



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

GT5 Rétro-ingénierie

Données d'entrée, attentes, volumétrie

Auteurs / Organismes

Denis LE ROUX (setec) [Pilote du GT]
William BAYOL (eiffage infrastructure)
Clément BOUDET (setec)
Johann CADREN (vinci autoroutes)
Emmanuel DEVYS (ign)
Laurence GAUTIER (safege)

Benjamin LEHRER (arkance systems)
Nicolas RASOLDIER (arcadis)
Coline THOURY (futurmap)
Alexandre VAUTRIN (snf reseau)
Layella ZIYANI (estp)

Relecteur / Organisme

Vincent COUSIN (Processus & Innovation)

Thème de rattachement : Utilisation des données

MINnDs2_GT5_retro_ingenierie_donnees_entree_attentes_volumetrie_030_2023
LC/21/MINNDS2/100-101-102-103-104-105-106-107-108-109-110
LC/21/MINNDS2/041-042-043-044-045-046-047-048-124
Mars 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	2
2. INTRODUCTION	3
2.1 Lien avec les autres Groupes de Travail MINnD	3
3. DÉFINITION DES ATTENTES / EXIGENCES.....	4
3.1 Travail à proximité d'un ouvrage	4
3.1 Travail sur l'ouvrage	5
3.2 Exploitation et maintenance de l'ouvrage	6
3.3 Aspects normatifs	7
3.4 Exigences de précision et de qualification de l'incertitude des données d'entrée.....	10
3.5 Synthèse des exigences.....	13
4. DÉFINITION, ANALYSE ET SÉLECTION DES ENTRANTS	15
4.1 Définition d'un entrant	15
4.2 Informations géométriques.....	16
4.3 Informations physiques (autres que de dimensions).....	18
4.4 Informations de conception	19
4.5 Informations de mise en œuvre	21
4.6 Informations d'exploitation et pathologies.....	22
4.7 Informations environnementales.....	23
4.8 Informations complémentaires	24
4.9 Inventaire des entrants.....	24
4.10 Sélection des informations entrantes.....	26
5. PLM ET CONTENEURS DE DONNÉES.....	28
6. SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE ET RÉTRO-ENGINEERING.....	31
6.1 Pistes de travail	31
6.2 Preuve par l'exemple.....	33
7. RÉFÉRENCES	37
8. TABLE DES MATIÈRES	38
9. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS	41
10. ANNEXES.....	42
10.1 Tableau de synthèse des exigences	42

I. RÉSUMÉ / ABSTRACT

Résumé

Les missions de rétro-ingénierie, comme toute mission commandée à un prestataire, doivent être définies et cadrées. Le document a pour objectif d'aider les Maîtres d'Ouvrage de la rétro-ingénierie à formuler leur demande en fonction du contexte et de la phase de projet.

Il est très important de définir les informations à acquérir en phase de rétro-ingénierie. En effet, certaines données ne sont pas utiles, certaines sont susceptibles de se recouper. Nous proposons une méthodologie qui traitera de ces aspects dans la seconde partie de ce document.

Comme nous venons de l'exposer, le processus de rétro-ingénierie est consommateur d'informations. C'est pour cette raison que certaines données doivent être « tracées » tout au long du cycle de vie du projet et le cas échéant, supprimées. Ces aspects sont présentés dans des deux dernières parties du document consacré au PLM et à la sobriété numérique.

Abstract

Reverse engineering missions, like any mission ordered from a service provider, must be defined, and framed. The document aims to help project owners of reverse engineering to formulate their request according to the context and the project phase.

It is very important to define the information to be acquired during the reverse engineering phase. Indeed, some data are not useful, some are likely to overlap. We propose a methodology that will deal with these aspects in the second part of this document.

As we have just explained, the reverse engineering process is information consuming. It is for this reason that certain data must be "tracked" throughout the life cycle of the project and, if necessary, deleted. These aspects are presented in the last two parts of the document dedicated to PLM and digital sobriety.

Abréviations

Cf. Glossaire MINnD

Mots clés principaux (Fra)

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

Mots clés spécifiques au livrable (Fra)

Rétro-ingénierie ; Besoins ; Exigences ; Arbitrage ; PLM ; Sobriété ; Projet ; Exploitation ; Maintenance.

Main key words (Eng)

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

Deliverable key words (Eng)

Retro-engineering; Needs; Requirements; Arbitration; PLM; Sobriety; Project; Operation; Maintenance.

2. INTRODUCTION

2.1 Lien avec les autres Groupes de Travail MINnD

MINnD	Le projet de recherche MINnD traite et a traité de nombreux sujets depuis sa création. Nous avons listé ci-dessous des thèmes qui sont en lien avec les groupes de travail actifs lors de la saison 2 de MINnD.
PLM	Voilà plusieurs décennies que les Entreprises de Services Numériques accompagnent l'industrie manufacturière dans sa transformation numérique. Ces services sont rendus à l'aide de nouvelles méthodologies, de nouveaux concepts et outils tels que des outils de Gestion du Cycle de Vie Produit, plus communément dénommés P.L.M. (Product Lifecycle Management). C'est une technologie que nous devons inévitablement prendre en compte dans nos métiers de rétro-ingénierie. Le sujet est traité dans le GT3-1 MINnD saison 2.
DOE	Le point de départ de la rétro-ingénierie est généralement la consultation des DOE. Dans ce contexte, les travaux du « GT2-1 - Réception en BIM » sont primordiaux dans le cadre de la mise en œuvre des missions de rétro-ingénierie.
Incertitudes et Tolérances	Une rétro-modélisation s'appuie sur des mesures in situ. Il est donc pertinent d'exploiter les travaux du « GT2-2 - Gestion des incertitudes et des tolérances ».
Impact Carbone	La rétro-ingénierie est très consommatrice d'informations et peut engendrer un volume significatif de données à stocker. Le « GT0-5 - Impact Carbone » nous éclaire sur ces sujets.

3. DÉFINITION DES ATTENTES / EXIGENCES

Un cadrage indispensable

Prise en compte des phases de projet

Définir la méthodologie à mettre en place dans le cadre de la rétro-ingénierie est fondamental. La première étape consiste donc à bien appréhender les attentes ayant conduit à l'expression du besoin.

Les cinq phases principales d'un projet de construction sont identifiées :

- Diagnostic ;
- Programmation ;
- Contextualisation ;
- Exploitation / Maintenance ;
- Consultation.

Elles s'inscrivent dans trois contextes particuliers : travaux à proximité de l'ouvrage, sur l'ouvrage ou encore en exploitation. Il est important de définir les cas d'usages à mettre en œuvre dans chacune des phases du projet.

Le croisement des cas d'usage et du contexte permet de préciser :

- Les informations d'entrée attendues ;
- le niveau de définition à atteindre dans la modélisation de l'ouvrage.

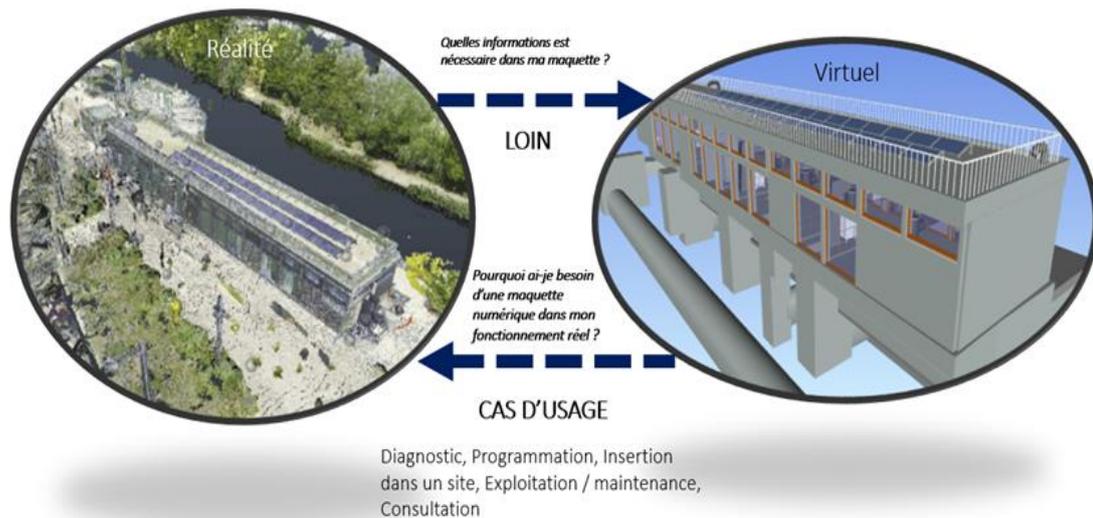


Fig 1. Schéma de principe d'une rétro-ingénierie (source Safege)

3.1 Travail à proximité d'un ouvrage

Environnement support

Il s'agit ici d'ouvrages qui se situent à proximité immédiate des travaux à réaliser et/ou d'ouvrages sur lesquels le projet vient s'ancrer.

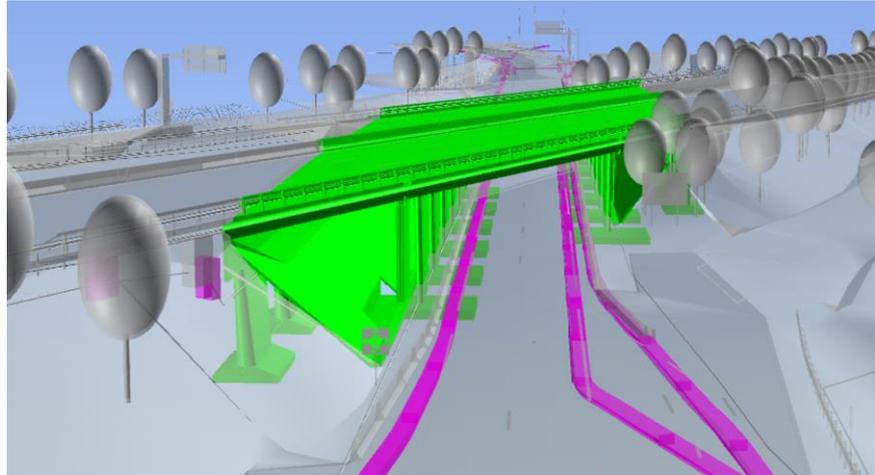


Fig 2. Illustration de la prise en compte d'ouvrages de type réseau à proximité (rose) d'un ouvrage d'art (vert), objet du projet – source : Setec-ASF

Données utiles

Dans ce cas de figure et en particulier pour des projets d'infrastructure, les données les plus importantes sont la géométrie et la position du ou des ouvrages. En particulier dans des contextes urbains où les densités des constructions et de population laissent peu de place à l'erreur. À fortiori lorsque l'on travaille à proximité d'ouvrages anciens et/ou sensibles aux vibrations et aux travaux de manière générale.

Identifier le propriétaire

Une problématique supplémentaire s'ajoute car il s'agit la plupart du temps d'ouvrages appartenant à des concessionnaires tiers.

La difficulté réside alors dans l'obtention auprès de ces derniers des documents précisant les caractéristiques de leurs ouvrages.

Fluidifier les échanges

La formalisation des échanges à l'aide de données structurées, sémantisées, organisées et qualifiées, dès l'étape de collecte de données, permet de fluidifier et de sécuriser les échanges. En effet, il est aujourd'hui courant de recevoir des données incomplètes, « floues » et/ou peu exploitables. Leur utilisation comme données d'entrée du processus de rétro-ingénierie s'en trouve complexifié voire impossible.

Exemple

- Je viens creuser un tunnel sous une grande ville composée d'immeubles anciens. J'ai besoin de connaître leur emprise, la profondeur des caves et autres sous-sols, l'emprise des fondations. Cependant, la répartition des appartements m'importe peu.
- Je viens réaliser une fouille à proximité d'un réseau de fibre optique / gaz, je dois m'assurer de ne pas endommager cet ouvrage lors des fouilles.

3.1 Travail sur l'ouvrage

Fiabilité requise

La modélisation des objets s'appuie sur des données exhaustives. Que ce soit l'enveloppe extérieure ou intérieure de l'ouvrage, cette exhaustivité permet de réaliser une vue d'ensemble de l'ouvrage et de contextualiser les travaux.

Informations
théoriquement
disponibles

Faciliter la consultation

Exemple

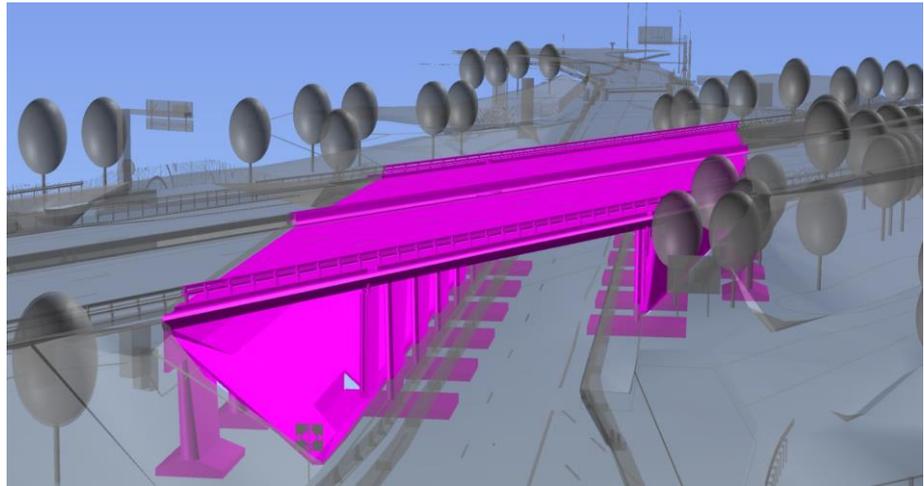


Fig 3. Illustration du travail sur un ouvrage (rose), objet de la rétro-ingénierie. Source : Setec-ASF

Le Maître d'Ouvrage détient en général les documents et informations concernant l'ouvrage. Il est donc dans son intérêt de transmettre la totalité des documents en sa possession.

La plupart du temps ces informations sont redondantes et sont fournies dans des types de documents variés, dans des formats également variés. C'est le cas lorsque les informations proviennent de documents d'archive (numérisés ou non) et/ou proviennent d'une extraction d'une base de données patrimoniales.

Pour rendre plus accessible les sources d'informations utilisées dans un processus de rétro-ingénierie, il paraît pertinent de lier les documents sources avec le modèle. La disponibilité des hypothèses retenues est également primordiale.

- Je viens réhabiliter un ouvrage d'art. J'ai besoin de connaître :
 - les modes constructifs ;
 - les éléments porteurs ;
 - les dimensions des structures,
 - l'étendue des fondations.

3.2 Exploitation et maintenance de l'ouvrage

Socle de départ du
jumeau numérique

L'important n'est pas la
géométrie

Niveau de détail en
fonction du besoin

Dans un usage d'exploitation ou de consultation en vue de mettre en place des prestations de services, le maître d'ouvrage s'inscrit comme pour des travaux sur un ouvrage dans une démarche de partage de connaissances de son ouvrage. C'est le cas lorsqu'une démarche de mise en place d'un jumeau numérique s'appuyant sur un modèle 3D est initiée.

Dans ce cas de figure, il ne s'agit pas d'obtenir une modélisation fine et complète. On cherche plutôt à assurer la compréhension du fonctionnement global de l'ouvrage en lien avec la gestion et la maintenance.

Il est important de prendre en considération la partie de l'infrastructure spécifiquement visée. Par exemple, lors d'un projet de rétro-ingénierie « de maintenance » se focalisant uniquement les éléments de signalisation. Ceux-ci devront être inventoriés de façon exhaustive et renseignés en fonction des besoins du projet.

Le niveau de modélisation est aussi à relier au besoin : programmation de maintenance ou préparation d'interventions...

**Référentiel
indispensable**

Dans le cas de l'utilisation d'un modèle à des fins d'exploitation et de maintenance, la définition de la nomenclature, des systèmes ainsi que la stratégie de gestion des actifs constituent des exigences indispensables au processus de rétro-ingénierie.

3.3 Aspects normatifs

**Cadre normatif fort
dans le BIM : NF EN
ISO 19650-1**

La norme NF EN ISO 19650-1 :2018¹ spécifie les concepts et les principes recommandés pour les processus métiers mis en œuvre dans le secteur du cadre bâti. Ces principes viennent en soutien de la gestion et de la production d'informations pendant le cycle de vie des actifs bâtis en utilisant la modélisation des informations de la construction (BIM).

La norme est générale sur la gestion du cycle de vie des actifs. S'y référer présente alors les intérêts suivants :

- Emploi d'une terminologie commune « normalisée » (cf. glossaire),
- Réflexion sur la transition entre la phase de réalisation et la phase d'exploitation des actifs bâtis,
- Appui sur des principes généraux sur les exigences et la livraison des informations,
- Éléments sur les environnements communs de données et les conteneurs d'information.

Modèles d'information

Les modèles d'information d'actif (AIM) et les modèles d'information de projet (PIM) sont définis comme étant les référentiels structurés de l'information nécessaire à la prise de décisions tout au long du cycle de vie d'un actif bâti. Ils concernent la conception et la construction de nouveaux actifs, la réhabilitation d'actifs existants, l'exploitation et la maintenance d'un actif. La norme préconise d'anticiper que la quantité d'informations stockées dans ces modèles augmentera surtout au cours de la réalisation du projet et de la gestion des actifs.

L'AIM et le PIM peuvent contenir des informations structurées (par exemple : modèles géométriques, calendriers et bases de données) et non structurées (exemples : documentations, les clips vidéo et les enregistrements sonores).

**Exemple
d'extrapolation aux
infrastructures**

La norme conseille de gérer les sources d'informations physiques, telles que les échantillons de sol et de produits, en appliquant le même processus avec des références croisées appropriées, par exemple des numéros d'échantillons.

La plupart des projets impliquent une intervention sur un actif existant, même s'il s'agit d'un site n'ayant fait l'objet d'aucune étude antérieure. Il convient alors que ces projets incluent certaines informations préexistantes sur les actifs. Ceci a pour objectif la facilitation de l'élaboration du programme de construction du projet. Elles seront également tenues à disposition des parties désignées du projet.

Illustration

La norme propose le schéma suivant pour illustrer :

- l'imbrication du processus de gestion de l'information dans des processus plus vastes, généraux et stratégiques (management de l'organisation et gestion de projet) ;
- le cycle de vie d'un actif pendant ses phases d'exploitation et de réalisation (cercle vert) ainsi que plusieurs activités de gestion de l'information (points ABC).

¹ NF 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*, Collections AFNOR, 2018.

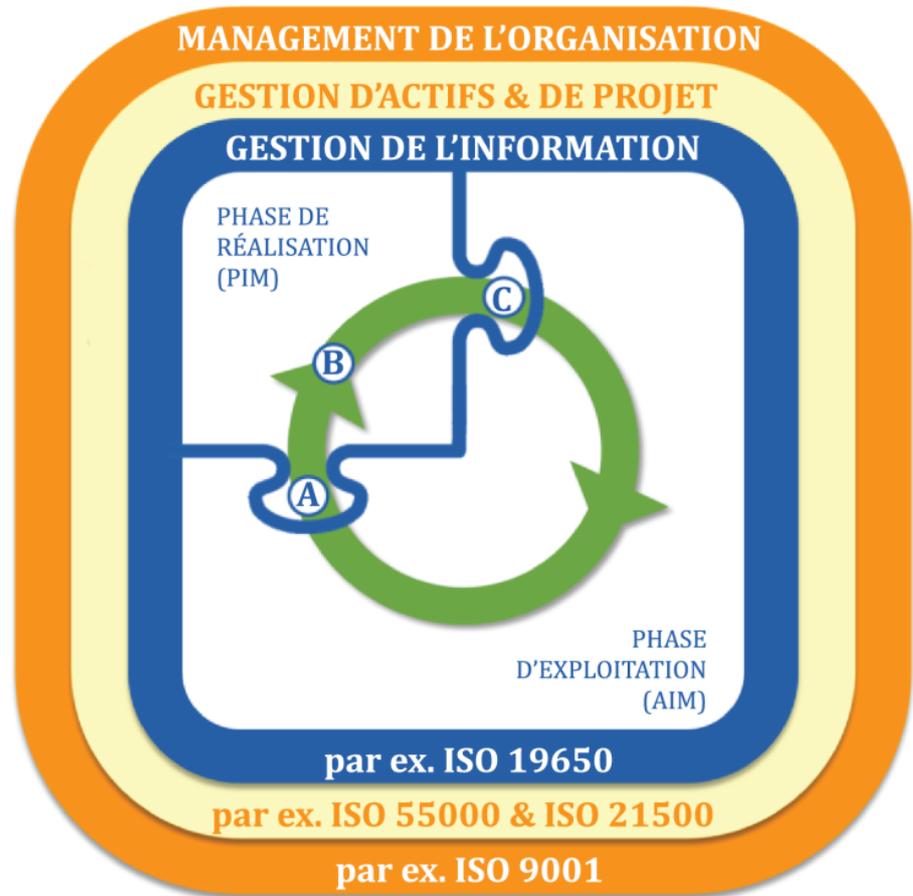


Fig 4. Projet générique et cycle de vie de la gestion de l'information d'un actif – NF EN ISO 19650²

A	Début de la phase de réalisation – Transfert de l'information pertinente de l'AIM au PIM
B	Développement progressif du modèle de conception prévu dans le modèle de construction virtuelle
C	Fin de la phase de réalisation – Transfert de l'information pertinente au PIM à l'AIM

Les enrichissements successifs des AIM et PIM

Les nœuds A et C représentent les transferts :

- AIM > PIM : l'AIM peut contenir des informations utiles pour lancer le processus de réalisation du projet (par exemple, registres d'équipements, enregistrements des dates d'installation et de maintenance, détails des droits de propriété, etc.)
- PIM > AIM : le PIM alimente l'AIM pour la gestion des actifs. Par exemple, le PIM peut contenir les détails géométriques du projet, l'emplacement des équipements, les exigences de performance lors de la conception du projet, la planification, l'évaluation des coûts et les détails des systèmes, composants et équipements installés, y compris les exigences de maintenance. Il convient également de stocker le PIM afin d'assurer un archivage à long terme du projet et à des fins d'audit.

Transcription en phases

La norme prévoit les étapes successives suivantes du processus de gestion de l'information :

² Ibid.

Étape	Description	Acteur
1. Spécification	Spécification des informations du projet à fournir accompagnées des exigences d'information pertinentes.	Maître d'ouvrage
2. Plan prévisionnel	Plan de réalisation du projet intégrant les réponses à chacune des exigences.	Partie désignée
3. Production	Production de l'information, y compris examen des informations à livrer par rapport aux exigences d'informations.	Partie désignée
4. Livraison	Livraison de l'information.	Partie désignée
5. Validation	Validation de l'information livrée	Maître d'ouvrage

Conteneurs d'informations

Elle recommande d'affecter des fonctions spécifiques de gestion de l'information tout au long du cycle de vie de l'actif.

La norme préconise l'utilisation de conteneurs d'informations, définis comme des ensembles nommés et persistants d'informations récupérables au sein d'une hiérarchie de stockage de fichiers, de systèmes ou d'applications. Elle définit 4 états pour les conteneurs d'informations :

- l'état « Travail en cours », utilisé pour les informations qui sont en cours de développement ;
- l'état « Partagé » permettant un développement constructif et collaboratif du modèle d'information ;
- l'état « Publié », utilisé pour les informations dont l'utilisation a été autorisée, par exemple dans la construction d'un nouveau projet ou dans l'exploitation d'un actif ;
- l'état « Archivé », servant à tenir un journal de tous les conteneurs d'information qui ont été partagés et publiés au cours du processus de gestion de l'information, ainsi qu'à garder une trace d'audit de leur développement.

La norme définit l'environnement commun de données comme étant la source convenue d'informations sur un projet donné, utilisée pour collecter, gérer et diffuser chaque conteneur d'information par le biais d'un processus géré.

Du BIM, mais aussi un ECD, une GED, une plateforme de visualisation...

Le contenu de l'environnement commun de données (ECD) ne se limite donc pas aux maquettes numériques, il comprend également l'ensemble de la documentation et des livrables classiques du projet (pièces graphiques, pièces écrites, pièces administratives). La centralisation des échanges est indispensable au bon déroulement du processus BIM. C'est pour cela que l'ECD devra regrouper à la fois le système de gestion électronique de documents (GED) et également la plateforme collaborative de visualisation et de compilation de l'ensemble des maquettes numériques du projet.

Formaliser le besoin

La norme NF EN 17412-1³ permet de guider la formulation d'une demande de modélisation BIM. En effet, elle préconise la prise en compte des besoins de tous les acteurs, que ce soit sur les aspects géométriques, sur les informations alpha-numériques ou sur la documentation.

Qualifier la qualité des informations

Selon la norme NF EN ISO 19157⁴, la description de la qualité des données géographiques a pour objectif de faciliter la comparaison des jeux de données et la sélection de l'ensemble le mieux adapté aux besoins ou aux exigences de l'application.

³ NF EN 17412-1, *Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2020.

⁴ NF EN ISO 19157, *Information géographique - Qualité de données*, Collections AFNOR, 2014.

3.4 Exigences de précision et de qualification de l'incertitude des données d'entrée

Une norme sur la qualité des informations géographiques transposable pour les infrastructures

Un premier critère d'exhaustivité (Completeness)

Un deuxième critère de cohérence logique (logical consistency)

La norme NF EN ISO 19157⁵ dont le périmètre d'application original concerne les informations géographiques est transposable aux informations nécessaires à un processus de rétro-ingénierie. Elle :

1. définit des composants destinés à décrire la qualité des données ;
2. spécifie des composants et la structure du contenu d'un registre de mesure de la qualité des données ;
3. décrit des procédures générales d'évaluation de la qualité des données géographiques ;
4. pose les principes de la description de la qualité des données dans des rapports.

Cette norme permet d'évaluer la qualité des données à partir de sources hétérogènes de niveau de qualité variable. Elle est applicable dans le domaine de la rétro-ingénierie pour compléter les niveaux de qualité de l'information géographique et géospatiale. À chaque donnée est affectée une mesure ou un indicateur de qualité. La compilation de ces indicateurs, présentés ci-après, permet le calcul du niveau de qualité apporté par la documentation de l'ouvrage considéré. Ce niveau de qualité est également transposable sur le résultat final : la maquette numérique.

Les différentes mesures de la qualité de l'information sont détaillées ci-après.

- Excédent (Commission) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Nombre d'éléments en excès (Number of excess items) : nombre d'éléments d'un jeu de données ou d'un échantillon qui n'auraient pas dû y figurer.
 - Taux d'éléments en excès (Rate of excess items) : nombre d'éléments en excès dans le jeu de données ou l'échantillon par rapport au nombre d'éléments qui doivent être présents.
- Omission (Omission) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Nombre d'éléments manquants (Number of missing items) : comptage de tous les éléments qui doivent figurer dans le jeu de données ou l'échantillon et qui en sont absents.
 - Taux d'éléments manquants (Rate of missing items) : Nombre d'éléments absents du jeu de données ou de l'échantillon par rapport au nombre d'éléments demandés.
- Cohérence conceptuelle (Conceptual consistency) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Taux de conformité par rapport aux règles du schéma conceptuel (compliance rate with respect to the rules of the conceptual schema) : nombre d'éléments du jeu de données qui sont conformes aux règles du schéma conceptuel par rapport au nombre total d'éléments.
 - Nombre de chevauchements de surfaces non valides (Number of invalid overlaps of surfaces) : nombre total de chevauchements erronés dans les données.
- Cohérence du domaine (Domain consistency) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Taux de conformité au domaine de valeur (Value domain conformance rate) : nombre d'éléments du jeu de données qui sont conformes à leur

⁵ Ibid.

Un critère de précision des positions (Positional accuracy)

domaine de valeur par rapport au nombre total d'éléments du jeu de données.

- Cohérence du format (Format consistency).
- Exactitude absolue ou externe (Absolute or external accuracy) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Valeur moyenne des incertitudes de position (Mean value of positional uncertainties) : valeur moyenne des incertitudes de position pour un ensemble de positions ; les incertitudes de position sont définies comme la distance entre une position mesurée et ce que l'on considère comme étant la position nominale.
 - Biais des positions (Bias of positions) : biais des positions pour un ensemble de positions ; les biais de position sont définis comme l'écart entre une position mesurée et ce que l'on considère comme étant la véritable position correspondante. Ces biais sont liés au calibrage des outils de mesure.
 - Matrice de covariance (Covariance matrix) d'un point : matrice carrée symétrique présentant les variances des coordonnées du point sur la diagonale principale et les covariances entre ces coordonnées pour les éléments en dehors de la diagonale.
- Incertitudes de position verticale (Vertical positional uncertainties) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Erreur linéaire standard (Standard linear error) LE68,3 : demi-longueur de l'intervalle définie par une limite supérieure et inférieure, dans laquelle la valeur véritable se situe avec une probabilité de 68,3 %.
 - Exactitude linéaire cartographique avec un seuil de signification de 90% (Linear map accuracy at 90 % significance level) LE90 : demi-longueur de l'intervalle définie par une limite supérieure et inférieure, dans laquelle la valeur véritable se situe avec une probabilité de 90 %.
 - Erreur quadratique moyenne (Root mean square error) : écart-type où la valeur véritable n'est pas estimée à partir des observations, mais où elle est connue *a priori*.
- Incertitudes de position horizontale (Horizontal positional uncertainties) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Standard d'exactitude cartographique circulaire (Circular map accuracy standard) CE90 : rayon décrivant un cercle, dans lequel l'emplacement véritable du point se situe avec une probabilité de 90 %.
 - Erreur quadratique moyenne de la planimétrie (Root mean square error of planimetry) : rayon d'un cercle autour d'un point donné, dans lequel la valeur véritable se situe avec une probabilité RMSEP donnée.
- Exactitude relative ou interne (Relative or internal accuracy) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Erreur verticale relative (Relative vertical error) Rel LE90
 - Erreur horizontale relative (Relative horizontal error) Rel CE90
- Exactitude d'une mesure du temps (Accuracy of a time measurement) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Exactitude temporelle avec un seuil de signification de 68,3 % (écart type σ) (Time accuracy at 68,3 % significance level) : demi-longueur de l'intervalle défini par une limite supérieure et inférieure, dans laquelle la valeur véritable de l'instance temps se situe avec une probabilité de 68,3 %.
 - Exactitude temporelle avec un seuil de signification de 90 % (Time accuracy at 90 % significance level).

Un critère de qualité temporelle (temporal quality)

Un critère de justesse thématique (thematic accuracy)

- Cohérence temporelle (Temporal consistency) avec l'élément suivant :
 - Erreur chronologique (Chronological error) (Booléen Vrai ou Faux sur un événement ou un ensemble d'évènements).
- Validité temporelle (Temporal validity) élément temporel qui décrit la période de validité.
- Justesse du classement (Classification correctness) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Taux de classement erroné (Misclassification rate) : nombre d'entités classées de manière incorrecte par rapport au nombre d'entités demandées.
 - Matrice de classement erroné (Misclassification matrix) : matrice indiquant le nombre d'éléments de la classe (i) classés sous une autre classe (j).
 - Coefficient kappa (Kappa coefficient) : coefficient destiné à mesurer le degré d'accord d'affectation aux classes en supprimant les classements erronés.
- Justesse des attributs non quantitatifs (Non-quantitative attribute correctness) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Taux de valeurs d'attribut correctes (Rate of correct attribute values) : nombre de valeurs d'attribut correctes par rapport au nombre total de valeurs d'attribut.
- Exactitude des attributs quantitatifs (Quantitative attribute accuracy) avec notamment les indicateurs suivants :
 - Incertitude de la valeur d'attribut avec un seuil de signification de 90 % (Attribute value uncertainty at 90 % significance level) : demi-longueur de l'intervalle défini par une limite supérieure et inférieure, dans laquelle la valeur véritable de l'attribut quantitatif se situe avec une probabilité de 90%.

Mesures dérivées de l'agrégation des informations (aggregation measures)

Une mesure globale ou ponctuelle

Ces mesures sont calculées par croisement d'information comme par exemple :

- Spécification de produit satisfaite (Data product specification passed) : indication que toutes les exigences de la spécification de produit mentionnée sont remplies.

À noter que la qualité peut être exprimée au niveau d'un jeu de données ou au niveau des objets.

Les modèles UML TC211 (y compris modèles Data Quality – NF EN ISO 19157) sont disponibles sous : <http://iso.sparxcloud.com/index.php>.

Usage des mesures de la qualité

Les informations qualité sont documentées dans les métadonnées associées aux données. Les métadonnées sont définies comme les données sur les données. Ce sont des informations relatives au contenu, à la qualité, aux sources, et toutes autres caractéristiques utiles à la qualification des données qu'elles concernent.

Elles sont utiles :

- Pour la découverte des jeux de données, elles sont souvent regroupées dans un catalogue qui sert de point d'entrée à la donnée.
- Pour l'évaluation du jeu de données adéquat (notamment via les informations de qualité).
- Pour l'usage du jeu de données, en fournissant les paramètres utiles à la bonne utilisation des données (par exemple le système de référence de coordonnées).

Autres informations relatives à un jeu de données

Au-delà des informations de la qualité de l'information, il est indispensable d'ajouter les informations suivantes dans les métadonnées géographiques :

1. l'identification des données (type, emprise, échelle, langue, résumé...)
2. la qualité des données (source, qualité quantifiable, critères...)
3. la représentation spatiale (description de la structure : raster, image, vecteur)

4. la référence spatiale (type de système, référentiel géodésique, ellipsoïde...)
5. les conditions de distribution (organisme diffuseur, conditions tarifaires, support...)
6. les métadonnées elles-mêmes (date, standard, langue...).

Les exigences relatives aux indicateurs agrégés sont définies dans l'annexe J de la norme NF EN ISO 19157⁶.

3.5 Synthèse des exigences

Nécessité de formuler les besoins selon la norme NF EN 17412-1

Il est donc primordial de formaliser correctement le besoin d'information. La norme NF EN 17412-1⁷ traite spécifiquement la formulation de ce besoin. Ils sont abordés sous les angles de l'information géométrique, alphanumériques et documentaires.

Dans le cas particulier de la rétro-ingénierie, la formulation du besoin doit également porter des informations plus détaillées comme :

- le référentiel géographique,
- le niveau de qualité de la donnée attendu,
- le niveau de précision attendu,
- les données d'exploitation,
- etc.

Contexte	Usage	Informations alphanumériques		Documentation	Précision	Référentiel		Géométrie					
		Identification	Contenu de l'information			Planimétrique	Altimétrique	Détail	Dimensionnalité	Emplacement	Apparence	Comportement paramétrique	Enveloppe d'incertitude
Intervention à proximité de l'ouvrage	Technique	- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - EBM : historique des interventions	+/- 5cm	RGF93, CC45	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Couleur simple	S/O	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement
	Contextualisation	- Nom ouvrage	S/O	S/O	+/- 20cm	RGF93, CC45	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Texturé	S/O	S/O
Intervention sur l'ouvrage		- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - EBM : historique des interventions	+/- 2cm	LOCAL	LOCAL	Détaillé (LOD300)	3D	Relatif	Couleur simple	S/O	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement
Création d'un socle Exploitation		- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - EBM : historique des interventions	+/- 5cm	RGF93	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Couleur simple	Oui, pour bibliothèque	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement

 Base de la norme NF EN 17412-1
 Compléments du GT sur la définition du besoin

Fig 5. Tableau de structuration de la demande

Ajouts par rapport à la norme

Le tableau ci-dessus a été construit à partir de la spécification des besoins de la norme. Il est fourni en annexe. La version complète du tableau est mise à disposition dans le livrable n°049 (MINnDs2_GT5_retro_ingenierie_donnees_entree_anx1_tableau_synthese_exigences_049_2023).

Les éléments spécifiques liés à la rétro-ingénierie ont été ajoutés :

- Le contexte : quelle est la finalité du modèle, par exemple
 - Intégration dans un modèle de projet car intervention à proximité de cet ouvrage.
 - Intervention sur l'ouvrage.
 - Création d'un socle pour l'exploitation (jumeau numérique).
- Documentation : afin de préciser la documentation source ainsi que les liaisons qui peuvent être attendues ;

⁶ Ibid.

⁷ NF EN 17412-1, Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes, op. cit.

- Le niveau de précision attendu. Cela permet des approches plus ou moins fines lors du traitement des informations d'entrée (nuage de points par exemple) ;
- Le référentiel de coordonnées en différenciant le référentiel géographique et le référentiel planimétrique ;
- La différenciation entre la géométrie de l'extrados et l'intrados d'un ouvrage. En effet, on peut vouloir modéliser l'enveloppe extérieure d'une canalisation, d'un ouvrage d'art, sans en modéliser le contenu qui n'est pas utile pour les usages retenus ;
- L'enveloppe d'incertitude. Cet élément consiste par exemple en la modélisation d'une enveloppe de la zone probable de la position d'un élément.

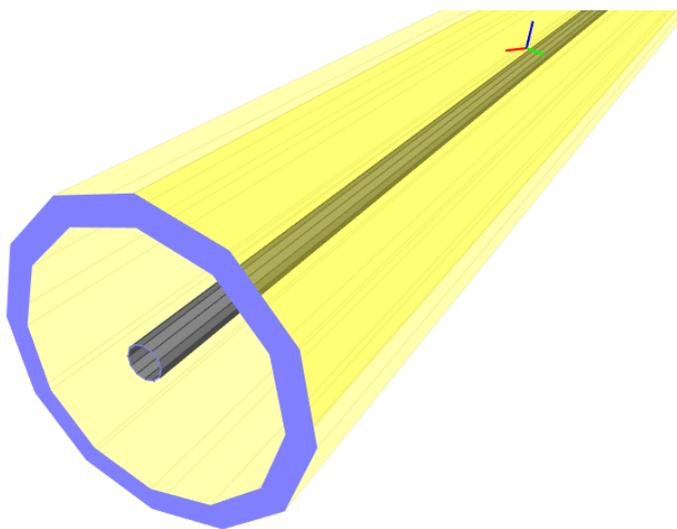


Fig 6. Canalisation existante (grise) modélisée avec l'enveloppe d'incertitude liée à sa classe de précision (jaune) - SETEC

4. DÉFINITION, ANALYSE ET SÉLECTION DES ENTRANTS

4.1 Définition d'un entrant

L'entrant est une base de départ

Cas particulier de l'existant

Les entrants sont toutes les informations qui vont permettre de construire un modèle de rétro-engineering. Dans la mesure où nous devons représenter numériquement des ouvrages ou infrastructures existants, plus nous disposons d'informations, plus nous pourrions nous approcher du niveau de détail et d'information souhaité.

Dans le cas de la modélisation « BIM » d'un ouvrage existant, les informations entrantes sont généralement constituées de données géométriques (topo) et de données documentaires (historique depuis la conception). Vous trouverez ci-après un exemple de document historique pouvant être utilisé dans la démarche de rétro-ingénierie.

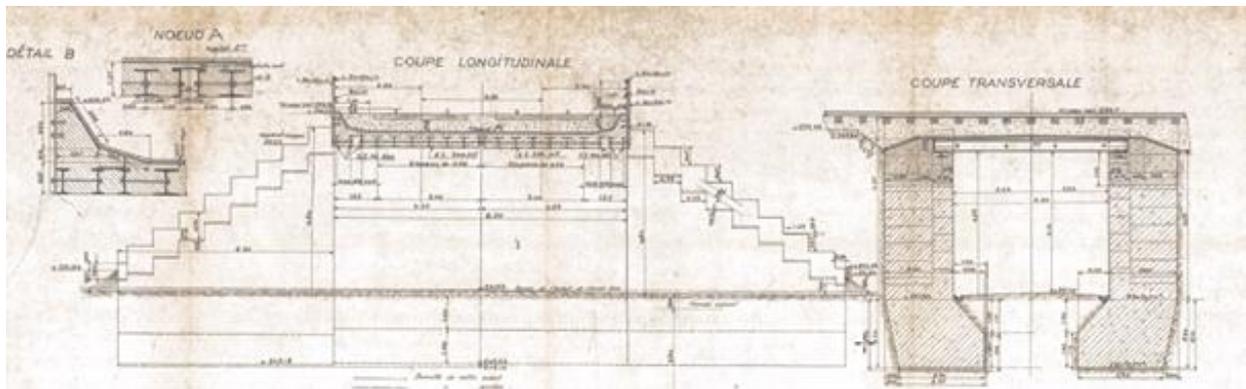


Fig 7. Pont Rail au KM 131+622 de la ligne I 15000 - Ensemble et détails - Source SNCF

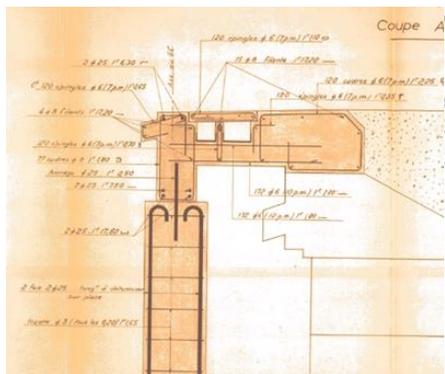


Fig 8. Pont Rail au KM 131+284 de la ligne I 15000 - Armatures - Source SNCF

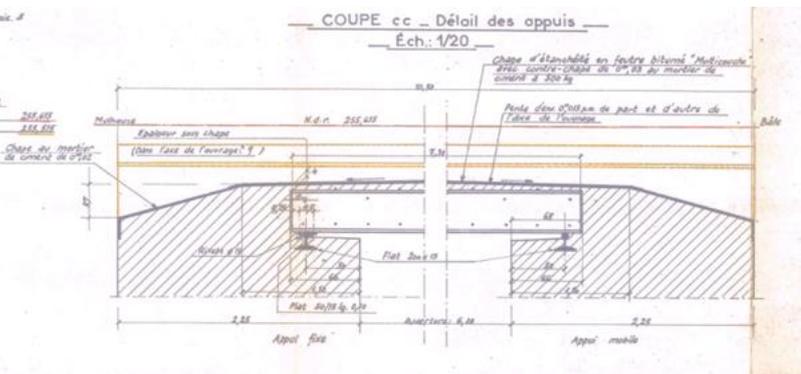


Fig 9. Pont Rail au KM 134+903 de la ligne I 15000 - Coffrage et armatures : Détail des appuis - Source SNCF

Origines de l'information lors des études initiales ou à acquérir par un travail spécial

D'une manière générale, les informations sont soit :

- Déjà existantes :
 - produites lors des études, de la réalisation ou de l'entretien de l'ouvrage et consignées dans des plans, notes, fiches techniques, mesures, etc. ;
 - et/ou disponibles dans les bases de données géographiques (IGN, OSM, SRTM, etc.) ;
- À acquérir in situ : acquises grâce à des appareils de mesure, à un instant « t » (le plus proche possible de la modélisation du rétro-engineering). Elles sont

Remarque liminaire sur l'absence de contributeur direct issu des ouvrages d'art

ensuite retranscrites sous différents formats et recueillies tout au long de la phase d'utilisation du modèle.

Notre groupe de travail est principalement constitué de spécialistes voies/chaussées. N'ayant pas de spécialistes ouvrage d'art, des sessions d'échanges ont été organisées entre le GT5 et le GT MINnD en charge des IFC Bridge. La vision de notre GT pourra toutefois être biaisée.

4.2 Informations géométriques

Définition

Les informations géométriques permettent de recréer la géométrie de l'ouvrage et de le positionner dans l'espace.

Utilités de géométrie et de positionnement

Elles vont permettre de répondre à différentes problématiques :

- la géométrie de l'ouvrage (dimensions des objets et mesures relatives entre eux afin de les positionner dans le modèle sur la base d'un repère local) ;
- la position planimétrique de l'objet (selon le système Géodésique RGF93) et les projections associées (Lambert 93 ou coniques conformes)⁸ ;
- la position altimétrique de l'objet par rapport au référentiel (à priori NGF – IGN69).

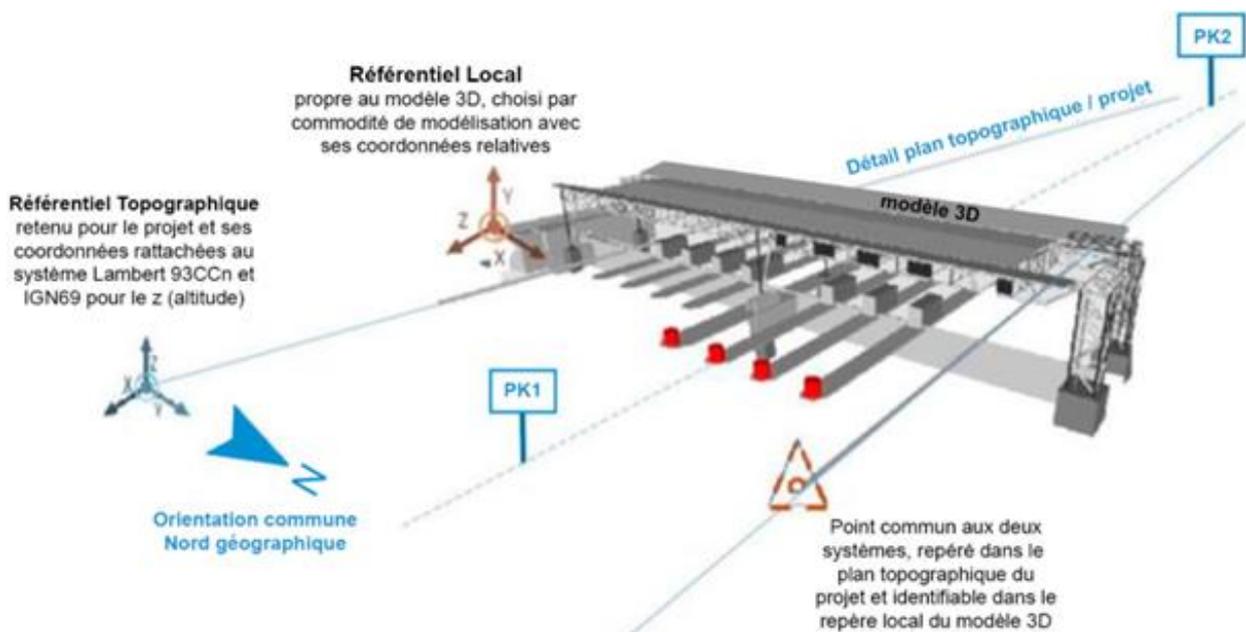


Fig 10. Géoréférencement d'un projet d'infrastructure linéaire (source MINnD)

Types de supports

Pour les données mesurées sur le terrain, leurs prétraitements sont traités dans d'autres documents que celui-ci

Nous avons tenté de dresser une liste exhaustive des types de supports identifiés comme entrant dans le processus de rétro-modélisation / rétro-ingénierie.

Concernant les informations mesurées, nous considérons que les traitements qui transforment les données de mesure brutes en données exploitables dans le cadre du processus de rétro-ingénierie ne font pas partie du périmètre du présent document. En effet, les corrections de mesure propre à chaque technologie d'acquisition d'informations relèvent d'une expertise métier.

Les techniques de levés et de traitement des informations sont :

⁸ Institut Géographique National (IGN), *Le système RGF et la projection Lambert 93*, IGN-DirCom 08/2008, 2008.

L'étendue et la qualité des informations dépend des supports de types plans – modèles selon les diverses phases du cycle de vie

1. les levés topographiques traditionnels (tachéomètre électronique) ;
2. la photogrammétrie ;
3. les procédés Lidar ;
4. les mesures sur site avec des moyens traditionnel (niveau, décimètre, distancemètre, etc.) ;
5. la détection de réseaux (mesure directe ou détection puis marquage puis levé topo).

Les éléments listés ci-dessous peuvent être issus de différentes phases du cycle de vie de l'ouvrage (état initial, études, DOE, maintenance, etc.)

Croquis – Premier document émis	Contient bien souvent peu d'informations car il cible une transmission de cotations ou de points de repère. Dans la mesure où il est fait à main levée, la géométrie n'est pas récupérable. Il n'est pas exhaustif. Ne permet pas la gestion de plusieurs couches d'informations.
Plan 2D papier ou numérisé (raster)	La précision de ce type de document reste assez faible dans la mesure où l'utilisateur est tributaire de la résolution de l'image lorsqu'il s'agit de pointer une forme ou de lire une cotation. Les plans numérisés peuvent être gourmands en espace disque lorsque la résolution est très élevée ou lorsque le format de fichier est en lui-même gourmand. Ne permet pas la gestion de plusieurs couches d'informations.
Plan 2D vectorisé	Document numérique constitué à partir de données raster, facilitant la modélisation dans la mesure où tous les éléments qui le composent sont constitués de points et polygones, généralement géoréférencés en planimétrie, qui sont dans la plupart des cas répartis dans des calques ou des couches. La notion de couche (SIG) autorise aussi à accumuler d'autres informations (via des tables attributaires). Attention, la précision du document dépend uniquement de l'usage auquel il est initialement destiné et des méthodes de vectorisation employées.
Plan 2D natif	Plan vectorisé dans les informations géométriques sont directement liées au terrain (IE. Plan topo).
Plan 3D (vectorisé ou natif)	Plan 2D intégrant une composante altimétrique. On parle parfois de plan en 2D et demi.
Modèle 3D Statique	Représentation surfacique ou volumique (BREP). Elle peut permettre de contextualiser la zone de travaux et d'extraire des éléments 3D utiles à la construction du modèle de retro engineering. Attention, la modélisation 3D contient des données géométriques mais pas nécessairement géoréférencées. Ce sont des modèles très gourmands en capacité mémoire.
Modèle 3D CSG	Modèle 3D dont les composants sont constitués de formes de base (et sauvegardées comme tel), extrudées et assemblées par des opérations logiques (union, soustraction, etc.) elles aussi sauvegardées comme tel. Ce sont des modèles peu gourmands en capacité mémoire.

Exploitabilité des informations

Le type de support détermine l'accessibilité à l'information et donc l'exploitation future qui pourra en être faite. Il détermine aussi si l'automatisation de l'extraction de l'information est possible.

À titre d'exemple, vous trouverez ci-dessous, deux géométries codées en IFC :

- l'IfcFacetedBrep ne permet pas de lecture directe des dimensions des objets. La prise de mesure manuelle entre les points sera nécessaire pour connaître les dimensions de l'ouverture.
- l'IfcExtrudedAreaSolid permet de lire directement dans le fichier IFC le chemin d'extrusion et de remonter au profil d'origine ayant servi à générer le solide. Le cas échéant, des mesures sur ce profil pourront être également réalisées.

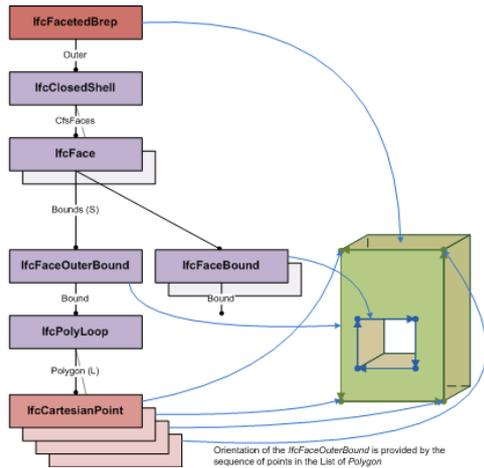


Fig 11. Diagramme montrant l'utilisation d'IfcFacetedBrep + Source : standards.buildingsmart.org – IFC4.2

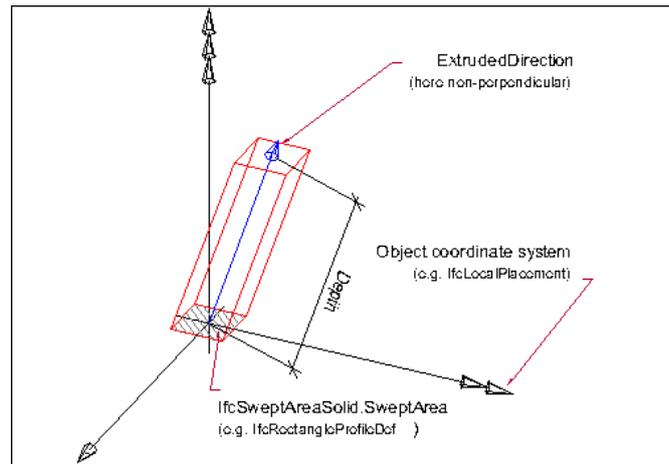


Fig 12. Représentation d'IfcSweptAreaSolid - Source : standards.buildingsmart.org – IFC4.3

Synthèse

Les membres du GT ont consigné dans le tableau ci-dessous, l'utilisabilité des différents types de support d'informations. Les critères de position et de géométrie ont été évalués séparément.

Type de support	Géométrie				Position			
	grandeur géométrique		Forme		relative aux autres éléments de la		Absolue, dans le référentiel de la	
	Lecture directe (sur cotation)	Lecture Indirecte (par mesure)	non vectorielle (géométrie dégradée, discrétisée)	vectorielle (géométrie native > cercle)	planimétrique	altimétrique	planimétrique	altimétrique
Croquis	3	1	1	1	1	1	1	1
Plan 2D papier	3	2	2	1	2	1	1	1
Plan2D vectorisé	3	2	2	2	2	1	1	1
Plan 2D natif	3	3	1	3	3	2	2	2
Plan 3D	3	3	1	2	3	3	2	2
Modèle 3D statique	3	3	1	2	3	3	2	2
Modèle 3D GCS	3	3	1	3	3	3	2	2

Niveau de cohérence :

1 - non cohérent	2 - Partiellement cohérent - a étudier	3 - Cohérent
------------------	--	--------------

Fig 13. Cohérence de l'usage d'un type de support d'information avec le type d'information recherchée et avec le mode de mesure.

4.3 Informations physiques (autres que de dimensions)

Les informations utiles pour les routes et les ouvrages d'art

Types de chaussées routières selon la norme NF P98-086

Nous traitons ici le cas des informations physiques utiles pour la conception d'un modèle analytique. Nous distinguerons deux cas d'infrastructures : les chaussées routières et les ouvrages d'art (ponts, tunnels).

Nous pouvons distinguer les informations relatives à la structure : il s'agit d'informations non numériques, permettant de définir qualitativement les différents types de chaussée (épaisse, souple, mixte...). Elles sont au nombre de six en France et sont répertoriées dans le catalogue des structures de chaussées neuves de 1998⁹ et dans la norme NF P98-086¹⁰.

⁹ LCPC, SETRA, *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Paris, 1998.

¹⁰ NF P 98-086, *Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves*, Collections AFNOR, 2019.

Il est à noter que le choix de la structure est directement lié aux matériaux constituant chaque couche.

Ces informations sont la plupart du temps consignées dans la coupe transversale de la chaussée. Celle-ci est déterminée à partir des variations transversales d'épaisseur des couches de chaussée et du profil en travers de la plateforme support ou partie supérieure des terrassements (PST).

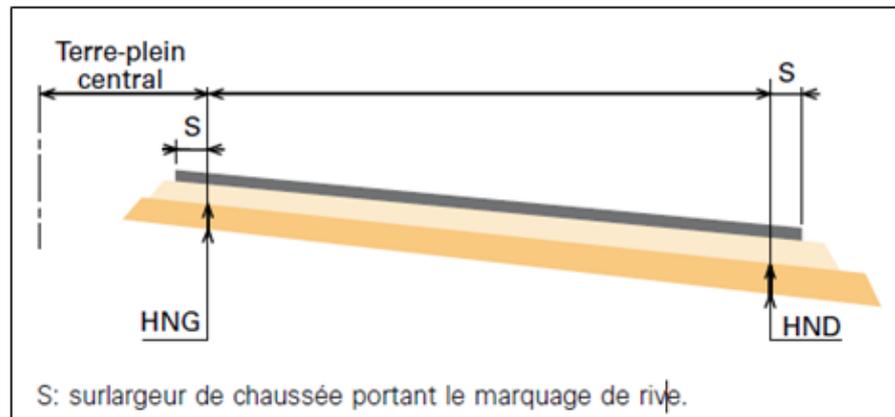


Fig 14. Profil en travers-type d'une chaussée unidirectionnelle

Pour les ouvrages d'art OA, utilisation du fascicule ITSEOA du CEREMA

Pour les OA une longue liste : alignement, dimensionnement, déformation, équipements

La documentation faisant foi est le fascicule I de l'ITSEOA (Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art) du CEREMA¹¹, qui contient les éléments détaillés relatifs aux ouvrages neufs et existants en phases conception, construction et exploitation ainsi que les équipements associés. La SNCF dispose également de rapports dans lesquels figurent des informations précieuses telles que le suivi du comportement géométrique de l'ouvrage, ou encore les données récupérées des capteurs non connectés.

Les données à considérer lors de la rétro-ingénierie sont nombreuses :

- Celles associées à la localisation. Le pourcentage d'alignement par exemple qui quantifie les portions d'ouvrage en alignement droit.
- Celles relatives au dimensionnement de l'ouvrage. La connaissance précise des types d'appuis (blocages transversaux ou pas par exemple) permettra d'utiliser le modèle mécanique réaliste correspondant lors du calcul du comportement de l'ouvrage. Il est également important de connaître en amont les propriétés mécaniques des câbles, notamment dans le cas des ouvrages haubanés. Les données de précontrainte (type de câbles, efforts, torons) sont récupérables auprès des constructeurs et du CEREMA.
- La déformation de l'ouvrage peut être mesurée afin d'estimer la déformée réelle et ainsi mieux affiner le modèle analytique. Cette évaluation permettra d'anticiper l'apparition d'éventuelles pathologies.
- Celles liées aux équipements de l'ouvrage. Il s'agit ici de préciser, entre autres, les joints de dilatation (type et appellation, longueur totale, soufflé).

4.4 Informations de conception

Les informations de conception sont indispensables

Au-delà des informations « mesurables » sur l'ouvrage, les informations de conception sont très souvent nécessaires à la réalisation d'un modèle de rétro-ingénierie. Ceci est particulièrement vrai s'il s'agit de constituer un modèle analytique ayant pour vocation d'évaluer les écarts entre un modèle théorique et le comportement de l'ouvrage.

¹¹ CEREMA, *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 1 : Dossier d'ouvrage*, Éditions Cerema, Collection Références, 2016.

Pour les chaussées, les premiers intrants sont les données liées au trafic à supporter sur une certaine durée de vie

Une fois les sollicitations élicitées, on passe au choix des matériaux et aux dimensionnements des diverses couches

Utilisation d'outils de dimensionnement comme le logiciel Alizé développé par l'UGE et distribué par le Itech

La conception des chaussées routières françaises est basée sur des hypothèses de calcul incluant des données de trafic sur une certaine durée de vie. Dans un premier temps il s'agit de déterminer la durée de dimensionnement selon le type de voie considérée (à réseau structurant VRS ou à réseau non structurant VRNS) ainsi que le risque de calcul.

Le type de voie est défini suivant le Catalogue des types de route pour l'aménagement du réseau routier national¹². Suivant la valeur numérique retenue (20 ou 30 ans), la classe de trafic est calculée au moyen du nombre d'essieux équivalents NE et du coefficient d'agressivité CAM.

La classe de portance de la plateforme « support de chaussée » PST est alors établie suivant la valeur du module (de 20 à 200 MPa), et sur la base du Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme¹³.

Le type de structure et les matériaux utilisés pour les couches de la chaussée (enrobé bitumineux, matériau traité aux liants hydrauliques, grave non traitée) sont sélectionnés en fonction de tous ces critères.

Il est important de souligner que le choix du matériau induit des jeux de données numériques associées à des caractéristiques mécaniques. Dans le cas des enrobés bitumineux, nous pouvons citer par exemple le module d'Young E à une température de référence, le paramètre de fatigue ϵ_6 ...

L'épaisseur des matériaux est également un critère non négligeable dans le dimensionnement des chaussées.

Enfin, les caractéristiques thermiques (vérification au gel-dégel) des matériaux sont également prises en compte.

Toutes ces étapes sont expliquées dans le catalogue de dimensionnement, dans la norme NF P98-086¹⁴, et reprises dans le diagramme ci-après. La liste des matériaux et de leurs caractéristiques figure également dans la bibliothèque du logiciel Alizé Lcpc¹⁵, outil de référence du dimensionnement des chaussées au niveau français et international.

Le catalogue de dimensionnement est également accompagné de 52 fiches de structures auxquelles l'ingénieur peut se référer lors de la conception.

¹² CEREMA, *Catalogue des types de route pour l'aménagement du réseau routier national*, Éditions Cerema, Collection Références, 2019.

¹³ SETRA/LCPC, *Réalisation des remblais et des couches de forme - Fascicule 1 - principes généraux*, Éditions Cerema, 2000.

¹⁴ NF P 98-086, *Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves*, op. cit.

¹⁵ Alizé Lcpc - Logiciel pour le dimensionnement des structures de chaussées, <https://www.alize-lcpc.com/fr/index.php>, consulté le 14 octobre 2021.

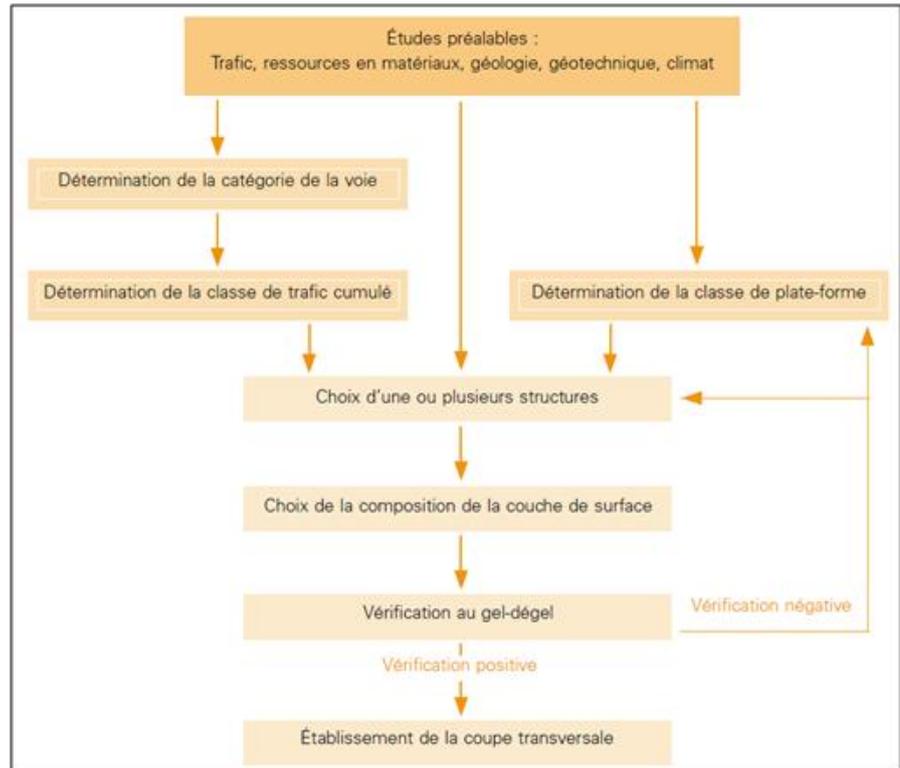


Fig 15. Démarche globale adoptée pour concevoir une structure de chaussée.

4.5 Informations de mise en œuvre

Au-delà des informations de conception, celles de la mise en œuvre s'avèrent aussi indispensables

En chaussée routière, les données de mise en œuvre ont été l'objet des travaux antérieurs du GT 1.3 IFC Road

Cette section est d'une importance capitale lorsqu'un des objectifs de la rétro-ingénierie de l'ouvrage est de réaliser un modèle de calcul visant à vérifier le comportement de l'ouvrage. Ces informations sont toutefois difficiles à retrouver car pour la plupart d'entre elles, elles n'ont pas été archivées.

L'énumération des données de mise en œuvre fait notamment l'objet du bSDD produit dans le cadre du GT 1.3 (IFC Road)¹⁶. Nous indiquerons ici les sources desquelles elles sont issues.

Les fiches « produits » fournies par les centrales d'enrobage, éditées le plus souvent en format pdf ou Excel, mentionnent les caractéristiques principales des matériaux : granularité, courbe granulométrique, masse volumique réelle, teneur en liant...).

Des essais de portance sont réalisés afin de classer la PST (de PF2 à PF4).

Des rapports d'études de formulation sont émis par les entreprises ou les laboratoires de recherche. Dans ces rapports figurent les résultats relatifs à l'aptitude au compactage des enrobés, leur tenue à l'eau, leur résistance à l'orniérage, ainsi que la classe du module complexe à 15 °C et leur résistance en fatigue. Ces deux dernières propriétés sont déterminées lorsque le matériau est destiné à une couche d'assise.

Les données associées aux conditions climatiques (température, humidité relative, point de rosée) sont récupérées à partir des mesures des stations météo proches,

¹⁶ MINnD, Dictionnaire de données - Plateforme, Livrable du PN MINnD Saison 2 - GT 1.3 IFC Road, 2021.

Pour les ouvrages d'art, il convient de se référer aux travaux du groupe de travail Ifc Bridge

si elles existent. Elles peuvent servir à interpréter le comportement de la chaussée lors de sa mise en œuvre, notamment lorsque des défauts sont constatés.

Les données d'entrée de ces infrastructures ont été traitées dans le cadre du GT 1.1 (IFC Bridge). Nous ne rappellerons ici que les grandes lignes.

Le catalogue du CEREMA contient les informations relatives aux types et propriétés des bétons ainsi que leur formulation. Les caractéristiques des aciers y sont également répertoriées. Des mesures de déformation et de déplacement peuvent être réalisées sur les matériaux, soit sur base courte (échelle de quelques centimètres), soit sur base longue (on considère donc l'objet car l'échelle est de quelques mètres). Elles sont définies dans une gamme de tolérance à identifier et tracer et dépendent des conditions météo et hydriques de l'environnement.

Il est nécessaire de connaître la date de mise en œuvre des matériaux. Cette donnée est à communiquer par l'entreprise chargée des travaux.

Les informations météorologiques ont également une importance sur les caractéristiques des matériaux (températures, hydrométrie).

4.6 Informations d'exploitation et pathologies

Historique depuis la construction est nécessaire pour identifier les évolutions

Les chaussées routières sujettes au vieillissement et aux phénomènes de fatigue font l'objet de nombreux contrôles et auscultations tout au long de leur usage.

Chaussées – nécessité de documenter tout traitement curatif

La rétro-ingénierie ne peut se limiter à la modélisation d'un ouvrage tel qu'il a été conçu et construit. Sa vie, son entretien, les interventions sur celui-ci... sont autant d'éléments à considérer dans la constitution de son modèle.

En phase d'exploitation, les chaussées routières sont auscultées pour contrôler leur niveau de dégradation dans l'objectif d'anticiper les opérations de maintenance, ou de réhabilitation dans les cas les plus critiques. Des fiches de diagnostic sont établies pour relater les désordres éventuellement survenus au cours de la vie de la chaussée. Pour identifier le type de défaut observé (fissures, déformations, arrachements...), l'opérateur peut se référer au Catalogue des dégradations de surface des chaussées¹⁷. Très souvent, des photographies prises sur le terrain aident à l'identification de ces « anomalies ». La déformabilité de surface peut être mesurée à l'aide de différents outils (poutre Benkelman, déflectographe Lacroix...) et les relevés de déflexions qui en résultent servent à déterminer l'opération d'entretien ou de mesure corrective à appliquer. Il est également possible de recourir à des essais plus destructifs. Dans ce cas, des carottes de chantier sont prélevées in situ et soumises à des tests en laboratoire (analyse de la teneur à l'eau résiduelle, module et fatigue résiduels, caractéristiques du liant récupéré...), afin de rendre compte de leur niveau de vieillissement.

Tous les résultats obtenus sont rassemblés dans des rapports d'études et exploités pour tenter de prédire la durée de vie résiduelle de la chaussée. Cet aspect est d'ailleurs traité dans le cadre du projet national DVDC (Durée de Vie Des Chaussées). L'idée est, par rétro-calcul, de pouvoir estimer la durée « réelle » de dimensionnement ou sa durée résiduelle et prévoir les opérations d'entretien et de renouvellement en conséquence.

Suivant la gravité du défaut, des travaux de maintenance peuvent être effectués ; les détails des modifications réalisées (nature de la réparation, matériau appliqué, localisation...) sont consignés dans des rapports pour une meilleure traçabilité. Concernant les chaussées bitumineuses, le choix du type de réparation s'effectue à l'aide du guide technique de Diagnostic et Conception des renforcements de chaussées¹⁸, dans le cas des chaussées en béton, un autre document fait référence¹⁹.

¹⁷ LCPC, *Catalogue des dégradations de surface des chaussées*, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées-Méthode d'essai n°52-Complément de la méthode d'essai n°38-2, 1998.

¹⁸ IDRRIM, *Diagnostic et conception des renforcements de chaussées*, Éditions Cerema - Collection Références, 2016.

¹⁹ SETRA, *Guide technique - Entretien des chaussées en béton - Chaussées routières et aéronautiques*, LCPC, 2002.

Chaussées – nécessité d'estimer le trafic réel supporté »

Pour une éventuelle corrélation avec le niveau de dégradation constaté sur la chaussée, les informations de trafic (comptage par exemple) peuvent également être collectées lorsque celles-ci sont disponibles.

Pour les ouvrages d'art, seuls les ouvrages d'art non conventionnels font l'objet d'une obligation forte de suivi

L'étude du comportement des Ouvrages d'Art (OA), à la mise en service, fait partie des pièces qui sont versées au dossier de l'ouvrage. Des visites doivent permettre de vérifier les éventuels écarts apparaissant au cours de la vie de l'ouvrage. Des inspections régulières sont programmées sur les ouvrages d'art, mais beaucoup d'entre eux ne sont pas suivis, excepté dans le cas des ouvrages d'art non conventionnels (OANC). Les visites des autres ouvrages d'art sont donc réalisées selon le bon vouloir du gestionnaire du réseau.

Ouvrages d'art – priorisation des désordres et recueil des informations photographiques

Il existe dans l'ITSEOA²⁰ une méthode de priorisation des désordres constatés, décrite dans l'IQOA (image de la qualité des ouvrages d'art). Les cahiers des OA contiennent également beaucoup de photos des OA (désordres constatés). L'état du diagnostic réalisé peut être conservé dans une maquette numérique. La gestion des OA doit être réalisée suivant les ITSEOA, mais il n'y a pas d'obligation de suivre cette instruction.

Le guide note d'information 35 du SETRA²¹ donne les méthodes courantes pour réévaluer les structures existantes.

Ouvrages d'art – Essais de contrôle

En général, des essais de contrôle non destructif sont réalisés pour diagnostiquer les OA. Les essais destructifs, comme un carottage, sont réservés à la qualification d'une pathologie en vue de la destruction de l'OA.

Il existe également des techniques de gammagraphie (méthode non destructive) qui permettent de détecter la présence de défauts dans les matériaux en examinant la position des armatures, l'enrobage ou encore le remplissage des gaines de précontrainte.

Le fenêtrage permet, quant à lui, de vérifier l'état des armatures. À l'aide de capteurs installés sur les OA, comme des capteurs chimiques dans le béton (ions chlorure), des capteurs de vibration, des inclinomètres, des jauges de contrainte, etc.). Des relevés numériques sont aussi effectués pour contrôler la fissuration. Des corps d'épreuve sont aussi réalisés pour vérifier les caractéristiques des matériaux.

4.7 Informations environnementales

Une interface ouvrage territoire qu'il est nécessaire de considérer.

L'ouvrage étant inscrit dans un territoire, les interactions avec celui-ci sont importantes et peuvent contraindre les opérations de construction, d'exploitation et de maintenance. Elles doivent donc être prises en compte dans le processus de rétro-ingénierie.

Prise en compte des risques naturels en particulier sismiques

En étape de conception/construction, il est pertinent de réaliser des études (par exemple sismiques), suivant l'importance de l'ouvrage, dans le cas où celui-ci se situe dans une zone couverte par les risques naturels (il existe un zonage particulier sismique dans le cas du dimensionnement aux tremblements de terre).

Intégration dans un milieu écologique est aussi à prendre en compte.

La présence de faune ou de flore peuvent contraindre les opérations de construction et de maintenance. Par exemple, les périodes de reproduction peuvent bloquer des interventions et/ou la présence de certaines espèces peut conduire à une modification du plan d'entretien.

²⁰ CEREMA, *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 1 : Dossier d'ouvrage*, op. cit.

²¹ SETRA, *Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants - Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST)*, Note d'information n°35, 2012.

La météo, cas particulier des ouvrages haubanés

Enfin, des stations météo permettent de relever la force du vent. Cette information est très importante, en particulier dans le cas des ouvrages haubanés, car une trop grande force induirait une usure prématurée des câbles (solicitation dite en fatigue).

4.8 Informations complémentaires

Des informations indispensables pour mieux appréhender le territoire.

Elles permettent d'enrichir les informations précédemment récoltées et visent à constituer un modèle plus fiable. Ces intrants constituent un complément d'information qui aideront les acteurs du processus de rétro-ingénierie.

Ces informations peuvent être :

- Des photos, des vidéos ;
- Des fiches techniques d'objets.

Ces informations sont généralement demandées à deux titres :

- ajout d'éléments dans les modèles constitués par rétro ingénierie,
- aide à la modélisation et au contrôle dudit modèle.



Fig 16. Illustration de l'intérêt des photos dans le contrôle des modèles BIM (modélisation du mur) ; ASF autoroute API661

4.9 Inventaire des entrants

Une vérification de la complétude nécessaire.

La collecte d'informations provenant de différentes sources, réalisées dans des temporalités hétérogènes implique un contrôle de complétude et de couverture de l'information récoltée.

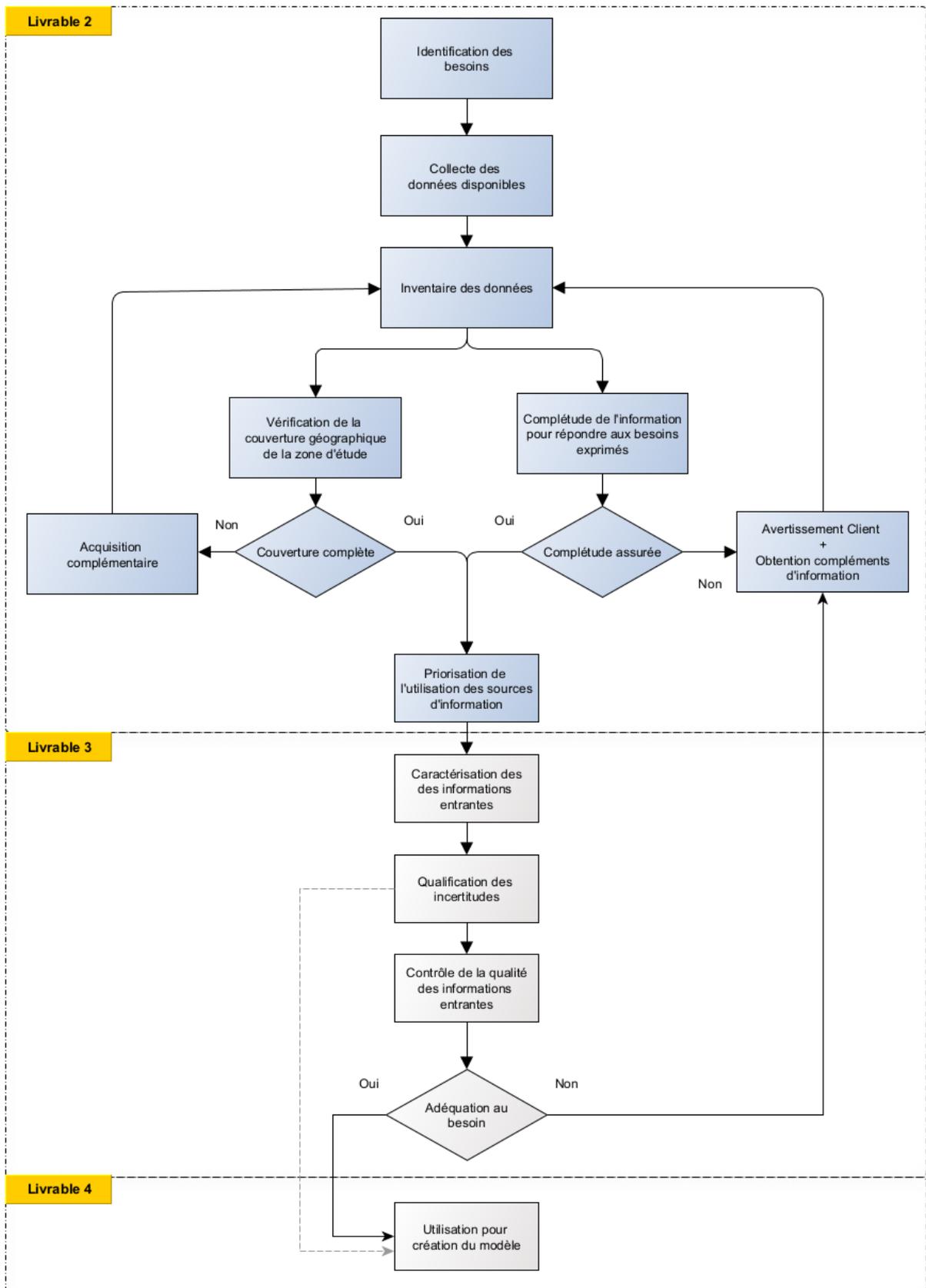


Fig 17. Logigramme d'analyse de l'information entrante, correspondance avec les livrables

Constitution d'un référentiel des informations reçues pour mieux les analyser.

L'inventaire des informations reçues est à consigner dans un tableau de gestion des données d'entrée. Si aucun référentiel n'existe dans le projet, il est pertinent d'utiliser le cadre proposé dans la norme ISO 9001.

Une fois le premier jet de documents collectés, l'étape cruciale de synthèse des informations collectées (géométrie, position planimétrique, etc.), commence.

Le référentiel, constitué idéalement sous forme de tableau, contiendra les informations suivantes :

- Référentiel de système de coordonnées (Lambert93, CC 9 zones, etc.),
- Référentiel altimétrique (IGN69 + grille altimétrique utilisée, repère local, etc.),
- Type de l'information,
- État de l'information (obsolète, utilité, etc.).

La première étape consiste à vérifier la couverture de la zone d'étude par les informations reçues (Fig 17. Logigramme d'analyse de l'information entrante, ci-dessus).

Si un manque est observé, des demandes complémentaires et/ou des acquisitions terrain sont à envisager.

4.10 Sélection des informations entrantes

Premier tri des informations entrantes.

Il arrive parfois que certains documents se contredisent. Il est donc nécessaire de tirer au clair quelle propriété est la plus proche de la réalité.

En effet lors de sa vie, un ouvrage subit différentes altérations qui peuvent mettre à mal les caractéristiques de l'ouvrage lors de sa réalisation.

Des événements liés à la vie de l'ouvrage rendent les informations obsolètes.

Divers documents sont produits à différentes étapes de la vie de l'ouvrage. À titre d'exemple, les événements suivants auront un impact certain sur les informations extraites de documents produits antérieurement :

- Vieillessement (affaissement, érosion, usure, fatigue), le gabarit n'est plus garanti par exemple ;
- Dégradation (incident, accident, lié à un événement ponctuel) ;
- Réparations.

S'il est impossible de discerner quel document est le plus récent ou le plus crédible, il sera alors nécessaire de se rendre sur site pour mener des investigations complémentaires.

Dans le domaine du SIG, il existe des méthodes pour identifier les valeurs aberrantes

Dans le domaine des informations géographiques, il n'existe a priori pas de norme (ou règle standardisée) qui définisse les règles de sélection de la donnée la plus pertinente. Il existe toutefois des méthodes pour exclure les informations aberrantes, par exemple : moindres carrés – résidus (principalement applicable aux informations de positionnement).

Une priorisation de l'information à valider avec le commanditaire.

Une information récente et validée sera toujours privilégiée. La validation de la pertinence d'une information peut se faire par un faisceau de données convergentes ou par l'utilisation d'une seconde information de référence (géomètre par exemple).

Un ordre de priorité doit être établi conjointement avec le commanditaire de la rétro-ingénierie. A minima, les réponses à apporter portent sur :

- la disponibilité d'une source d'information in situ (extrados / fondation),
- la précision des informations,
- dans les zones de recouvrement d'information un choix de l'information est à réaliser :
 - pertinence et précision des outils de mesure (recouvrement de nuages de points Aéroporté, MMS, fixe),
 - âge des différentes sources d'informations dans les zones de recouvrement.

**Évaluation de la qualité
de l'information
(unitaire) nécessite une
pré-sélection des
informations**

La consignation de la priorisation des choix permettra aux deux parties d'avoir un scénario défini pour les arbitrages ultérieurs.

La démarche de recueil d'information (périmètre du présent livrable) est ensuite suivie d'une analyse de la qualité et de la pertinence de l'information. Ce processus détaillé dans le livrable 3 de notre groupe de travail est consommateur de ressources. Il est donc indispensable de réaliser une pré-sélection des informations qui y seront soumises.

5. PLM ET CONTENEURS DE DONNÉES

Un groupe de travail MINnD Saison 2 consacré au sujet

Un modèle d'informations basé sur des briques élémentaires

Une décomposition multi-thèmes, du macro vers le micro

Le groupe de travail GT3.1 a produit un livrable spécifique au PLM pour la phase d'exploitation des infrastructures²².

Les paragraphes suivants ont un but d'éveiller le lecteur à la pertinence de la mise en place du PLM dans la gestion des informations des infrastructures, plus particulièrement lorsqu'il s'agit de réaliser un processus de rétro-ingénierie.

Le modèle de PLM s'appuie sur des briques élémentaires qui constituent un modèle conceptuel de données orienté objet représentant les actifs de l'infrastructure.

Ces briques permettent, par exemple, de décrire des objets (piles, tablier, réseaux, modèle 3D du terrain) ainsi que leurs relations (relation document-objet par exemple), voir Fig 18 ci-dessous.

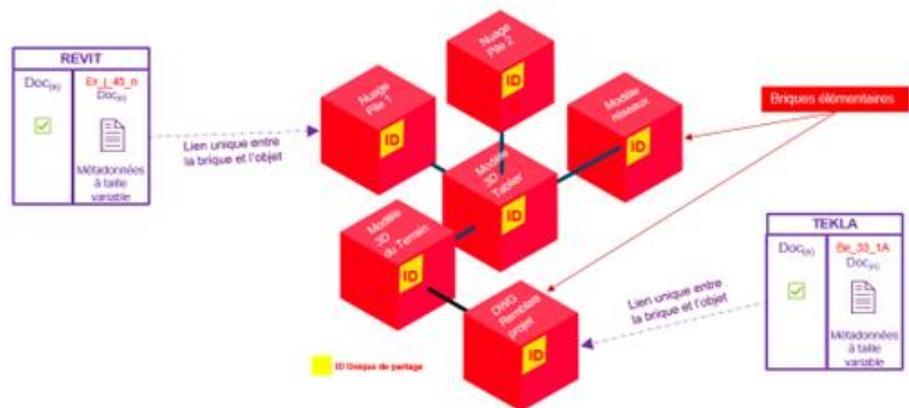


Fig 18. Principe d'organisation des briques dans un modèle PLM. Source : Eiffage

À chaque "objet" peut être associé un certain nombre d'informations, elles aussi codifiées afin d'être lues de manière uniforme.

Ces briques élémentaires traitent :

- De la forme des objets ainsi que de leurs caractéristiques (comme la composition d'un mur),
- Du projet tout au long du cycle de programmation, (rétro-ingénierie, conception, construction, gestion) et selon différents domaines techniques ou métiers (architecture, structure, thermique, estimatif...).
- Les briques élémentaires se subdivisent par niveaux successifs. Les briques peuvent être constituées en ensembles dans un niveau supérieur. Enfin les briques élémentaires du niveau le plus bas ne peuvent plus être décomposables, c'est pour cette raison que le découpage du projet doit se faire très en amont.

²² Sylvain Guilloteau, Michel Rives, Vincent Cousin, Lionel Najman, Jean-Marie Dolo, Jean Behar, Nolwenn Lancien, Yvan Tchana, Florian Hulin et Pierre Maréchal, *Intégration progressive du PLM dans l'exploitation des infrastructures de transport*, MINnDs2_GT3.1_integrative_PLM_exploitation_infrastructure_transport_026_2022 LC/21/MINNDS2/033-034-035-036-037-038-039-040 - Livrable du PN MINnD Saison 2 - Thème de rattachement : Création des données, 2022.

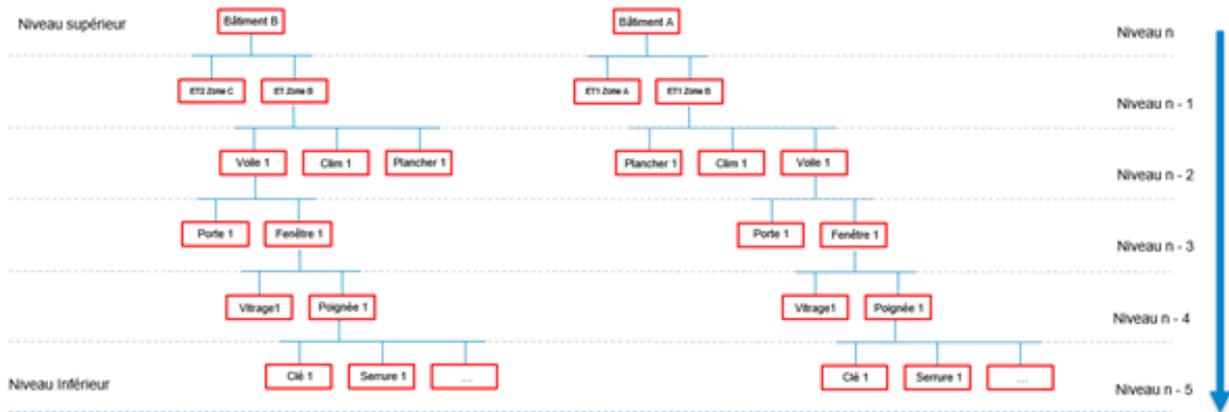


Fig 19. Briques élémentaires et décomposition organique. Source : Eiffage

Le phasage des projets : un obstacle à la mise en place du PLM

Dialogue entre les conteneurs et enjeux pour la rétro-ingénierie

Le découpage des infrastructures en briques élémentaires doit se faire dès la conception et ce pour tout leur cycle de vie. C'est grâce à ce découpage, à la structuration et à l'organisation des informations que la gestion des informations gagne en efficacité.

Or, l'organisation actuelle de nos projets depuis la conception au démantèlement est un obstacle à la mise en place de PLM. En effet, le cloisonnement des missions des différents acteurs, des responsabilités juridiques complexifie la continuité numérique.

Nous pouvons déjà proposer les premières bases d'une réflexion : les briques élémentaires sont liées entre elles par des conditions géométriques (x,y,z), mécaniques et de mouvements. Il y a un lien unique entre une brique et un objet d'un niveau donné.

Le processus de rétro-ingénierie implique l'exploitation d'une masse importante d'information (plans, nuages de points, modèles 3D, etc.). Si une démarche PLM doit être mise en place sur le projet, il convient de s'assurer du bon dialogue entre les différentes plateformes de stockage et de production des informations (cf. Fig 20 ci-dessous).

Une telle organisation facilitera la recherche des informations qu'il est pertinent d'utiliser et de mieux évaluer leur fiabilité.

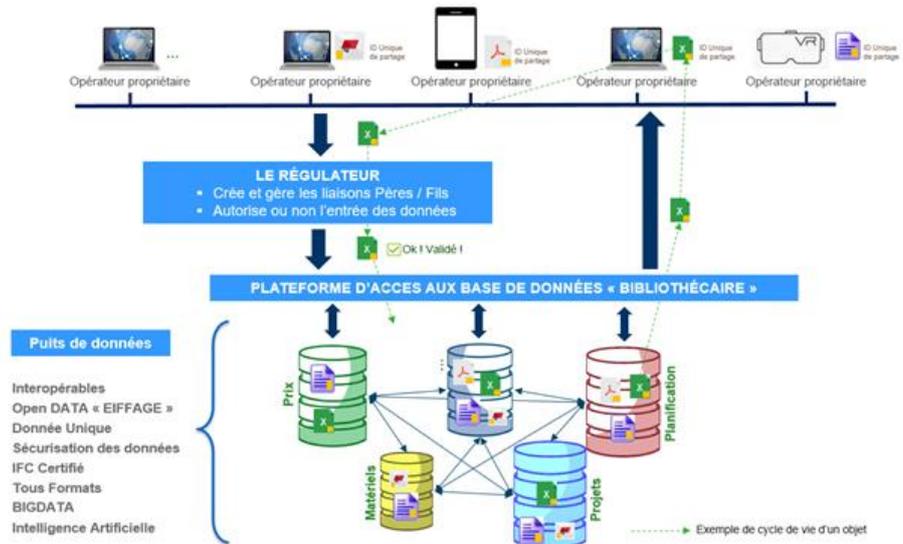


Fig 20. Accès aux containers et interconnexion entre ceux-ci, source Eiffage.

Nous invitons le lecteur à prendre connaissance des livrables du groupe de travail GT6-2 : Plateformes collaboratives et collaboration de plateformes.

Cas particulier des modèles BIM projets devant être exploités ultérieurement pour des missions de rétro-ingénierie

Les pratiques actuelles conduisent les acteurs BIM à recevoir des fichiers BIM en silos. L'extraction d'informations spécifique est souvent synonyme de navigation laborieuse dans l'intégralité des modèles fournis (différentes versions du même modèle, différentes phases de projet, etc.).

Dans le cas d'un projet s'appuyant sur un modèle de l'existant créé par rétro-ingénierie, il est très souvent nécessaire de réaliser des requêtes et extractions partielles sur le modèle de l'existant. Les décisions du projet s'appuient ensuite sur les informations extraites. Il est alors pertinent de mettre en place une interopérabilité dynamique entre ces deux modèles.

Le lien bidirectionnel entre deux ensembles d'informations BIM est la pierre angulaire d'une bonne exploitation de la rétro-ingénierie.

Dans les phases ultérieures du projet, il sera nécessaire d'adresser les notions de programmation de l'obsolescence des informations du modèle de l'existant. Ces informations obsolètes seront remplacées / enrichies par les informations du modèle BIM de la phase conception.

6. SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE ET RÉTRO-ENGINEERING

Objectifs de la sobriété numérique.

La sobriété numérique est une démarche qui vise à réduire l'impact environnemental du numérique^{23,24,25,26,27}. L'expression « sobriété numérique » a été forgée en 2008 par l'association GreenIT.fr pour désigner « la démarche qui consiste à concevoir des services numériques plus sobres et à modérer ses usages numériques quotidiens ». Le sujet est complexe tant les projets sont différents. Nous allons néanmoins tenter ici d'en dessiner les contours.

L'« Homo Numericus » contribue significativement aux crises du XXI^e siècle :

- Réchauffement climatique,
- Épuisement des ressources abiotiques,
- Effondrement de la biodiversité,
- Impacts éthiques, sociétaux et environnementaux,
- Pollution des sols,
- Gestion des déchets équipements électriques et électroniques (D3E),
- Consommation électrique et émissions de gaz à effet de serre, ...

Il est donc important de réfléchir à la manière dont nous pouvons limiter ces empreintes dans nos projets de rétro-ingénierie, tout au long du cycle de vie des informations utilisées ou générées dans ce processus.

Un groupe de travail MINnD S2 travaille sur le sujet

Un impact à contrebalancer avec impacts évités

Le groupe de travail « GT0-5 Impact Carbone » travaille spécifiquement sur l'impact environnemental du numérique lié à l'emploi du BIM sur les projets d'infrastructure. Nous invitons le lecteur à se référer au livrable de ce GT pour approfondir le sujet²⁸.

La frugalité numérique n'est pas un objectif en soi. En effet, l'apport du numérique peut permettre une réduction des impacts d'un projet. À titre d'exemple, le stockage et la mise à disposition d'un nuage de points peut permettre de réaliser des mesures et ainsi d'éviter des déplacements supplémentaires sur site.

6.1 Pistes de travail

3 axes proposés par notre GT

Une information doit être unique et à jour

Nous proposons trois axes de réflexions concernant la sobriété numérique d'un projet tout au long de la vie d'un projet en rétro-ingénierie.

Les outils de gestion de projets de rétro-engineering doivent permettre de limiter la duplication des informations grâce à la mise en place de workflows associés aux processus d'acquisitions et de transformations de données. Ceci permet de limiter l'utilisation des ressources (stockage, énergie, etc.)

Un second effet bénéfique induit est la suppression des risques liés à l'utilisation d'une information obsolète.

²³ ADEME, *La face cachée du numérique - Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*, Collection Clés pour agir, 2019.

²⁴ IDDRI, FING, WWF France, GreenIT.fr, *Livre blanc Numérique et Environnement*, 2018.

²⁵ WWF France, *Guide pour un système d'information éco-responsable*, 2011.

²⁶ The Shift Project, *Lean ICT - Pour une sobriété numérique*, Rapport final - v8, 2018.

²⁷ Ornella Trudu, Aurélie Pontal et Frédéric Bordage, *Quelle démarche GreenIT pour les grandes entreprises françaises ?*, WWF et Club GreenIT, 2018.

²⁸ Imane Ammad, Pierre Benning, Anne Dony, Thierry Douceron, Maud Guizol, Jean-Pierre Jacquet, Anne-Laure Levent, Renaud de Montaignac, Koji Negishi et Layella Ziyani, *Impact Carbone des Données Numériques*, MINnDs2_GT0.5_impact_carbone_donnees_numeriques_032_2022 LC/22/MINnDS2/176-177-178-179-180 - Livrable du PN MINnD Saison 2 - Thème de rattachement : Observatoire, 2023.

Un niveau de détail minimum nécessaire et suffisant

Les informations source de la rétro-ingénierie proviennent de très nombreuses sources. Leurs tailles intrinsèques peuvent varier considérablement en passant de quelques kilo-octets à plusieurs giga-octets, en fonction de leurs natures (levé topographique traditionnel, nuage de points, plans, etc.).

Il est donc important de cadrer les missions de collecte d'informations en fonctions des besoins du projet (sur toute sa durée) afin de constituer un socle suffisamment « dense » pour mener à bien le processus de rétro-ingénierie. Il est conseillé de s'appuyer sur le livrable « Relevés numériques » de la saison 1 de MINnD²⁹.

Dans le cas d'utilisation de nuages de points obtenus par photogrammétrie ou lasergrammétrie, les principales sources de surconsommation numérique sont généralement liées à une trop forte densité de points ou une couverture trop grande. Les nuages de points ayant un surplus d'information non strictement nécessaire à la réalisation du projet doivent faire l'objet d'une optimisation (suppression des points hors périmètre, réduction contrôlée de la densité des points).

À titre d'exemple, dans l'image ci-dessous, si l'objet d'étude est l'ouvrage d'art, il semble judicieux de supprimer les points de la zone du giratoire (jaune). Un traitement par recherche des points clés (Key Points) du nuage de points peut aussi être appliqué sur le reste de la zone d'étude.

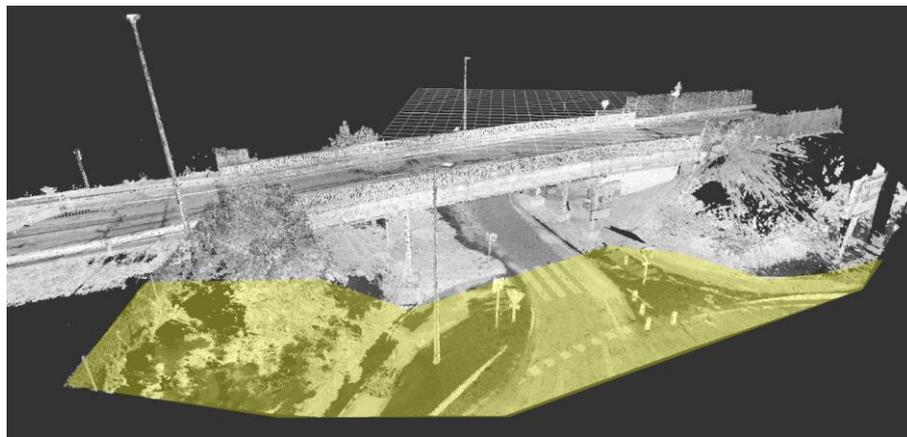


Fig 21. Exemple de nuage de points, délimitation du rognage des informations non nécessaires.
Source : Futurmap.

Une obsolescence des données programmée

Les nuages de points constituent très fréquemment une des entrées de la rétro-ingénierie. Ces informations sont très volumineuses, il est donc nécessaire de se questionner sur leur durée de vie.

Est-ce qu'un nuage de points réalisé en début de projet à des fins de modélisation du terrain pour les études est encore utile en phase DOE ? Ne doit-il pas être tout simplement effacé ? Quel en sera l'usage futur ?

C'est l'un des points majeurs de la question de la sobriété numérique de nos projets. L'empilement des données, ainsi que leur duplication infinie doit faire l'objet d'une réflexion approfondie pour les rendre impossibles.

Les pistes de réflexion que nous proposons sont :

- Avoir recourt aux environnements communs de données pour garantir l'unicité de l'information et son maintien à jour ;
- Mettre en œuvre un plan de gestion de l'obsolescence des informations.

²⁹ Omar Djoudi, Nolwenn Lancien et Guillaume Tignon, *Relevés numériques*, MINnD_TH01_UC00_03_Relevés_numeriques_026_2019 - Livrable du PN MINnD Saison I - Thème I : Mise en perspectives des pratiques - Nouvelles technologies, 2019.

6.2 Preuve par l'exemple

Volumétrie de données minimale pour une phase de projet

Les réflexions précédentes appellent la question suivante : "Quelle est le volume de données minimum nécessaire à mon projet et ce tout le long de sa vie ?

L'un des axes de réponse est de définir ce minimum comme la réunion minimum des données nécessaires pour chacune de ses phases (APS, APD, étude, ...).

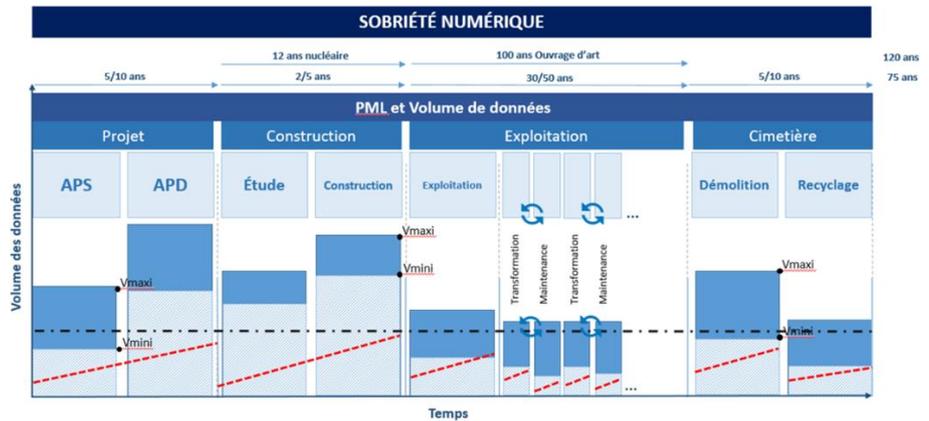


Fig 22. Graphique représentant dans la durée, les volumes de données produites par phase de projet. Source Eiffage.

Contexte de l'exercice :
valider un
positionnement
d'éléments d'un ouvrage

L'exercice est réalisé ci-après sur une mission de rétro-ingénierie en phase construction. Le modèle produit doit être utilisé pour vérifier le positionnement et les dimensions de parties d'ouvrage par rapport aux modèles d'étude. Plus précisément, le but était de valider le positionnement des poutres d'un ouvrage de Génie Civil. Le système de coordonnées utilisé est le Lambert93³⁰.

Dans cet exemple d'acquisition, de transformation d'informations et de destruction d'informations, la volumétrie d'informations est mesurée à chaque étape.

**Étapes du processus
d'acquisition et de
transformation**

1. L'étape initiale est l'étape d'acquisition du nuage de points par mise en stations successives. Cette mise en station s'accompagne de prise de vues par photographie.



Fig 23. Prises de vue sur le terrain et positionnement des cibles topo. Source : Eiffage.

³⁰ Institut Géographique National (IGN), *Le système RGF et la projection Lambert 93*, op. cit.

2. Les nuages de points sont ensuite assemblés, géo-référencés et classifiés.

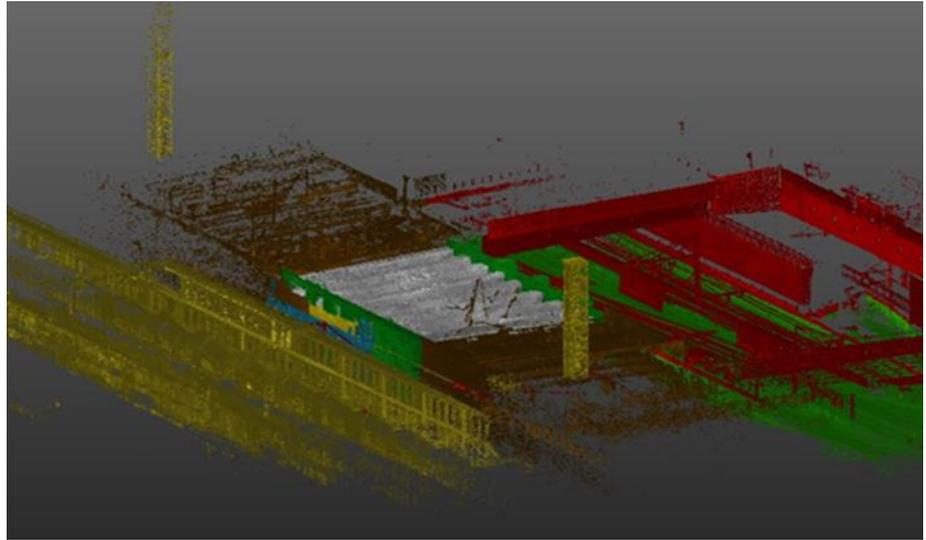


Fig 24. Nuages de points assemblés, classifiés. En gris, au centre de l'image, la zone d'intérêt.
Source : Eiffage.

3. Le nuage de points est ensuite tronqué pour ne conserver que la zone d'intérêt. Un quadrillage de la zone est alors réalisé. Les lignes du quadrillage sont ensuite drapées sur le nuage de points (lignes cyan ci-dessous).

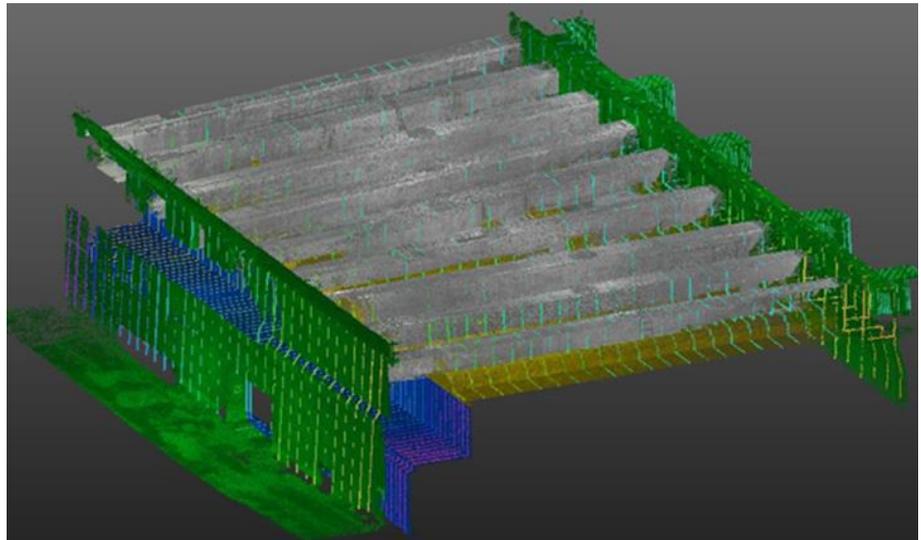


Fig 25. Nuage de points tronqué avec quadrillage drapé. Source : Eiffage.

4. Le quadrillage drapé est alors exporté dans un format compatible avec les outils de CAO couramment utilisés dans le domaine des infrastructures, ici le format DWG.

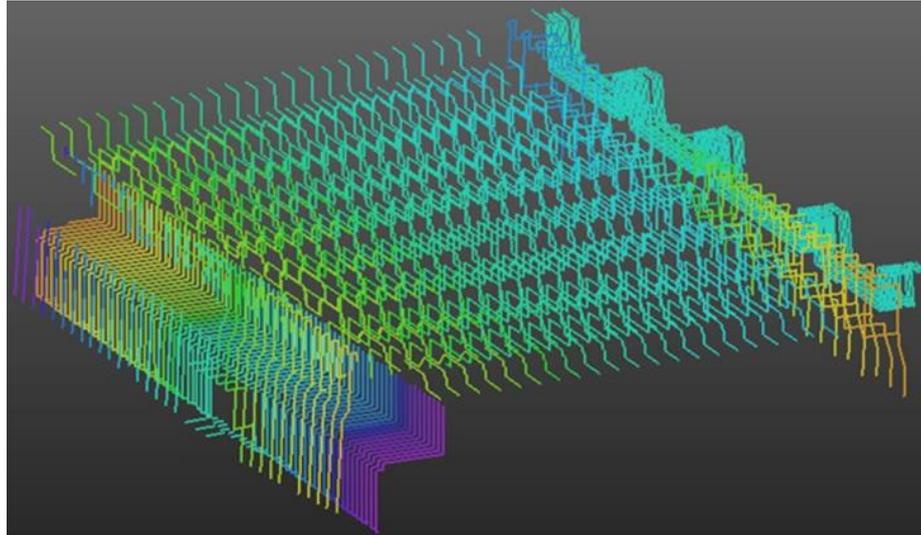


Fig 26. Quadrillage drapé qui sera exporté en DWG. Source : Eiffage.

- Le quadrillage est ensuite intégré dans la maquette de conception pour réaliser le contrôle d'implantation.

Métriques de l'exercice :
un résultat probant
mais valable
uniquement si les
données devenues
inutiles sont
effectivement
supprimées

Objet considéré

Dimensions h x L x l en m	10x40x30
Volume hors tout	12.000m ³

Relevé topographique

Nombre de stations	30
Nombre de cibles géolocalisées	6
Nombre des sphères de calage	3/4 par station
Écart relatif entre chaque station	+/- 2,5 mm
Nombre de points relevés	2,2 milliards

Volumétrie des données :

Données de scan brutes	7Go
Projet de travail (pour fusion des nuages, etc.)	90Go
Nuage de points tronqué	550Mo
Livrable DWG	506 ko
Maquette de contrôle	10 Mo

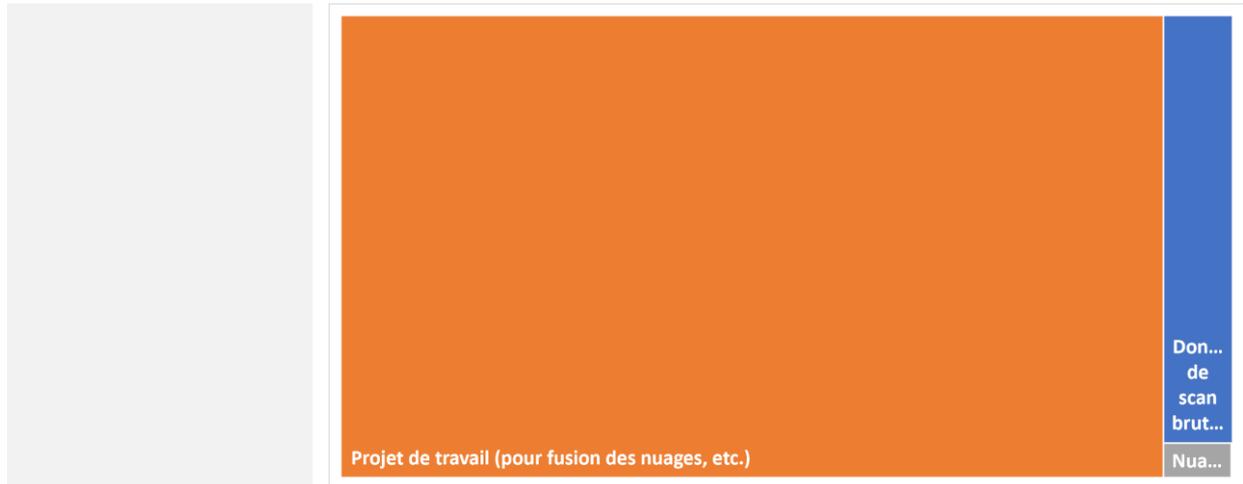


Fig 27. Surface respectives des espaces de stockage occupés par les différents fichiers. Le Livrable DWG et la maquette de contrôle y sont représentés, mais trop petits pour être visibles.

Des résultats de plusieurs ordres de grandeur mais dont l'exécution est à suivre pour un effet réel

Nous voyons donc que la sobriété numérique dans notre domaine de rétro-engineering doit être traitée d'une manière globale, en prenant en compte chaque phase.

Dans l'exemple présenté, la volumétrie des données utiles en fin de processus (dwg) est sans commune mesure avec celle du fichier de travail. Le gain n'est réel que si les fichiers inutilisés sont supprimés.

En dehors des aspects environnementaux, il est clair que l'optimisation du volume des données a un impact direct sur le projet en termes d'efficacité des traitements de données, des coûts d'infrastructure et du contrôle qualité. C'est un sujet qu'il est indispensable de considérer dans la gestion des informations des projets.

7. RÉFÉRENCES

- ADEME, *La face cachée du numérique - Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*, Collection Clés pour agir, 2019, 23 p.
- Ammad Imane, Benning Pierre, Dony Anne, Douceron Thierry, Guizol Maud, Jacquet Jean-Pierre, Levent Anne-Laure, Moutagnac Renaud de, Negishi Koji et Ziyani Layella, *Impact Carbone des Données Numériques*, MINnDs2_GT0.5_impact_carbone_donnees_numeriques_032_2022 LC/22/MINNDS2/176-177-178-179-180 - Livrable du PN MINnD Saison 2 - Thème de rattachement : Observatoire, 2023.
- CEREMA, *Catalogue des types de route pour l'aménagement du réseau routier national*, Éditions Cerema, Collection Références, 2019.
- CEREMA, *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 1 : Dossier d'ouvrage*, Éditions Cerema, Collection Références, 2016.
- Djoudi Omar, Lancien Nolwenn et Tignon Guillaume, *Relevés numériques*, MINnD_TH01_UC00_03_Relevés_numeriques_026_2019 - Livrable du PN MINnD Saison 1 - Thème 1 : Mise en perspectives des pratiques - Nouvelles technologies, 2019.
- Guilloteau Sylvain, Rives Michel, Cousin Vincent, Najman Lionel, Dolo Jean-Marie, Behar Jean, Lancien Nolwenn, Tchana Yvan, Hulin Florian et Maréchal Pierre, *Intégration progressive du PLM dans l'exploitation des infrastructures de transport*, MINnDs2_GT3.1_integration_progressive_PLM_exploitation_infrastructure_transport_026_2022 LC/21/MINNDS2/033-034-035-036-037-038-039-040 - Livrable du PN MINnD Saison 2 - Thème de rattachement : Création des données, 2022.
- IDDRI, FING, WWF France, GreenIT.fr, *Livre blanc Numérique et Environnement*, 2018.
- IDRRIM, *Diagnostic et conception des renforcements de chaussées*, Éditions CEREMA - Collection Références, 2016.
- Institut Géographique National (IGN), *Le système RGF et la projection Lambert 93*, IGN-DirCom 08/2008, 2008.
- LCPC, *Catalogue des dégradations de surface des chaussées*, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées-Méthode d'essai n°52-Complément de la méthode d'essai n°38-2, 1998.
- LCPC, SETRA, *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Paris, 1998.
- MINnD, *Dictionnaire de données - Plateforme*, Livrable du PN MINnD Saison 2 - GT1.3 IFC Road, 2021.
- NF EN 17412-1, *Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2020.
- NF EN ISO 19157, *Information géographique - Qualité de données*, Collections AFNOR, 2014.
- NF 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*, Collections AFNOR, 2018.
- NF P 98-086, *Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves*, Collections AFNOR, 2019.
- SETRA, *Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants - Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST)*, Note d'information n°35, 2012.
- SETRA, *Guide technique - Entretien des chaussées en béton - Chaussées routières et aéronautiques*, LCPC, 2002.
- SETRA/LCPC, *Réalisation des remblais et des couches de forme - Fascicule 1 - principes généraux*, Éditions Cerema, 2000.
- The Shift Project, *Lean ICT - Pour une sobriété numérique*, Rapport final - v8, 2018.
- Trudu Ornella, Pontal Aurélie et Bordage Frédéric, *Quelle démarche GreenIT pour les grandes entreprises françaises ?*, WWF et Club GreenIT, 2018.
- WWF France, *Guide pour un système d'information éco-responsable*, 2011.
- Alizé Lcpc - *Logiciel pour le dimensionnement des structures de chaussées*, <https://www.alize-lcpc.com/fr/index.php>, consulté le 14 octobre 2021.

8. TABLE DES MATIÈRES

I. RÉSUMÉ / ABSTRACT	2
Résumé	2
Abstract	2
Abréviations	2
Mots clés principaux (Fra).....	2
Mots clés spécifiques au livrable (Fra)	2
Main key words (Eng).....	2
Deliverable key words (Eng)	2
2. INTRODUCTION	3
2.1 Lien avec les autres Groupes de Travail MINnD	3
MINnD	3
PLM	3
DOE	3
Incertitudes et Tolérances	3
Impact Carbone.....	3
3. DÉFINITION DES ATTENTES / EXIGENCES.....	4
Un cadrage indispensable.....	4
Prise en compte des phases de projet	4
3.1 Travail à proximité d'un ouvrage	4
Environnement support.....	4
Données utiles	5
Identifier le propriétaire.....	5
Fluidifier les échanges	5
Exemple	5
3.1 Travail sur l'ouvrage	5
Fiabilité requise	5
Informations théoriquement disponibles	6
Faciliter la consultation	6
Exemple	6
3.2 Exploitation et maintenance de l'ouvrage	6
Socle de départ du jumeau numérique	6
L'important n'est pas la géométrie	6
Niveau de détail en fonction du besoin	6
Référentiel indispensable	7
3.3 Aspects normatifs	7
Cadre normatif fort dans le BIM : NF EN ISO 19650-1	7
Modèles d'information.....	7
Exemple d'extrapolation aux infrastructures	7
Illustration	7
Les enrichissements successifs des AIM et PIM.....	8
Transcription en phases	8
Conteneurs d'informations	9
Du BIM, mais aussi un ECD, une GED, une plateforme de visualisation... ..	9
Formaliser le besoin.....	9
Qualifier la qualité des informations.....	9
3.4 Exigences de précision et de qualification de l'incertitude des données d'entrée.....	10
Une norme sur la qualité des informations géographiques transposable pour les infrastructures 10	
Un premier critère d'exhaustivité (Completeness)	10
Un deuxième critère de cohérence logique (logical consistency)	10
Un critère de précision des positions (Positional accuracy).....	11

	Un critère de qualité temporelle (temporal quality)-----	11
	Un critère de justesse thématique (thematic accuracy)-----	12
	Mesures dérivées de l'agrégation des informations (aggregation measures)-----	12
	Une mesure globale ou ponctuelle -----	12
	Usage des mesures de la qualité -----	12
	Autres informations relatives à un jeu de données -----	12
3.5	Synthèse des exigences.....	13
	Nécessité de formuler les besoins selon la norme NF EN 17412-1	13
	Ajouts par rapport à la norme -----	13
4.	DÉFINITION, ANALYSE ET SÉLECTION DES ENTRANTS	15
4.1	Définition d'un entrant	15
	L'entrant est une base de départ	15
	Cas particulier de l'existant-----	15
	Origines de l'information lors des études initiales ou à acquérir par un travail spécial -----	15
	Remarque liminaire sur l'absence de contributeur direct issu des ouvrages d'art-----	16
4.2	Informations géométriques.....	16
	Définition	16
	Utilités de géométrie et de positionnement -----	16
	Types de supports	16
	Pour les données mesurées sur le terrain, leurs prétraitements sont traités dans d'autres documents que celui-ci	16
	L'étendue et la qualité des informations dépend des supports de types plans – modèles selon les diverses phases du cycle de vie-----	17
	Exploitabilité des informations -----	17
	Synthèse-----	18
4.3	Informations physiques (autres que de dimensions).....	18
	Les informations utiles pour les routes et les ouvrages d'art.....	18
	Types de chaussées routières selon la norme NF P98-086-----	18
	Pour les ouvrages d'art OA, utilisation du fascicule ITSEO du CEREMA-----	19
	Pour les OA une longue liste : alignement, dimensionnement, déformation, équipements -----	19
4.4	Informations de conception	19
	Les informations de conception sont indispensables.....	19
	Pour les chaussées, les premiers intrants sont les données liées au trafic à supporter sur une certaine durée de vie -----	20
	Une fois les sollicitations élicitées, on passe aux choix des matériaux et aux dimensionnements des diverses couches-----	20
	Utilisation d'outils de dimensionnement comme le logiciel Alizé développé par l'UGE et distribué par le Itech-----	20
4.5	Informations de mise en œuvre	21
	Au-delà des informations de conception, celles de la mise en œuvre s'avèrent aussi indispensables	21
	En chaussée routière, les données de mise en œuvre ont été l'objet des travaux antérieurs du GT 1.3 lfc Road---	21
	Pour les ouvrages d'art, il convient de se référer aux travaux du groupe de travail lfc Bridge-----	22
4.6	Informations d'exploitation et pathologies.....	22
	Historique depuis la construction est nécessaire pour identifier les évolutions.....	22
	Les chaussées routières sujettes au vieillissement et aux phénomènes de fatigue font l'objet de nombreux contrôles et auscultations tout au long de leur usage. -----	22
	Chaussées – nécessité de documenter tout traitement curatif -----	22
	Chaussées – nécessité d'estimer le trafic réel supporté » -----	23
	Pour les ouvrages d'art, seuls les ouvrages d'art non conventionnels font l'objet d'une obligation forte de suivi ----	23
	Ouvrages d'art – priorisation des désordres et recueil des informations photographiques -----	23
	Ouvrages d'art – Essais de contrôle-----	23
4.7	Informations environnementales.....	23
	Une interface ouvrage territoire qu'il est nécessaire de considérer.....	23
	Prise en compte des risques naturels en particulier sismiques-----	23
	Intégration dans un milieu écologique est aussi à prendre en compte. -----	23
	La météo, cas particulier des ouvrages haubanés -----	24

4.8	Informations complémentaires	24
	Des informations indispensables pour mieux appréhender le territoire.....	24
4.9	Inventaire des entrants.....	24
	Une vérification de la complétude nécessaire.....	24
	Constitution d'un référentiel des informations reçues pour mieux les analyser.	26
4.10	Sélection des informations entrantes.....	26
	Premier tri des informations entrantes.	26
	Des évènements liés à la vie de l'ouvrage rendent les informations obsolètes.	26
	Dans le domaine du SIG, il existe des méthodes pour identifier les valeurs aberrantes.....	26
	Une priorisation de l'information à valider avec le commanditaire.	26
	Évaluation de la qualité de l'information (unitaire) nécessite une pré-sélection des informations	27
5.	PLM ET CONTENEURS DE DONNÉES.....	28
	Un groupe de travail MINnD Saison 2 consacré au sujet.....	28
	Un modèle d'informations basé sur des briques élémentaires	28
	Une décomposition multi-thèmes, du macro vers le micro	28
	Le phasage des projets : un obstacle à la mise en place du PLM.....	29
	Dialogue entre les conteneurs et enjeux pour la rétro-ingénierie	29
	Cas particulier des modèles BIM projets devant être exploités ultérieurement pour des missions de rétro-ingénierie	30
6.	SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE ET RÉTRO-ENGINEERING.....	31
	Objectifs de la sobriété numérique.....	31
	Un groupe de travail MINnD S2 travaille sur le sujet.....	31
	Un impact à contrebalancer avec impacts évités	31
6.1	Pistes de travail	31
	3 axes proposés par notre GT	31
	Une information doit être unique et à jour	31
	Un niveau de détail minimum nécessaire et suffisant	32
	Une obsolescence des données programmée	32
6.2	Preuve par l'exemple.....	33
	Volumétrie de données minimale pour une phase de projet.....	33
	Contexte de l'exercice : valider un positionnement d'éléments d'un ouvrage	33
	Étapes du processus d'acquisition et de transformation	33
	Métriques de l'exercice : un résultat probant mais valable uniquement si les données devenues inutiles sont effectivement supprimées	35
	Des résultats de plusieurs ordres de grandeur mais dont l'exécution est à suivre pour un effet réel.....	36
7.	RÉFÉRENCES	37
8.	TABLE DES MATIÈRES	38
9.	SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS.....	41
10.	ANNEXES.....	42
	10.1 Tableau de synthèse des exigences	42

9. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS

Fig 1. Schéma de principe d'une rétro-ingénierie (source Safege)	4
Fig 2. Illustration de la prise en compte d'ouvrages de type réseau à proximité (rose) d'un ouvrage d'art (vert), objet du projet – source : Setec-ASF	5
Fig 3. Illustration du travail sur un ouvrage (rose), objet de la rétro-ingénierie. Source : Setec-ASF	6
Fig 4. Projet générique et cycle de vie de la gestion de l'information d'un actif – NF EN ISO 19650	8
Fig 5. Tableau de structuration de la demande	13
Fig 6. Canalisation existante (grise) modélisée avec l'enveloppe d'incertitude liée à sa classe de précision (jaune) - SETEC	14
Fig 7. Pont Rail au KM 131+622 de la ligne I15000 - Ensemble et détails - Source SNCF	15
Fig 8. Pont Rail au KM 131+284 de la ligne I15000 - Armatures - Source SNCF	15
Fig 9. Pont Rail au KM 134+903 de la ligne I15000 - Coffrage et armatures : Détail des appuis - Source SNCF	15
Fig 10. Géoréférencement d'un projet d'infrastructure linéaire (source MINnD)	16
Fig 11. Diagramme montrant l'utilisation d'IfcFacetedBrep + Source : standards.buildingsmart.org – IFC4.2	18
Fig 12. Représentation d'IfcSweptAreaSolid - Source : standards.buildingsmart.org – IFC4.3	18
Fig 13. Cohérence de l'usage d'un type de support d'information avec le type d'information recherchée et avec le mode de mesure.	18
Fig 14. Profil en travers-type d'une chaussée unidirectionnelle	19
Fig 15. Démarche globale adoptée pour concevoir une structure de chaussée.	21
Fig 16. Illustration de l'intérêt des photos dans le contrôle des modèles BIM (modélisation du mur) ; ASF autoroute API661	24
Fig 17. Logigramme d'analyse de l'information entrante, correspondance avec les livrables	25
Fig 18. Principe d'organisation des briques dans un modèle PLM. Source : Eiffage	28
Fig 19. Briques élémentaires et décomposition organique. Source : Eiffage	29
Fig 20. Accès aux containers et interconnexion entre ceux-ci, source Eiffage.	29
Fig 21. Exemple de nuage de points, délimitation du rognage des informations non nécessaires. Source : Futurmap.	32
Fig 22. Graphique représentant dans la durée, les volumes de données produites par phase de projet. Source Eiffage.	33
Fig 23. Prises de vue sur le terrain et positionnement des cibles topo. Source : Eiffage.	33
Fig 24. Nuages de points assemblés, classifiés. En gris, au centre de l'image, la zone d'intérêt. Source : Eiffage.	34
Fig 25. Nuage de points tronqué avec quadrillage drapé. Source : Eiffage.	34
Fig 26. Quadrillage drapé qui sera exporté en DWG. Source : Eiffage.	35
Fig 27. Surface respectives des espaces de stockage occupés par les différents fichiers. Le Livrable DWG et la maquette de contrôle y sont représentés, mais trop petits pour être visibles.	36

10. ANNEXES

10.1 Tableau de synthèse des exigences

Contexte	Usage	Informations alphanumériques		Documentation	Précision	Géométrie													
		Identification	Contenu de l'information			Référentiel		Extrados					Intrados						
					Niveau de précision attendu	Planimétrique	Altimétrique	Détail	Dimensionnalité	Emplacement	Apparence	Comportement paramétrique	Enveloppe d'incertitude	Détail	Dimensionnalité	Emplacement	Apparence	Comportement paramétrique	Enveloppe d'incertitude
Intervention à proximité de l'ouvrage	Technique	- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - E&M : historique des interventions	+/- 5cm	RGF93.CC45	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Couleur simple	S/O	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O
	Contextualisation	- Nom ouvrage	S/O	S/O	+/- 20cm	RGF93.CC45	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Texturé	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O	S/O
Communication		S/O	S/O	S/O		LOCAL	LOCAL												
Intervention sur l'ouvrage		- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - E&M : historique des interventions	+/- 2cm	LOCAL	LOCAL	Détaillé (LOD300)	3D	Relatif	Couleur simple	S/O	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement	Détaillé (LOD300)	3D	absolu	couleur simple	S/O	S/O
Création d'un socle Exploitation		- Nom ouvrage - Type d'ouvrage - Propriétaire - Axe de référence - PK - Sens	- Classe de précision - Date de l'information	- DOE : plans de l'ouvrage - E&M : historique des interventions	+/- 5cm	RGF93	NGF 69	Simplifié (LOD200)	3D	Absolu	Couleur simple	Oui, pour bibliothèque	Enveloppe liée à l'incertitude de positionnement	S/O	2D	S/O	S/O	S/O	S/O