différents modèles digitaux

Nous pouvons considérer ici que la notion de « Hybrid Twin » recouvre les deux notions « Digital Shadow » et « Digital Twin », qui diffèrent essentiellement sur le niveau de couverture de la continuité numérique des informations mises en œuvre entre l'ouvrage ou le produit physique et son avatar numérique.

En revanche le terme « Jumeau Hybride » ne peut pas recouvrir la notion de « Digital Model » dans le sens où le flux numérique d'information n'est pas présent, et par conséquent aucun recalage ou alignement des modèles ne peut se faire.

L'utilisation du Jumeau Hybride est essentiellement circonscrite en phase amont de conception (là où le modèle physique n'existe pas encore) ou en dernier recours en retro-modélisation d'un modèle physique considéré comme 'mort' ou 'statique'.

Applications du Jumeau Hybride au domaine de la réalisation d'une construction

Des solutions basées sur des modèles prédictifs (dont les données sont directement issues de l'avancement de la construction) existent pour mieux simuler certaines situations en phase de conception et de construction :

- Avancement d'un tunnelier dans un milieu géologique incertain.
- Simulation de l'avancement d'un chantier.
- Préfabrication de voussoirs de tablier d'ouvrage d'art, en contre-moule des voussoirs déjà réalisés (afin d'obtenir la géométrie idéale du tablier de l'ouvrage complet).
- Maintenance prédictive des engins de chantier.
- ...

Autres exemples concrets

Modèles conceptuels et théoriques corroborés par des mesures réelles (éventuellement sur maquette physique à échelle réduite) :

- Calcul aéraulique : Vents et tourbillons sur un ouvrage d'art.
- Calcul vibratoire : houle sur ouvrages maritimes, résonance de câbles de suspension ou de tablier de pont.
- Calcul sismique : immeuble de grande hauteur.
- ...

I4. RÉFÉRENCES

- [1] Benboudjema F. (2002). Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceinte de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires, Thèse de l'Université de Marne-la-Vallée, 225 p.
- [2] Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures: Research Project CEOS.fr, ISTE, Civil Engineering and Environmental Geomechanics, Wiley, Sept. 2016 DOI: 10.1002/9781119347088.ch10
- [3] Charles-Edouard Tolmer, Christophe Castaing, Denis Morand, Youssef Diab. Modèle conceptuel pour la structuration de l'information en conception d'infrastructures. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. <hal-01167727>
- [4] Miralles, A. (2008). Ingénierie des modèles pour les applications environnementales. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II
- [5] Tacnet, J.-M., Batton-Hubert, M., Dezert, J. et Richard, D. (2012). Decision support tools for natural hazards management under uncertainty. New approaches based on multicriteria decision analysis and evidential reasoning. In 12th Congress INTERPRAEVENT, pages 597–608, Grenoble, France
- [6] Zoghalmi, A. (2013). Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision. Thèse de doctorat, Université Paris 8.
- [7] Adolphe, L. (1991). L'aide à la décision technique dans la conception architecturale. Thèse de doctorat, Doctorat, École Des Mines de Paris.
- [8] Diab, Y. (2000). Génie civil urbain et environnement : quelques pistes de recherche. page 200, Habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie - Chambéry.
- [9] Simon, H. (1982). The sciences of the artificial. The MIT Press, Cambridge.
- [10] Lepadatu, D (2006). Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse. Sciences de l'ingénieur. Université d'Angers.

Table des matières

I. RÉSUMÉ ABSTRACT	3
Résumé	3
Abstract	4
1.1 Abréviations / Glossaire.....	4
Glossaire	6
Définitions	6
Notions complémentaires.....	6
Mots clés principaux.....	6
Mots clés du livrable	6
Main key words (Eng).....	6
Deliverable key words (Eng).....	6
2. INTRODUCTION.....	7
2.1 Enjeux du Groupe de Travail GT2.2.....	7
La nécessité de trouver des méthodes de représentation... ..	7
... des incertitudes... ..	7
... et des tolérances.....	8
Incertitudes et tolérances, deux concepts liés.....	8
Enjeu du GT2.2 de MINnD S2.....	8
3. ÉTAT DE L'ART ET REPRÉSENTATIONS DANS L'INDUSTRIE.....	9
3.1 Enjeux dans l'industrie.....	9
Enjeux de la gestion des tolérances et incertitudes.....	9
Rappel types de tolérances	9
Rappel types d'incertitudes	9
Cas d'emploi et domaines.....	9
Des temporalités différentes sur les tolérances dans l'industrie	9
Enjeux autour des Jumeaux Numériques.....	10
3.2 Normes.....	10
Normes permettant de cadrer la modélisation des incertitudes et tolérances dans l'industrie.....	10
Norme ASME Y14.5	10
Norme ISO 1101	10
Représentations des tolérances.....	11
Principe de Taylor.....	11
Tolérance de forme et tolérance de position.....	12
Tolérances autour du principe d'indépendance	13
Exigences et Tolérance d'enveloppe	14
Tolérancement géométrique	14
Format d'une annotation de tolérancement	14
3.3 Types de représentations 2D	15
Objectif de la représentation 2D.....	15
Plans d'exécution des ouvrages	17
Exploitation et modélisation des incertitudes et tolérances en 2D	17
La représentation par cote pour la création de la donnée	18
Le « measure between »	19
3.4 Types de représentations 3D	19
Objectif de la représentation 3D... un peu d'histoire de la perspective	20

	Modélisation des tolérances en 3D.....	22
	Modélisation des incertitudes en 3D.....	22
	La représentation par champ de vecteurs.....	23
3.5	Analyse de tolérance sur des assemblages.....	24
	Détection de collisions : un outil de simulation.....	24
	Les différentes méthodes d'analyses de détection de clashes.....	25
3.6	Propriétés des objets.....	26
	Stockage et rétention d'information.....	26
	Contraintes liées au format des objets.....	28
	Conséquences en matière de représentation des données.....	30
3.7	Gestion de configuration.....	31
	Principe de gestion de configuration.....	31
	Enjeux de la GdC.....	31
	Les types de GdC.....	32
	GdC documentaire.....	32
	GdC produit.....	32
	Codification des produits.....	33
	Recommandations.....	34
	Propriété intellectuelle et ségrégation des données.....	37
	Désignation et référence produit.....	37
	Taxonomie.....	39
	Méronymie.....	39
3.8	Ingénierie système.....	39
	Ingénierie système.....	39
	Définition d'un modèle.....	40
	Focus sur la définition des modèles.....	41
	Approche Requirement Centric.....	41
	Approche Model Centric.....	41
	Concept du MBSE.....	42
	Avantages du MBSE.....	42
	Approche système et MBSE adaptés au domaine de la construction.....	42
4.	APPORT DU JUMENTAUX NUMÉRIQUE DANS LA GESTION DES INCERTITUDES ET DES TOLÉRANCES.....	45
	Remarque.....	45
4.1	Jumeaux Numériques.....	45
	Définition normalisée du Jumeau Numérique.....	45
	La Nasa introduit le concept de Jumeau physique.....	45
	La Nasa et le Jumeau Numérique.....	45
	Introduction du concept de Jumeau Numérique.....	45
	Définition du Jumeau Numérique par l'Alliance Industrie du Futur.....	45
	Un Jumeau Numérique à différentes échelles.....	46
	La notion de continuité numérique.....	46
	Le Jumeau Numérique comme moyen d'expression de la continuité numérique.....	46
	Le Jumeau Numérique et la technologie.....	46
4.2	Les stades du Jumeau Numérique.....	47
	Les stades du jumeau numérique.....	47
	Digital Model.....	47
	Digital Shadow.....	48
	Digital Twin.....	48
	Informations statiques et dynamiques.....	48

Deux manières de percevoir la continuité numérique.....	48
Éléments technologiques clefs.....	50
Le Jumeau Numérique pour minimiser les incertitudes.....	51
4.3 Usages du Jumeau Numérique	51
Usages du Jumeau Numérique	51
Application à l'industrie 4.0	52
4.4 Jumeau Numérique dans le domaine de la construction.....	52
Usages du JN dans le domaine de la construction	52
Jumeau Numérique en phase d'exploitation / maintenance.....	52
Jumeau Numérique en phase de construction.....	53
Recommandations.....	54
Jumeau Hybride.....	55
5. MODES DE REPRÉSENTATION DES INCERTITUDES	56
5.1 Rappels des enjeux	56
Rappels de définitions	56
But du calcul d'incertitude	56
Relevé d'une incertitude.....	56
Différence entre erreur et incertitude.....	56
Incertitudes d'un projet de construction	56
Prise décisions	56
Management des risques	56
Plan de management des risques.....	56
Exemples de représentation	57
5.2 Plan du corps de rue simplifié	57
Le PCRS.....	57
Les plans de réseaux doivent être géoréférencés	57
Localisation des réseaux et classes de précision	57
5.3 Relevés physiques des données du sous-sol	58
Remarque.....	58
Sondages et forages	58
Capteurs et instruments de mesure.....	59
Données géologiques	59
Données géotechniques	59
Méthodes d'acquisition des données du sous-sol	59
Méthodes de forages.....	59
Acquisition in situ.....	61
Essais de laboratoire	61
Analyse / Décisions	62
5.4 Relevés numériques / Traitement des données.....	62
Méthodes de relevés numériques - Références.....	62
Captation de données.....	63
Technologies mobiles de captation de données	63
Drone	63
Traitement des données.....	63
Processus de traitement des données	64
Analyse des résultats.....	64
Responsabilités du topographe.....	65
Cas d'usage sans topographe	65
Quelques exemples d'applications	66

	Fil de rail, fil de caténaire d'une infrastructure ferroviaire.....	66
	Pathologies des ouvrages.....	66
5.5	Représentation graphique	67
	Représentations sur Plans 2D	67
	Représentation de modèles géologiques 3D.....	68
	Données d'entrée	68
	Incertitude sur les données d'entrée.....	69
	Modélisation d'une coupe du sous-sol	69
	Modélisation 3D du sous-sol (logiciel GDM)	70
	Modélisation d'une coupe du sous-sol (logiciel GDM)	70
	Analyse des résultats.....	71
	Représentation de modèles géotechniques 3D	71
	Théorie des incertitudes	71
	Représentation spatiale.....	72
	Représentation temporelle	72
5.6	Gestion des incertitudes.....	73
	Travaux souterrains	73
	Fascicule 69 du CETU	73
	Aléa et registre des incertitudes	73
	Recommandations de AFTES.....	74
	Ouvrages d'Art	77
	Définition de l'auscultation par l'Ifsttar	77
	L'auscultation ou l'instrumentation dans le processus de gestion des ouvrages	77
	Stockage des données	78
	L'état de la recherche.....	79
	Rôle de l'association IMGc Ingénierie de la Maintenance du Génie Civil.....	79
6.	MODES DE REPRÉSENTATION DES TOLÉRANCES.....	80
6.1	Rappels des enjeux	80
	Prise de décisions	80
	Gestion des risques associés	80
6.2	Informations attributaires des IFC	80
	Attributs complémentaires des classes IFC	80
	PSet Tolerance pour traiter la tolérance géométrique dimensionnelle.....	81
	PSet Uncertainty pour traiter la tolérance spatiale	82
	PSet Risk est relative aux types de risques prédéfinis	83
	Types de risque	84
6.3	Représentation graphique	85
	Phases Conception et Construction	85
	Maintenance / Exploitation d'un Bâtiment ou d'une Gare	85
	REX SNCF Gares et Connexions.....	86
	REX Bouygues Energie et Services	86
	État des lieux du DOE.....	87
	Recommandations pour le DOE numérique d'un bâtiment	87
	Réversibilité des données du DOE	88
	Maintenance / Exploitation d'une infrastructure linéaire	88
6.4	Quelques exemples significatifs	89
	Exemples significatifs de tolérances dans le domaine sportif.....	89
	Exemples de tolérances dans le domaine des infrastructures et du génie-civil	90
	Centrale nucléaire.....	90
	Nouvelle Route du Littoral à la Réunion	90

	Troisième Pont d'Abidjan	91
	Projet Ligne I4 du GPE – Puits Glarner utilisé pour le montage et le lancement du tunnelier.....	92
	Dépollution de sols.....	93
	Représentation de réseaux enterrés	94
	Représentation de réseaux	95
7.	NIVEAUX D'INFORMATION NÉCESSAIRE	97
7.1	Rappels des enjeux	97
	Les données d'un projet	97
7.2	Augmentation de la précision pendant le développement	97
	Niveau de développement, niveau de détail.....	97
	Niveaux de développement définis par BIMForum.....	97
	LOD 100.....	97
	LOD 200.....	97
	LOD 300.....	97
	LOD 400.....	98
	LOD 500.....	98
	Niveaux de développement définis par Syntec Ingénierie.....	98
	Notion de flou	99
	Flou de représentation géométrique	99
	Flou de qualité des données	99
	LOIN	99
	Introduction de la norme NF EN 17412-1 ou ISO/DIS 7817	99
	Contexte de la norme NF EN 17412-1 ou ISO/DIS 7817	99
	Principe de la norme NF EN 17412-1 ou ISO/DIS 7817	99
	LOIN et EIR	100
	Gestion des tolérances et LOIN.....	100
7.3	Sobriété numérique	101
	Sobriété numérique	101
	Infobésité.....	101
	Numérique responsable ou numérique raisonné.....	101
	La donnée et son usage.....	101
	Notion de « suffisance ».....	101
	Smart Data vs Big Data.....	101
	Big Data	102
	Smart Data.....	102
	Complémentarité.....	102
	Data Lake et Data Warehouse.....	102
	Data Lake ou Data Warehouse ?	102
	Besoin d'information liée à l'usage	103
	IDM	103
	MVD	103
	DOE Numérique.....	104
	Besoins Exploitant / Mainteneur	104
	Éléments du DOE en marchés publics	104
	DOE Numérique	104
8.	NOTIONS DE QUALIFICATION ET DE VALIDATION D'ATTRIBUTS	106
8.1	Contrôles automatiques.....	106
	Contrôle d'une maquette numérique	106
	Outils logiciels.....	106
	Processus	106
	Liste des règles à respecter pour la validation des attributs des objets d'une maquette numérique	107

	Gestion des collisions et des manques.....	107
8.2	Critères d'acceptation	107
	Pourcentage d'acceptation	107
	Indicateur d'état de validation	107
	Exhaustivité et échantillonnage.....	108
	Pondération des critères	108
9.	RECOMMANDATIONS POUR LA FILIÈRE INFRA	109
9.1	Modes de représentation dans un modèle IFC.....	109
	IFC et tolérances	109
9.2	Exigences et Modèles dans le contexte de la norme ISO19650	110
	La série des normes NF EN ISO 19650	110
	Les exigences de la norme	110
	Les modèles d'informations de la norme	110
	Gestion des tolérances.....	111
9.3	Prérequis pour gérer les Incertitudes et Tolérances	112
	Structuration de données.....	112
	Contextualisation.....	112
	Classification	112
9.4	Recommandations d'architecture logicielle du projet.....	114
	Schéma en V ou en Racine carrée pour le développement du projet.....	114
	Schéma en Racine carrée √	114
	Itérations des études et Validations continues.....	115
	Prise en compte des incertitudes et tolérances	116
	Architecture logicielle cible d'un projet.....	117
	Briques logicielles contenant des incertitudes	117
	Data mining et Reporting	118
	Portfolio des logiciels techniques	118
9.5	Réalités augmentée, virtuelle et mixte	119
	Les technologies Rx.....	119
	Réalité augmentée RA	119
	Réalité virtuelle RV	120
	Réalité mixte RM	120
	Les usages et perspectives de la Rx	120
	Perspectives	120
9.6	Nouvelles technologies d'analyses de données.....	120
	Intelligence Artificielle, Machine learning et Deep Learning	120
	Intelligence Artificielle	120
	Machine learning.....	121
	Deep learning	121
	Machine Learning pour le calcul des incertitudes	121
	Modèles prédictifs	121
	Principe du Machine Learning	122
	Perspectives du Machine Learning	122
	Perspectives d'IA et ML pour le Jumeau Numérique	122
	IA pour maintenance des Ouvrages d'Art	122
9.7	Recommandations et perspectives pour la filière	123
	Chaîne de création et d'analyse des informations	123
	Format de données.....	123
	Norme d'échange de données.....	123

Structuration des données	123
Architecture logicielle du projet	123
Technologies d'affichage des données	123
Technologies d'analyses des données	123
Approche globale du cycle de vie de la donnée	124
10. IMPACTS SUR LA GESTION DES RISQUES	125
10.1 La gestion des risques	125
La culture du risque	125
La gestion des risques	125
Le risk manager	126
Les risques génériques	126
La matrice des risques	127
Des métadonnées pour attribuer des risques aux produits	128
Une passerelle entre métadonnées et registre des risques	128
Structure des métadonnées	128
Bibliothèque d'actions	128
10.2 Représentations des risques dans un modèle BIM	128
La métadonnée « Risque »	128
Niveaux de maturité du risque	128
11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	130
Conclusion	130
Recommandations générales	130
Recommandations en phase de conception	130
Recommandations en phase de construction	130
Recommandation en phase d'exploitation / maintenance	131
Impacts sur la gestion des risques	132
Perspectives	133
12. ANNEXE A – FLOU DE L'INFORMATION	135
Thèse de Charles-Edouard Tolmer (Nov2016)	135
La qualité des données disponibles	135
Éléments participants au flou de l'information	135
Méconnaissance de l'existence du flou	135
13. ANNEXE B – JUMEUX HYBRIDES	137
La notion de Jumeau Hybride	137
Apport du jumeau hybride par rapport au jumeau numérique	137
Association des lois physiques et des données captées	137
Le Jumeau Hybride alimenté par le flux de continuité numérique	137
Le Jumeau Hybride au regard des différents modèles digitaux	138
Applications du Jumeau Hybride au domaine de la réalisation d'une construction	138
Autres exemples concrets	138
14. RÉFÉRENCES	139