



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables

GT5 : Rétro-ingénierie en phases conception, construction et exploitation-maintenance

État de l'Art

Auteurs / Organismes

William BAYOL (eiffage infrastructure)
Clément BOUDET (setec)
Johann CADREN (vinci autoroutes)
Gilles CHAPRON (setec)
Emmanuel DEVYS (ign)
Sébastien GARNIER (eiffage infrastructure)
Laurence GAUTIER (safege)
Nicolas HORSIN (setec)
Denis LE ROUX (setec)

Benjamin LEHRER (arkance systems)
Laura LIOUX (colas)
Edgar PANEK (egis)
Nicolas RASOLDIER (arcadis)
Coline THOURY (futur map)
Guillaume TIGNON (colas)
Alexandre VAUTRIN (snf reseau)
Layella ZIYANI (estp)

Relecteur / Organismes

Vincent COUSIN (Processus & Innovation)

Thème de rattachement : Utilisation des données

MINnDs2_GT5_retro_ingenierie_modelisation_donnees_etat_art_029_2022

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

Décembre 2022

Site internet : www.minnd.fr

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

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

1.	CONTEXTE DU DOCUMENT.....	2
2.	ACTEURS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE	4
2.1	Identification des acteurs	4
3.	ÉLÉMENTS CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE.....	5
4.	LA RÉTRO-INGÉNIERIE EN DÉTAIL	7
4.1	Définition de la rétro-ingénierie	7
4.2	Imbrication dans un projet.....	7
4.3	Les informations d'entrée	8
4.4	Dans le bâtiment.....	9
4.5	Dans les infrastructures.....	10
5.	ÉTAPES CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE	12
6.	ACQUISITION DES INFORMATIONS DU SITE	13
6.1	Cahier des charges.....	13
6.2	Acquisition des données visibles des chaussées.....	13
6.3	Méthodes d'acquisition des structures enterrées.....	14
7.	LES TRANSFORMATIONS	16
7.1	Géoréférencement	16
7.2	Transformation de coordonnées	17
7.3	Formatage d'informations	18
8.	PRINCIPAUX USAGES DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE.....	20
8.1	Conception et réalisation	20
8.2	Exploitation	21
9.	PRÉCISIONS GÉOMÉTRIQUES	22
9.1	Incertitude	22
10.	PRINCIPALES SOURCES D'INFORMATION	25
10.1	Nuages de points.....	25
10.2	Ortho-photo (photogrammétrie).....	27
10.3	SIG	27
11.	RÉFÉRENCES	29
12.	TABLE DES MATIÈRES	31
13.	SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS	34

**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 ; État de l'art ;

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; State of the Art;

I. CONTEXTE DU DOCUMENT

MINnD Saison 2

Ce document est issu des réflexions engagées dans la saison 2 du Projet National de Recherche (PNR) Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables (MINnD) qui réunit des acteurs qui ont un intérêt commun à l'émergence du BIM dans les métiers de la conception, de la construction ou de l'exploitation des infrastructures.

Programme saison 2

Le programme de la saison 2 de MINnD cible plusieurs « tendances » à traiter lors de cette seconde saison. Le GT5 s'inscrit complètement dans le cadre du programme de recherche en abordant plusieurs tendances listées au programme. Les éléments traités en partie dans le GT5 sont repérés en gras ci-dessous.

- 1. la structuration des données,**
- 2. la qualification de la donnée,**
- 3. la continuité numérique,**
- 4. la convergence BIM-SIG,**
- 5. la gestion du patrimoine et des actifs,**
- 6. la collaboration.**

Programme du GT5

Le GT5 a initialement été créé avec deux groupes distincts :

- le GT5.1 – Rétro-ingénierie en phase conception,
- le GT5.2 – Rétro-ingénierie en phase exploitation et maintenance.

Les thèmes prévus initialement au programme sont répertoriés ci-dessous.

Thèmes du programme	
GT5.1	<ul style="list-style-type: none">• Convergence BIM-SIG.• Modélisation des réseaux.• Normalisation de la représentation du territoire.• Normalisation de la représentation des objets de l'infrastructure.• Niveaux de détail et de précision des informations.• Niveaux d'incertitude des relevés, en fonction de l'usage souhaité.
GT5.2	<ul style="list-style-type: none">• État de l'art des classifications existantes sur les réseaux.• État de l'art sur les niveaux de détail et les tolérances.• Technologies de relevés en intérieur.• Technologies d'identification automatique des types de réseau et de matériaux.• Démonstrateurs en sites réels (technologies de relevés et d'utilisations).

Le thème des « technologies de relevés en intérieur » a été écarté des travaux du GT.

Historique du groupe de travail

Du fait du recoupement fort entre les deux groupes initiaux (thèmes et partenaires MINnD impliqués), il a été décidé de fusionner les deux groupes. Le contenu des livrable a été élargi pour permettre de traiter les problématiques inhérentes aux différentes phases de projet considérées.

Livrables envisagées

Le groupe de travail envisage la production de sept livrables. Les livrables deux à quatre respectent le phasage d'un processus de rétro-ingénierie :

- Livrable 1 : État de l'art.
- Livrable 2 : Données d'entrée, attentes et volumétrie.
- Livrable 3 : Incertitudes, précisions et responsabilités.
- Livrable 4 : Modélisation, contrôle et transfert

Glossaire

- Livrable 5 : Synthèse
- Livrable 6 : Glossaire
- Livrable 7 : Présentations et communications

Le glossaire général au GT5 a été produit en s'appuyant majoritairement sur les définitions issues des normes. Ce glossaire est intégré dans le glossaire général de MINnD saison 2.

2. ACTEURS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE

2.1 Identification des acteurs

Un processus multi-acteurs	<p>La rétro-ingénierie (ou rétro-engineering) est par définition un processus multi-acteurs. Elle vise à fournir à un acteur intervenant sur une infrastructure (exploitant, mainteneur, maître d'œuvre), un état initial de l'infrastructure considérée à une temporalité donnée. Les informations nécessaires sont captées ou fournies par différents acteurs : exploitants, concessionnaires, géomètres, etc. Le traitement des informations collectées sera du ressort de plusieurs acteurs en fonction de l'avancement dans le processus.</p>
Exploitant	<p>L'exploitant est l'organisme qui fait usage d'un ouvrage au terme de la construction. Il faut considérer l'exploitant de l'infrastructure principale considérée. Les exploitants des infrastructures concomitantes sont également à prendre en compte.</p> <p>À titre d'exemple, si la rétro-ingénierie est réalisée sur un tronçon d'autoroute, les gestionnaires d'infrastructures concomitantes peuvent être les opérateurs de télécom (réseaux télécom), les collectivités locales (routes avoisinantes).</p> <p>La connaissance des infrastructures concomitantes est indispensable dans le cas où des travaux de maintenance ou de modification de l'infrastructure doivent être réalisés.</p>
MOA	<p>La maîtrise d'ouvrage (MOA), aussi dénommée maître d'ouvrage est la personne pour qui est réalisé le projet. Elle est l'entité porteuse d'un besoin, définissant l'objectif d'un projet, son calendrier et le budget consacré à ce projet. Le résultat attendu du projet est la réalisation d'un produit, appelé ouvrage.</p> <p>La maîtrise d'ouvrage initie et finance le projet et représente, à ce titre, les utilisateurs finaux à qui l'ouvrage est destiné.</p>
AMO	<p>L'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO ou AMOA) est un professionnel de l'acte de construire. Il a pour mission d'aider le maître d'ouvrage à définir, piloter et exploiter le projet. Il a un rôle de conseil et, ou d'assistance, et de proposition, le décideur restant le maître d'ouvrage. Il facilite la coordination de projet et permet au maître d'ouvrage de remplir pleinement ses obligations au titre de la gestion du projet en réalisant une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage.</p>
MOE	<p>Maîtrise d'œuvre ou maître d'œuvre (souvent abrégée MOE ou MCE ou Moe). Le MOE est la personne physique ou morale choisie par le maître d'ouvrage pour la conduite opérationnelle des travaux en matière de coûts, de délais et de choix techniques, le tout conformément à un contrat et à un cahier des charges.</p>
Géomètre	<p>Le géomètre-expert est le professionnel qui identifie, délimite, mesure, évalue la propriété immobilière publique ou privée, bâtie ou non, tant en surface qu'en sous-sol, ainsi que les travaux qu'on y exécute et qui organise son enregistrement et celui des droits réels attachés.</p>
Entreprise de détection des réseaux	<p>Acteur dont la mission est spécialement dédiée à la détection des réseaux existants.</p>
Constructeur	<p>Un constructeur est une entreprise ou un groupement d'entreprises qui réalise l'ouvrage.</p>

3. ÉLÉMENTS CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE

Maquette Numérique

Le sujet de la rétro-ingénierie est très vaste. Lorsqu'un système existant doit être rétro-interprété, plusieurs couches sont à considérer : L'environnement 3D, les informations, les relations entre les systèmes, les exigences initiales, etc. Ce périmètre étant trop vaste, nous nous sommes focalisés sur la maquette au sens instrument de l'architecture organique des éléments.

Une Maquette Numérique en rétro-engineering est l'ensemble des modèles 3D issus des informations d'entrée exploitées. Ces modèles 3D sont découpés en briques élémentaires (objets individuels par exemple).

La maquette numérique formalise l'interopérabilité et les liaisons existant entre les modèles et les briques. Elle permet, par exemple, un affichage d'informations utiles à la constitution d'un modèle calculatoire (modèle fonctionnel qu'une machine peut simuler) en s'appuyant sur les propriétés des objets (dimensions et masse par exemple). Pour ce faire, le processus BIM définira ce contexte d'usage.

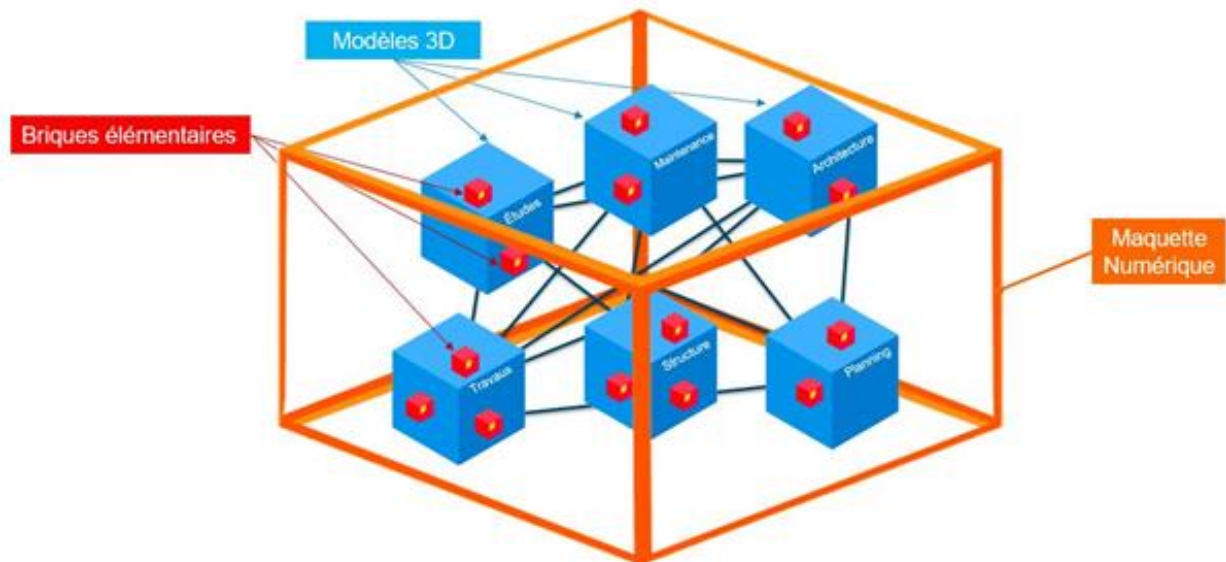


Fig 1. Schéma d'une maquette numérique composée de modèles 3D, eux-mêmes composés de briques élémentaires

Ingénierie des systèmes

(Rappel de la définition du glossaire général MINnD)

L'ingénierie des systèmes ou ingénierie système est une approche scientifique interdisciplinaire, dont le but est de formaliser et d'appréhender la conception et la validation de systèmes complexes.

L'ingénierie des systèmes a pour objectif de maîtriser et de contrôler la conception de systèmes dont la complexité ne permet pas le pilotage simple. Par système, on entend un ensemble d'éléments humains ou matériels en interdépendance les uns les autres et qui inter-opèrent à l'intérieur de frontières ouvertes ou non sur l'environnement.

Les efforts en ingénierie des systèmes embrassent l'ensemble du cycle de vie du système et leur mise en cohérence mobilise l'ensemble des corpus théoriques (sciences de l'ingénieur, sciences humaines, sciences cognitives, génie logiciel, etc.).

Modélisation

La modélisation est un processus ayant pour objectif d'établir le modèle d'un système complexe. Elle se base sur trois architectures : opérationnelles, fonctionnelles et organiques. Se référer au glossaire pour plus de détails.

Incertitude

Dans notre cas d'étude, elle peut consister en la modélisation 3D de certaines briques élémentaires, ou encore à définir les relations entre celles-ci, dans un système par exemple. Elle peut aussi définir les relations entre les informations d'entrée et les briques élémentaires.

L'incertitude est le flou, le manque de précision ou d'information que l'on va associer à un jeu d'informations ou au résultat d'une modélisation.

Cette indication permettra aux clients du processus de rétro-ingénierie d'évaluer la fiabilité et la justesse de la maquette issue de celui-ci.

Transformation

La transformation des informations consiste à convertir des données d'un format à un autre. En général, cette transformation se fait d'un format d'un système source vers le format requis par un système cible.

L'objectif est de convertir l'information dans un format exploitable pour le système client (logiciel par exemple).

Un processus de transformation des données (exposé dans le second livrable de notre groupe de travail) peut être exécuté automatiquement, manuellement, ou en associant ces deux modes. Pendant la transformation, les données peuvent passer par plusieurs étapes avant d'être converties au format souhaité.

On peut prendre pour exemple la transformation d'un jeu de d'informations contenues dans un fichier Excel qui sera transformé en un fichier texte au format CSV.

Attention toutefois, toutes les informations ne sont pas transformables. Dans le cas d'analyse de résistance des matériaux, une valeur de résistance de matériaux à une échelle donnée n'est pas transposable à une autre échelle de grandeur.

Les transformations peuvent aussi, au-delà du simple changement de format, appliquer des opérations mathématiques. C'est le cas lorsqu'un jeu d'informations produites dans un système de coordonnées doit être exploité dans un autre.

4. LA RÉTRO-INGÉNIERIE EN DÉTAIL

4.1 Définition de la rétro-ingénierie

Analyse d'un objet destinée à retrouver le processus de sa conception, de sa fabrication, ainsi que son fonctionnement

Dans nos projets d'infrastructure

Les objectifs de modélisation

Les objectifs de contextualisation

Rétro ingénierie et rétro modélisation

Selon Wikipedia, la rétro-ingénierie est « l'ensemble des opérations d'analyse d'un produit, d'un logiciel ou d'un matériel destiné à retrouver le processus de sa conception et de sa fabrication, ainsi que les modalités de son fonctionnement ». Elle consiste à fabriquer une copie virtuelle d'un objet alors qu'on ne peut en obtenir ni les plans, ni la méthode de fabrication. Cela revient à créer un objet ayant des fonctionnalités identiques à l'objet de départ.

La rétro-ingénierie est avant tout une modélisation tridimensionnelle ou calculatoire d'un environnement, d'un ouvrage existant. Cela permet de déterminer la position de l'ouvrage, sa géométrie, son état, et les contraintes qu'il subit ou qu'il impose à son environnement de travail. Le but étant de venir modifier ledit ouvrage, le restaurer, travailler à proximité, de s'y raccorder ou de l'exploiter.

- Modélisation des composants hors sol
- Modélisation des composants sous-sol (réseaux, géotechnique, structure de chaussée...)
- Date de construction, nature et date des travaux de rénovation et d'entretien,
- Les documents qui ont permis sa réalisation ou la modification (plans d'exécution, notes de calculs, plans de récolement, levés topographique),
- Les documents qui font état de l'existence de l'ouvrage (plans d'ouvrages connexes, voisins)
- Les mesures et hypothèses tirées des différents sondages effectués sur les zones non visitables de l'ouvrage ou les télédétections
- Ce qui légitimement demeure incertain et le risque accepté in extenso / à lever

À la manière d'un archéologue, le processus de rétro-ingénierie vise à identifier toutes les traces matérielles de la nature de la construction à étudier. Ce niveau de connaissance sera fonction de la donnée que l'on va trouver / collecter. De là en découlera un modèle d'ouvrage basé sur les connaissances de celui-ci à un instant T.

Notre groupe de travail propose de considérer la rétro-ingénierie comme un processus visant à modéliser un ouvrage à étudier ou modifier.

Nous proposons de considérer la rétro-modélisation comme une composante nécessaire de la rétro-ingénierie. Cette composante se limite à la modélisation des ouvrages à des fins d'utilisation basique des ouvrages, modélisations destinées par exemple à la contextualisation. Dans ce cas précis, seule l'enveloppe de l'objet est considérée et les informations intrinsèques de l'objet sont inexistantes.

4.2 Imbrication dans un projet

Faciliter et fiabiliser l'information

Partir des documents existants tout en les reformulant aux

L'apport de la 3D va faciliter (sans forcément améliorer) l'exploitation d'informations 2D ou raster (2D ou 3D) par les acteurs d'un projet. L'ajout de métadonnées va faciliter la compréhension de l'ouvrage et permettre d'informer sur le niveau de confiance du modèle de l'ouvrage considéré.

Pour tous les projets, la rétro-engineering s'est toujours appuyée sur des documents variés produits par différents organismes pour appréhender le projet concerné. La plupart des documents produits et transmis se font sous format 2D (ils sont réalisés manuellement puis informatisés depuis quelques dizaines d'années).

exigences de la nouvelle demande

La difficulté pour la personne qui collecte ces différents documents va être de les interpréter et de les remettre dans son contexte environnemental par rapport à son projet. Par exemple, les coupes transmises par un concessionnaire ne seront jamais alignées aux coupes que souhaite l'ingénieur ou le projeteur pour contextualiser son plan. Ce dernier va alors devoir faire un travail d'interprétation et d'interpolation. Le travail est d'autant plus fastidieux lorsque les géométries des ouvrages existants sont complexes.

Faire appel aux nouvelles technologies de relevés automatiques

Depuis quelques années, la rétro-ingénierie est devenue de plus en plus accessible. Ceci s'explique par l'arrivée sur le marché de nouveaux types de capteurs (LIDAR). Ceux-ci sont utilisés de façon quasi systématique lors de la phase étude. Les exploitants de grandes infrastructures se sont également initiés aux campagnes d'acquisition du patrimoine existant.

Ces informations d'entrée jouent un rôle capital dans la rétro-ingénierie qui va de fait se développer pour permettre aux acteurs d'exploiter ces informations non qualifiées.

4.3 Les informations d'entrée

Des éléments d'information bruts descriptifs de l'ouvrage

Les informations d'entrée sont des éléments des éléments d'information bruts descriptifs de l'ouvrage existant dans toutes ses dimensions qui sont transformés ou utilisés dans la production d'informations de sortie. Elles présentent des caractéristiques qui vont déterminer la ou les méthode(s) d'acquisition(s) à mettre en œuvre.

Des formats variés et à adapter aux processus

Les formats de ces informations d'entrée sont variables et devront être transformés et/ou adaptés pour répondre aux besoins des processus mis en place dans la chaîne de production des livrables

Des données décrivant la nature des objets et de leur environnement utile à la conception

En conception, les données d'entrée sont des données qui décrivent l'environnement et la nature de(s) l'objet(s) à modéliser.

Ces données peuvent être de plusieurs natures :

- Topographiques,
- Géotechniques,
- Inspections détaillées périodiques,
- Provenant du DOE,
- Carnet de chantier,
- Notes de calculs,
- Base de données patrimoniales,
- etc.

Méthodes d'acquisition

Les outils et méthodes d'acquisition de données d'entrée sont très nombreux et variables en fonction de la nature du projet et de(s) objet(s) à modéliser. Nous pouvons néanmoins en lister quelques-uns associés au dimensionnement et à la localisation des objets :

- Scanner laser ou LIDAR fixe ou mobile et modélisation
- Capture de données 2D et traitement photogrammétrique 3D à l'aide de drones, ULM, satellites...)
- Acquisition de données topographiques en X, Y et Z, par relevé optique ou GPS (modélisation)
- IoT (inclinomètre, extensomètre, ...) et transformation de données, ...

Préciser l'expression des besoins de l'opération de rétro-ingénierie

- Géo détection d'éléments souterrains (réseaux) par radar géophysique ou par radio-détection, couplée à une acquisition de données topographiques pour contextualiser.

L'expression des besoins d'acquisition est généralement consignée dans un cahier des charges. Celui-ci contient les informations nécessaires et suffisantes qui permettent de préparer l'acquisition des données sur le terrain. Le livrable 2 du GT5 propose une démarche d'expression du besoin

Penser à compléter par des fouilles et levés spécifiques

Complète les investigations menées en phase conception via des fouilles et levés complémentaires, DICT...

Veiller à collecter les logs des activités et interventions

Les informations d'exploitation sont toutes les informations relatives aux événements associés à l'ouvrage considéré. Nous pouvons ainsi lister de façon non exhaustive :

- Accidentologie,
- Interventions de maintenance,
- Trafic,
- Informations d'inspection.

Planifier soigneusement les processus avant leur lancement

Les processus à mettre en œuvre pour obtenir les données d'entrée doivent permettre de préparer la bonne exécution de l'acquisition des données *in situ*. Il est fondamental de disposer de l'ensemble des données géographiques, physiques, environnementales, etc. pour mettre en œuvre le processus d'acquisition.

Structurer et renseigner un livrable des opérations de levé

Les livrables sont constitués de l'ensemble des informations brutes ou post-traitées issues des acquisitions ou du recueil d'informations déjà existantes. Les informations sont alors référencées et catégorisées. Elles permettront d'alimenter le processus de rétro-ingénierie conformément aux besoins exprimés.

4.4 Dans le bâtiment

Une longueur d'avance acquise à avoir travaillé à partir de plans 2D

Comme souvent, les outils utilisés pour le BIM bâtiment sont en avance sur les outils de l'infrastructure. La rétro-ingénierie des bâtiments s'est appuyée à ses débuts sur la conversion de plan 2D en plans BIM. Aujourd'hui, celle-ci est complétée ou remplacée par une modélisation à partir de nuages de points.

la transformation 2D -> 3D est très consommatrice et souvent externalisée

Naturellement, la rétro-ingénierie des bâtiments s'est appuyée sur les plans des DOE. De nombreuses sociétés proposent aujourd'hui une création de modèles BIM à partir de ces plans. La plupart de ces sociétés délocalisent généralement la production des modèles BIM en dehors de l'hexagone. Le processus de rétro-ingénierie réalisé de la sorte est en effet très consommateur de temps de BIM modelleur.

Disponibilité de routines automatisées

En 2017, avec la création de la société WiseBIM¹, la rétro-ingénierie à la française est entrée dans l'ère du tout numérique avec l'arrivée sur le marché d'outils de transformation automatisée des plans en modèles BIM².

¹ Wisebim, *L'éditeur de logiciels qui met l'Intelligence Artificielle au service de la modélisation en BIM*, <https://wisebim.fr/home>, consulté le 22 juillet 2022.

² Julie Nicolas, « WiseBIM convertit les plans en maquette numérique », *Le Moniteur*, 14 janvier 2020.

Scan To BIM

Une partie de notre Livrable n°3 traite l'obsolescence des données. Cette obsolescence est également valable pour le bâtiment. La rétro-ingénierie basée sur les seuls plans, si ceux-ci sont disponibles, n'est pas suffisante.

Avec l'arrivée massive des scanners 3D statiques ou mobiles, style « Backpack », le coût d'acquisition des informations du site a été fortement réduit. L'évolution des outils de traitement de nuages de points a également permis l'arrivée de la rétro-ingénierie du bâtiment à partir de nuages de points.

La rétro-ingénierie se basant sur des scans 3D reste aujourd'hui majoritairement un processus manuel. L'émergence de nouveaux acteurs traitant automatiquement les nuages de points devrait faire évoluer cela assez rapidement.

4.5 Dans les infrastructures

Des outils supportant la rétro-ingénierie existent déjà dans le monde SIG

Lorsque l'on parle d'un territoire, et que l'on cherche à modéliser celui-ci dans un environnement 3D, plusieurs outils sont déjà à la disposition des acteurs.

Ces outils s'appuient généralement sur des informations SIG libres pour reconstruire un environnement.

Les outils Infracore de l'éditeur Autodesk, LandSIM3D de l'éditeur Bionatics ou encore So.Build de l'éditeur qui porte le même nom permettent la constitution d'un socle 3D du territoire. Ils s'appuient sur des sources de données libres comme la BD Alti de l'IGN ou encore OpenStreetMap.

Mais les usages sont limités et incompatibles avec les IFC

L'utilisation de ces outils reste limitée à quelques usages comme la contextualisation (création de volumes de bâtiments) ou la constitution d'un modèle numérique de terrain. Le niveau de détail de la modélisation de ces éléments reste limité à la qualité des informations utilisées par les éditeurs pour leur génération. Le contrôle de l'exactitude de ces informations est également un frein.

Enfin, ces outils n'offrent pas à notre connaissance une transcription directe des résultats de la rétro-ingénierie dans un format IFC. L'usage des modèles reste donc à l'intérieur de la suite logicielle de l'éditeur.

Les techniques des nuages de points se répandent et sont de plus en plus ouvertes à l'automatisation

Comme dans le bâtiment, l'usage quasi systématique de l'acquisition de la géométrie des sites à l'aide de systèmes LIDAR mobiles ouvre de nouvelles possibilités. La rétro-ingénierie des infrastructures, pour la partie visible, exploite les données des nuages de points. Ce traitement aujourd'hui est presque exclusivement réalisé manuellement.

Comme dans le bâtiment, de nouveaux acteurs, comme The Cross Product³, proposent des outils automatisés de rétro-ingénierie des infrastructures.

Projet IGN LIDAR HD propose un levé complet du territoire

Le projet LIDAR HD de l'IGN⁴ a pour objectif de mettre à disposition gratuitement un relevé LIDAR complet du territoire français. Ce relevé aura une précision de 10 pts/m², précision largement suffisante dans de nombreux usages.

Cette information d'entrée dans les processus de rétro-ingénierie permettra sans nul doute l'émergence de nouveaux services de nouvelles informations exploitables.

Le parachèvement du projet est aujourd'hui prévu pour 2025.

³ The Cross Product (TCP), *The Cross Product - Développement de logiciels*, <https://www.linkedin.com/company/thecrossproduct>, consulté le 22 juillet 2022.

⁴ Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *LIDAR HD - Une cartographie 3D du sol et du sursol de la France*, <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>, consulté le 22 juillet 2022.

**Du drone aussi dans les
canalisations**

La miniaturisation et la robotisation nous ouvrent de nouveaux points de vue. En effet, plusieurs sociétés développent des drones autonomes et semi-autonomes pour les inspections de canalisations. Ils ouvrent la porte à la création de nuages de points de certains réseaux souterrains.

5. ÉTAPES CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE

Processus par étapes

Les principales étapes du processus sont répertoriées ci-dessous. Les deux premières étapes sont consignées dans le livrable 2. Les étapes 3 et 4 sont décrites dans le livrable 3. Le livrable 4 est entièrement consacré aux aspects modélisation et transfert du modèle.



Fig 2. Étapes du processus de rétro-ingénierie

Un enchaînement logique à suivre absolument

Un processus de rétro-ingénierie correspondra aux attentes seulement si tout le processus est appliqué dans l'ordre tel que proposé par notre groupe de travail.

Nous vous recommandons donc de vous y conformer.

Définition des besoins

Cette phase vise à identifier les besoins exprimés par les différentes parties du projet. L'objectif global est toujours de réaliser un « juste modèle ».

Cette étape est détaillée dans le second livrable.

Formalisation des besoins

Une fois les besoins identifiés, la formalisation consiste à réaliser un cahier des charges spécifiant ces besoins à destination des acteurs qui vont acquérir de l'information sur site et exploiter les informations afin de constituer le modèle final.

Cette étape est également détaillée dans le second livrable.

Inventaire et analyse des informations

Avant de réaliser la construction du modèle, une étape d'inventaire, de vérification de la couverture et de la véracité des informations est indispensable. Elle assurera la confiance que les utilisateurs pourront avoir dans le modèle final.

Ces étapes sont décrites dans notre troisième livrable.

Compléter les données

La réalisation d'un complément d'information est souvent nécessaire. Il arrive en effet que la couverture des informations à disposition ne couvre pas le territoire étudié. Les informations disponibles peuvent aussi ne pas permettre une réponse satisfaisante aux besoins exprimés.

Cette étape est décrite dans notre troisième livrable.

Modélisation

Lorsque les besoins sont identifiés, exprimés contractuellement et que les informations disponibles permettent d'atteindre les objectifs, le processus de modélisation peut être mené à bien. Les informations seront alors retranscrites dans un modèle BIM.

Cette étape est décrite dans notre troisième livrable.

Exploitation du modèle

Le travail de notre GT s'arrête à la passation du modèle issu du processus de rétro-ingénierie. Les usagers du modèle en prennent alors possession et l'exploitent en fonction des usages initialement définis.

6. ACQUISITION DES INFORMATIONS DU SITE

Acquisition des données numériques

Les méthodes d'acquisition précisées en Saison 1

Le livrable Saison 1 ne traite que des informations visibles

Restriction du périmètre de notre groupe de travail aux chaussées

L'acquisition de données est le processus qui permet de mesurer ou d'échantillonner les conditions physiques du monde réel. Elle est réalisée en utilisant un système qui convertit des signaux analogiques en valeurs numériques. Ces données numériques peuvent ensuite être manipulées via des algorithmes visant à rendre l'information compréhensible.

Le document MINnD_TH01_UC00_03_Relevés_numeriques_026_2019⁵ issu de la saison 1 de MINnD apporte une vision éclairée sur les méthodes d'acquisition, les rendements et limites de celles-ci.

Le livrable très complet sur les outils et méthodes de mesure du visible n'aborde pas les acquisitions du non visible. L'inspection des structures et du « non visible » peut être réalisée à partir des méthodes et outils présentés ci-après. Cette liste est non exhaustive.

L'acquisition de données sur une infrastructure existante peut adresser de nombreux types d'ouvrage, de nombreuses méthodes, etc.

Nous avons donc choisi de présenter seulement un exemple d'application dans un domaine pertinent, donc des experts sont présents dans le groupe de travail et d'intérêt général pour la collectivité. Le maintien en l'état de nos infrastructures routières de transport est en effet un enjeu des prochaines décennies.

6.1 Cahier des charges

Spécifier le besoin est indispensable

À chaque objectif son outil

Ne pas oublier les contraintes environnementales et temporelles

Ni celles liées aux contraintes d'exploitation et coactivités

La bonne collecte des informations du terrain débute par la bonne définition du besoin. Le livrable 2 du GT5 traite en détail cet aspect.

Les besoins du processus de rétro-ingénierie vont conduire les acteurs de l'acquisition du site à s'orienter vers un ou des outils / une technologie spécifique. L'étendue du territoire à considérer ainsi que la précision des mesures attendue sont des éléments déterminants. Ils doivent donc faire l'objet d'une attention particulière dans leur définition.

Les missions d'acquisition du site doivent également être pensées dans le temps. Dans l'utilisation de la photogrammétrie par exemple, la saison du relevé aura un éventuel impact sur l'utilisabilité des informations collectées (couverte de végétation).

Dans certains cas, les ouvrages faisant l'objet de la rétro-ingénierie sont sous exploitation. Il n'est donc pas toujours possible d'y accéder. Des contraintes supplémentaires sont généralement à considérer (balisage patrouilleur, réduction des conditions d'exploitation, etc.). L'identification de tous les besoins en amont est donc primordiale. Cela garantira une bonne couverture d'informations et réduira les coûts liés à des investigations complémentaires.

6.2 Acquisition des données visibles des chaussées

Collecter des éléments de performance et de l'état de vieillissement des chaussées

L'inspection des chaussées ne se limite pas à l'acquisition de leur géométrie 3D. Des outils et des mesures caractérisant le vieillissement ont été développés au fur et à mesure des avancées technologiques.

⁵ Omar Djoudi, Nolwenn Lancien et Guillaume Tignon, « 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, mai 2019.

Outils de mesures de la route

Dans le cas de la rétro-ingénierie de la route, si celle-ci a un objectif calculatoire, il est indispensable de capter des informations complémentaires aux informations de la géométrie. Les mesures sont détaillées dans notre second livrable.

Nous reprenons ici une liste non exhaustive des mesures possibles à disposition :

- Relevé visuel des dégradations de surface selon mode opératoire LPC n°38-2⁶,
- Relevé des structures en place (nature et état des matériaux) par carottages selon mode opératoire LPC n° 43⁷,
- Mesure de la déformabilité de surface (déflexion) des chaussées (mesures ponctuelles manuelles à la poutre Benkelman, mesures ponctuelles automatisées au déflectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer en anglais), mesures en continu au déflectographe Lacroix),
- Mesures de l'adhérence des chaussées (coefficient de frottement longitudinal, coefficient de frottement transversal, macrotexture),
- Mesure de l'uni longitudinal des chaussées (remorque d'analyse de profil en long (APL) ou appareil sans contact UNIBOX)⁸,
- Mesure de l'uni transversal des chaussées au Transversoprofilomètre à Ultrasons (TUS) (relevé des dégradations par orniérage)⁹,
- Mesures de fissures en surface des chaussées avec le système AIGLE 3D avec capteur laser du CEREMA¹⁰.

6.3 Méthodes d'acquisition des structures enterrées

Acquisitions non destructives et destructives

L'acquisition d'information sur site peut se faire *in situ*, sans dégradation de l'existant, on parle alors de non-destructif. Le relevé par radar en fait partie. À l'opposé, les acquisitions destructives dégraderont tout ou une partie de l'existant. Un carottage est une acquisition destructive.

Informations du sous-sol

Les groupes de travail MINnD Saison 1 UC8-GT et MINnD Saison 2 GT1-5 IFC Geotechnics abordent les informations utiles à la reconnaissance, l'analyse et la modélisation du sol. Il est recommandé au lecteur de se référer aux livrables de ces groupes de travail^{11,12}.

Nous ne traiterons donc pas ces objets ici.

⁶ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, « Relevé des dégradations de surface des chaussées », *Méthode d'essai LPC N° 38-2*, 1997.

⁷ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, « Exécution et exploitation des carottages de chaussées », *Méthode d'essai LPC N° 43*, 1996.

⁸ Vectra France, « APL - Mesure en continu de l'uni longitudinal », *Auscultation des chaussées - Matériel mlpc*, 2014.

⁹ mlpc, « TUS : Transversoprofilomètre à ultrasons », *Mesures sur ouvrages - Chaussées*.

¹⁰ CEREMA, « L'innovation AIGLE 3D : un outil au service d'une gestion patrimoniale intégrée », *Fiche de présentation*, 2019.

¹¹ Mickaël Beaufils, Isabelle Halfon, Pierre Garnier, Jean Cochard, Pierre Miraillet, Norane Hassane, Gilles Chapron, Alexis Serieys, Clément Galandrin et Sylvie Bretelle, « Standardisation des données géotechniques pour la conception d'infrastructures souterraines », *Livrable du PN MINnD Saison 2 - GT1.5 - Géotechnique*, décembre 2021.

¹² Mickaël Beaufils, Yves Barthélémy, Thierry Baudin, Maxime Beaudouin, Emilie Bernard, Robin Canac, Juan Castro-Moreno, Gilles Chapron, Vincent Cousin, Nicolas Delrieu, Sunseare Gabalda, Sylvain Grellet, Nolwenn Lancien, Bastien Le Hello et Jean-Marie Léonard, « Proposition de standard OpenBIM pour les données géotechniques », *MINnD_UC08_01_Standardisation_donnees_geotechniques_027A_2019 - Livrable du PN MINnD Saison 1 - IFC Infrastructures souterraines (UC8)*, août 2019.

Informations des structures de chaussées

Le groupe de travail MINnD Saison 1 UC2 Cycle de vie des chaussées recense dans son livrable¹³ les différentes informations généralement disponibles sur les chaussées. Les annexes A à F de ce document, sont notamment à considérer. Les référentiels normatifs pour la description des mesures sont également listés dans ce livrable, dans la section Références.

¹³ Ziad Hajar, Christophe Castaing, Fabrice Breton, Patrice Afonso, Michel Poinignon, François Tribouillois, Philippe Lepert, Simon Platelle, Gaëlle Le Bars, Eric Layerle, Olivier Dupouy, Clara Arnould et Maxime Casse, « Modélisation des informations des chaussées sur le cycle de vie », *MINnD_TH03_UC02_01_Modelisation_informations_chaussees_cycle_vie_008_2015 - PN MINnD Saison 1 - Thème 3 : Structuration des données - UC2 : Cycle de vie des chaussées*, décembre 2015.

7. LES TRANSFORMATIONS

7.1 Géoréférencement

Travailler dans un territoire

Les projets d'infrastructure sont par nature ancrés dans un territoire. Cela implique de travailler dans un système de coordonnées identifié et connu de tous.

Système de projection

Le géoréférencement s'appuie sur un système de projection. Ce système va permettre de passer d'un repère Latitude-Longitude (coordonnées géographiques λ et φ), coordonnées lues sur le globe terrestre (coordonnées géographiques dans un repère sphérique), en un système cartésien planaire E et N.

Les modèles BIM et les plans étant produits dans des systèmes cartésiens, il faut impérativement s'assurer que sur un projet donné, le système de projection utilisé est clairement défini au plus tôt.

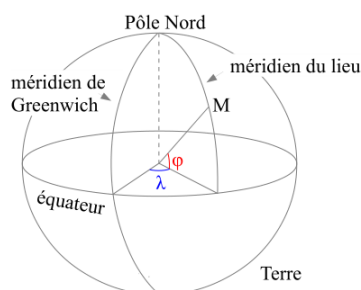


Fig 3. Coordonnées cartographiques (source : www.geogebra.org)



Fig 4. Exemple de système de projection (source : IGN, Les représentations planes de l'ellipsoïde)

Aller plus loin

Si vous souhaitez en savoir plus sur les systèmes de projections et plus globalement sur le repérage dans l'espace, nous vous conseillons les documents suivants :

- Le système RGF et la projection Lambert 93 ¹⁴
- Repères de référence géodésiques en France. Conversions et transformations de coordonnées ¹⁵
- Les représentations planes de l'ellipsoïde ¹⁶
- Projection cartographique ¹⁷

Ces documents sont issus du site de l'IGN consacré à la géodésie ¹⁸.

¹⁴ Institut Géographique National (IGN), « Le système RGF et la projection Lambert 93 », *IGN-DirCom 08/2008*, 2008.

¹⁵ Institut Géographique National (IGN) / Service de Géodésie et de Métrologie (SGM), « Repères de référence géodésiques en France métropolitaine », *Documentation, version 9*, 2022.

¹⁶ Institut Géographique National (IGN), « Les représentations planes de l'ellipsoïde », *op. cit.*

¹⁷ Institut Géographique National (IGN), « Projection cartographique », 2018.

¹⁸ Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *La géodésie*, <https://geodesie.ign.fr/>, consulté le 23 juillet 2022.

Géo-référencer un modèle BIM

Dès lors, il est indispensable de fournir en même temps que les modèles BIM le système dans lequel il a été numériquement construit.

BuildingSMART France en collaboration avec de nombreux acteurs, donc MINnD, a édité un guide « Géo-référencement de projets BIM »¹⁹.

Ce guide rappelle les bases des systèmes de référence terrestres. Les bonnes pratiques du géo-référencement des modèles BIM, ainsi que les méthodes de paramétrage dans certains logiciels du marché y sont également présentées.

7.2 Transformation de coordonnées

Multiplicité des systèmes de géo-référencement

Dans le cadre de projets de rétro-ingénierie, il est très fréquent de collecter des informations historiques. Ces informations sont la plupart du temps fournies dans un référentiel différent du référentiel choisi pour le projet. Il arrive aussi fréquemment que plusieurs fournisseurs d'informations les fournissent dans des systèmes de projections différents.

Il est donc nécessaire d'homogénéiser toutes ces coordonnées dans le même référentiel pour pouvoir les exploiter. On parle alors de transformation ou changement de système.

Ne pas jouer aux apprentis sorciers !

Le changement de système de projection doit être réalisé à l'aide d'outils spécialisés. Une « simple » transformation de type translater, puis pivoter n'est pas satisfaisante.

Changer de système de coordonnées

Pour changer de système de coordonnées, il faut utiliser un modèle de transformation.



Fig 5. Représentation d'une transformation permettant le passage d'un plan exposé dans un système de coordonnées A vers un système B.

Le plus utilisé est la similitude 3D car elle présente l'avantage de pouvoir être utilisée dans les deux sens : les mêmes paramètres servent à transformer des coordonnées du système A vers le système B et réciproquement, moyennant une simple inversion de signe.

Géo-référencement étape indispensable pour travailler dans un territoire

Le géo-référencement est l'attribution d'un système de coordonnées à un objet (un objet ponctuel ou un plan par exemple). Le géo-référencement permet donc de positionner n'importe quel objet par rapport à un autre, lui-même géo-référencé. La prise de mesure doit se faire dans un système de projection donné. Il n'est en effet pas possible mesurer directement une distance entre deux points géo-référencés dans des systèmes différents.

Les transformations d'un système de coordonnées apportent des modifications de dimension de la représentation des objets (altérations des longueurs, des angles ou des aires).

¹⁹ buildingSMART France - Mediaconstruct, « Géo-référencement de projets BIM - Éléments méthodologiques : notions de base, cas d'usage et outils », *Guide*, avril 2020.

Altération linéaire, un point de vigilance important dans le domaine des infrastructures

Aucune représentation ne peut conserver toutes les longueurs sur tout le domaine représenté : la sphère (ou l'ellipsoïde) ne pouvant se "mettre à plat" sans déformations, chaque longueur subit une altération qui dépend de sa position sur la sphère²⁰.
On appelle altération des longueurs (altération linéaire) la variation relative des longueurs (distance à l'ellipsoïde et distance dans le système de projection choisi).

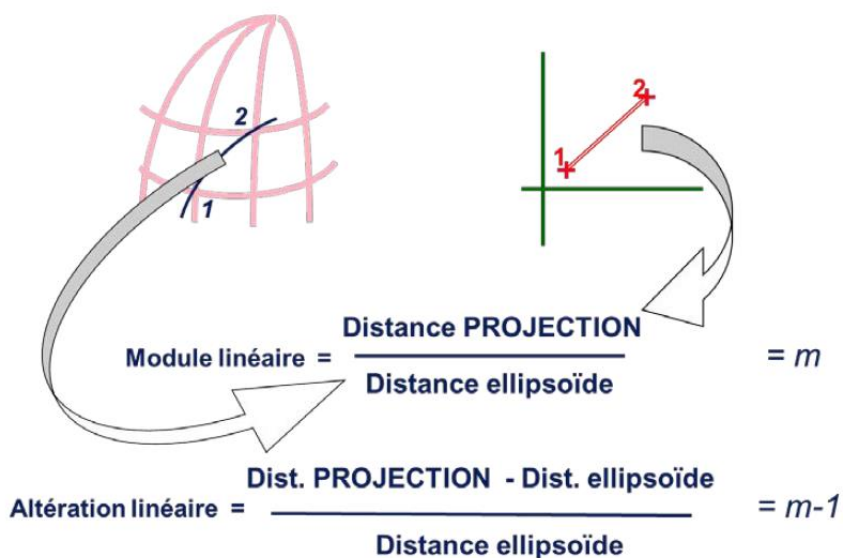


Fig 6. Schéma explicitant l'altération linéaire²¹

L'altération linéaire, généralement exprimée en $m.km^{-1}$ doit être utilisée pour convertir les mesures de distance réalisées sur le terrain en distances dans le système de projection choisi, et inversement.

Il n'est pas rare de travailler avec une altération linéaire de l'ordre d' $1m.km^{-1}$, rapporté à la dimension d'un ouvrage de 300m, l'écart entre la mesure dans le système de projection (plan) et la mesure terrain est alors de 30cm.

En Lambert, pas d'altération angulaire

Les systèmes de projection conforme n'introduisent pas d'altération angulaires (comme le système national français Lambert).

Attention, d'autres systèmes de projections peuvent en introduire.

7.3 Formatage d'informations

Le format des informations est à préciser selon les logiciels utilisés

Les données d'entrée ou informations d'entrée peuvent se présenter sous une forme qui ne permet pas leur exploitation directe dans un logiciel de modélisation. Elles peuvent être lues avec un éditeur de texte, mais ne pas être formatées d'une manière qui soit reconnue par le logiciel de modélisation. Elles sont également parfois formatées dans un format « propriétaire », non exploitable avec un éditeur de texte. Il conviendra alors de les transformer dans un format plus interopérable.

²⁰ Institut Géographique National (IGN), « Les représentations planes de l'ellipsoïde », *op. cit.*

²¹ *Ibid.*

Convertisseur de données ou logiciels ETL pour transformer d'un format en un autre

Préalablement exporter données dans un format propriétaire pour pouvoir les exploiter

Contrôle indispensable

Dans le premier cas, l'utilisation d'un convertisseur de données du marché ou implémenté via un script sera la solution à retenir préférentiellement.

Dans le second cas, il sera préférable d'employer un logiciel autorisant le chargement, puis le traitement et enfin l'enregistrement des informations contenues dans les fichiers source. On parle alors de logiciel de type ETL (Extract Transform Load) qui permet de reformater des informations sous une forme exploitable dans le processus d'exploitation des informations.

Plus d'information dans la référence ²².

Dans le cas où l'information est stockée dans un format propriétaire, il conviendra soit :

- De l'exporter depuis le logiciel source vers un format plus ouvert (IFC si pertinent),
- De rechercher et d'utiliser des bibliothèques tierces qui soient en mesure de lire et de convertir les informations,
- Voire d'abandonner l'exploitation de cette information.

Il est donc important dès le début du processus de s'assurer que la fourniture des informations se fera dans un format exploitable. Cela est un gage de gain de temps et de réduction des coûts. La préconisation de formats « open » est aussi une assurance de la pérennité de l'accès à l'information.

Il convient de contrôler que les transformations ne dégradent pas l'information initiale : perte d'informations géométriques, attributaires, etc.

²² Veremes, « Échange et traitement de données géographiques : à quoi sert un ETL spatial ? », *Livre blanc ETL spatial*, 2014.

8. PRINCIPAUX USAGES DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE

8.1 Conception et réalisation

<p>Mieux comprendre l'intégration de l'ouvrage dans son environnement</p>	<p>Durant les phases de conception et de réalisation, la maquette numérique de la rétro-engineering permet avant tout de contextualiser le projet, que ce soit la topographie du site, les infrastructures existantes, les bâtiments, l'aménagement du territoire en surface, en sursol ou en sous-sol.</p>
<p>Focaliser sur les éléments d'intégration dans l'environnement</p>	<p>Dans cet usage, il faut donc développer les éléments qui permettent de prendre connaissance de l'environnement dans lequel s'inscrit le projet.</p> <p>Les gains escomptés sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mieux appréhender les études • Aider au choix des solutions techniques • Confronter le projet au contexte (gestion des interfaces).
<p>La non prise en compte d'un ouvrage existant (le plus souvent enterré) est le risque principal à éviter</p>	<p>En phase conception ou réalisation, le risque majeur est la non-prise en compte ou la mauvaise prise en compte d'un ouvrage existant. Elle peut être consécutive à :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un oubli d'intégration (mauvais contrôle des informations d'entrée) • Un mauvais positionnement (mauvais référencement, précision de la modélisation non adéquate), • Une non prise en compte de l'incertitude de positionnement (un réseau de classe C représenté par un simple trait par exemple). <p>Une bonne application des processus décrits dans nos livrables permet de limiter ce risque.</p>
<p>L'usage dans un but de simulation nécessite des données surtout présentes dans les documents</p>	<p>Lorsque le modèle issu du processus de rétro-ingénierie a pour but d'alimenter des modèles de calcul, des informations spécifiques sont à considérer.</p> <p>Dans le cas d'un calcul de structure, il est intéressant d'avoir à disposition les hypothèses prises lors du dimensionnement initial (matériaux, déformation, efforts...). La maquette de rétro-engineering sert alors de réceptacle qui centralise l'ensemble des informations géométriques et calculatoires (souvent fournies de façon disparate).</p>
<p>Fiabiliser l'information</p>	<p>L'enjeu pour toute personne amenée à produire une maquette de rétro-engineering est aujourd'hui de réussir à fiabiliser l'information (position, géométrie, structure).</p> <p>Contrairement à une maquette projet qui est construite au fur et à mesure de l'avancée des études, la maquette rétro-engineering est une synthèse des informations collectées.</p> <p>L'élément sans doute le plus important pour l'utilisateur d'une telle maquette est d'avoir confiance dans l'information que contient celle-ci. Ce niveau de confiance sera déterminé en fonction des informations collectées (plans, notes...), de leur qualité, précision et densité.</p>
<p>Limites actuelles de l'exercice</p>	<p>Pouvoir retranscrire et centraliser sur la maquette numérique d'ouvrage l'ensemble des hypothèses métiers (par exemple les déformations et efforts subis ou infligés à l'ouvrage) est un réel atout pour ce type de modélisation.</p> <p>Toutefois, ces informations se retrouvent souvent isolées dans des outils métiers très spécifiques ou retranscrites sur des supports divers. Cette non-centralisation de l'information couplée à un manque d'interopérabilité avec les outils BIM et les plateformes collaboratives rend l'exercice très complexe à mettre en œuvre.</p>

8.2 Exploitation

Connaissance ciblée du patrimoine

En phase exploitation, l'enjeu principal est la connaissance complète du patrimoine existant en considération d'un usage déterminé. La maquette numérique devient alors un support pour suivre le vieillissement du patrimoine, piloter l'entretien et anticiper la maintenance.

Prix du ticket d'entrée élevé

La maquette numérique pour l'exploitation et la maintenance est quasiment inexistante chez les exploitants et mainteneurs des infrastructures.

Dans le cas des exploitants et/ou les collectivités dont les ouvrages sont antérieurs à l'arrivée du BIM, la digitalisation de l'ensemble de leur patrimoine nécessite un engagement financier considérable. Il est en effet nécessaire de collecter l'ensemble des documents présents sous différents formats, y compris format papier qu'il convient alors de numériser au moins partiellement pour certains d'entre eux. Il peut aussi s'avérer nécessaire de lancer des campagnes d'acquisition complémentaires. Le coût de la mise en place de telles prestations est souvent un frein au déploiement de ces nouvelles méthodes.

Peu d'appétence

Les exploitants utilisent plusieurs outils de planification et de suivi des interventions. Ceux-ci peuvent être des outils du commerce comme dans le cas de la GMAO ou des outils internes. Les outils internes sont très fréquemment basés sur des tableaux Excel partagés entre les différents services.

L'hétérogénéité ainsi que le nombre important d'outils utilisés est un frein au déploiement de la rétro-ingénierie car :

- elle est vue comme une couche supplémentaire,
- les outils en place sont « suffisants »,
- l'intérêt n'est pas compris.

9. PRÉCISIONS GÉOMÉTRIQUES

Adapter la précision recherchée aux enjeux et usages

Dans un processus de rétro-ingénierie, il est fréquent de devoir modéliser un objet en ne disposant que d'informations partielles sur celui-ci.

Par ailleurs, même si l'information recueillie est conforme aux exigences exprimées, elle peut avoir une incertitude qu'il conviendra de qualifier et d'exposer dans le modèle final.

Mauvaises pratiques

Lorsqu'un objet est modélisé en 3D le faux bon réflexe de nombre d'utilisateurs des modèles BIM est de considérer qu'une représentation 3D d'un objet est forcément exacte.

Pour un ouvrage

Pour un ouvrage ou une partie donnée, la qualité de la géométrie est influencée par :

- le positionnement de l'ouvrage,
- la modélisation de la géométrie de l'ouvrage.

Bien positionner le curseur

Ainsi dans bien des cas, il ne sera pas nécessaire de modéliser parfaitement la totalité de l'ouvrage. Il faut avant tout répondre au besoin initial et être capable de juger l'effort à fournir sur chacun de ces deux paramètres (position/géométrie).

Il est donc concevable d'utiliser certaines approximations pour modéliser des parties d'objet.

Vouloir un détail géométrique absolu est généralement inutile.

Pistes d'amélioration

La possibilité de réaliser des mesures *in situ* réduit considérablement à la fois la tolérance de positionnement de l'ouvrage et la tolérance géométrique.

9.1 Incertitude

Évaluer la fiabilité des données d'entrée ?

Les données collectées afin de démarrer cette phase de rétro-engineering peuvent présenter des incertitudes de différentes natures liées :

- aux mesures,
- aux interpolations,
- à la complétude,
- au positionnement.

Se référer aux travaux du GT2-2

La thématique des incertitudes et des tolérances est traitée dans les travaux du GT2-2 « Gestion des incertitudes et des tolérances » de la saison 2 de MINnD. Il est donc recommandé au lecteur de se référer à ces livrables pour approfondir le sujet.

Les sujets développés ci-après ne sont qu'une contextualisation de la problématique dans le cadre de la rétro-ingénierie.

Mesures

Nous pouvons d'abord trouver des incertitudes liées aux mesures qui ont été effectuées.

L'incertitude de mesure est, sommairement « la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées ». Dans le domaine scientifique, mesurer une grandeur ne consiste pas simplement à rechercher la valeur de cette

Exactitude, précision et tolérances

grandeur mais aussi à lui associer une incertitude. Il est alors possible de qualifier la qualité de la mesure^{23,24,25}.

Les facteurs à l'origine de l'incertitude de mesure sont multiples : l'étalon, l'instrument, l'élément à mesurer, l'opérateur en charge de la mesure, la méthode employée, les conditions de la mesure et les grandeurs d'influence.

Selon la nature de l'ouvrage à modéliser, il est utile de connaître l'incertitude liée aux relevés en notre possession.

La précision d'une mesure n'est pas le seul critère à prendre en considération. Les notions de répétabilité et de tolérance sont également à considérer.

Les illustrations extraites du blog Formlabs.com²⁶ explicitent visuellement ces différences.

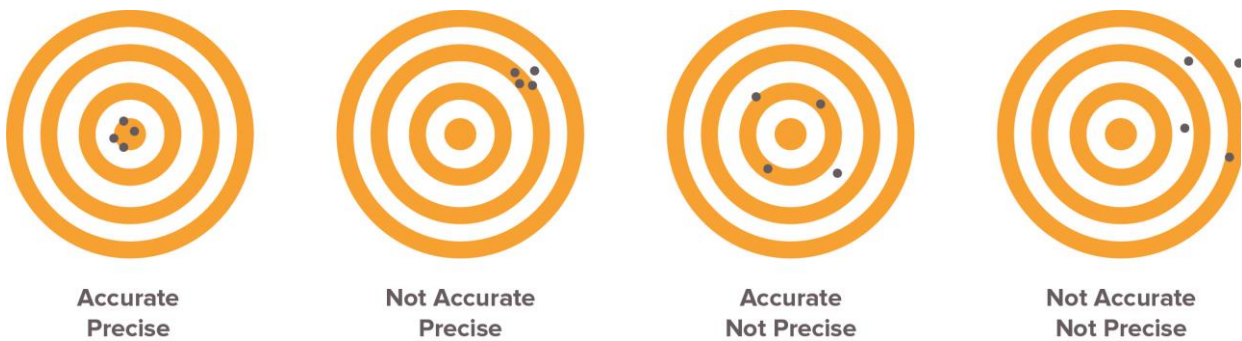


Fig 7. Illustration de l'Exactitude (accurate) et de la répétabilité (precise)²⁷

Interpolations et extrapolation entre deux valeurs

L'interpolation est une méthode visant à évaluer une valeur inconnue à partir de deux valeurs.

Les mesures réalisées sont localisées à un point ou une zone géographique de l'objet d'intérêt. Quand bien même les informations collectées sont précises aux points mesurés, il est très fréquent d'avoir recours à l'interpolation et l'extrapolation afin de déterminer des valeurs en des points non mesurés.

La valeur obtenue, qu'elle soit réalisée par un logiciel ou manuellement, n'est qu'une interprétation. Nous parlerons ici d'incertitude due à l'interprétation.

Classe d'incertitude des plans des réseaux des concessionnaires

Dans le cas des DT-DICT, les concessionnaires de réseaux fournissent des plans de repérage des réseaux qu'ils gèrent. Ces plans présentent les tracés de réseaux, auxquels sont associées des classes de précision²⁸.

- Classe A : incertitude maximale de localisation est inférieure ou égale à 40 cm si le réseau est rigide, ou à 50 cm si le réseau est flexible.
- Classe B : incertitude maximale de localisation est supérieure à celle relative à la classe A et inférieure ou égale à 1,5 mètre (à 1 m pour les branchements d'ouvrages souterrains sensibles pour la sécurité).

²³ Ministère de l'Education Nationale, « Nombres, mesures et incertitudes », *Eduscol - Ressources pour la classe de seconde et le cycle terminal général et technologique*, avril 2012.

²⁴ Wikipédia, *Incertainde de mesure*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Incertainde_de_mesure#Causes_d'incertaindes, consulté le 25 juillet 2022.

²⁵ Bureau international des poids et mesures (BIPM), « Evaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertainde de mesure », *JCGM 100:2008*, 2008.

²⁶ Formlabs, *Exactitude, précision et tolérance en impression 3D*, <https://formlabs.com/fr/blog/exactitude-precision-tolerance-impression-3d/>, consulté le 24 juillet 2022.

²⁷ *Ibid.*

²⁸ Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), *Réglementation anti-endommagement*, <https://www.reseaux-et-canalisation.ineris.fr/gu-presentaion/faq/reglementation-anti-endommagement.html>, consulté le 25 juillet 2022.

Complétude

- Classe C : incertitude maximale de localisation est supérieure à 1,5 mètre (à 1 m pour les branchements d'ouvrages souterrains sensibles pour la sécurité) ou si l'exploitant n'est pas en mesure de fournir la localisation correspondante.

Par ailleurs, dans le cas de la collecte des informations, le fait de ne pas être certain d'avoir collecté l'ensemble des informations du site génère une incertitude sur la complétude. Cela ajoutera une incertitude supplémentaire à la modélisation qui sera réalisée.

Positionnement

Enfin, une mesure ayant une bonne précision locale ne veut pas dire que la précision de mesure entre des points géographiquement éloignés est précise.

Deux exemples peuvent étayer cette problématique :

- Les mesures relatives à l'intérieur d'un plan sont relativement précises, mais à considérer dans le système de projection choisi (voir 7.1 Géoréférencement)
- Si ce plan doit être géolocalisé afin de prendre des mesures avec une autre partie de l'infrastructure, la mesure peut être entachée de l'erreur liée au géoréférencement l'incertitude sur les points utilisé pour réaliser cette opération.
- Dans le cas d'un levé LIDAR par MMS (Mobile Mapping Survey – Système de relevé mobile), la mesure de distance entre deux points d'un profil issus de même scan est précise.
 - Si la mesure est prise entre deux points de éloignés, dans le sens de déplacement du système de mesure, cette mesure doit être corrigée de la valeur de la dérive. En effet, dans un nuage de point non post-traité, le positionnement des points est réalisé par croisement des informations de la position GPS et des informations issues de l'accéléromètre du système. Sans recalage sur des points de topographie connus, les mesures sont affectées par la dérive liée à l'imprécision de l'accéléromètre, principalement sur les mesures des altitudes. Les mesures de positionnement en plan étant rectifiées par le positionnement GPS.

10. PRINCIPALES SOURCES D'INFORMATION

10.1 Nuages de points

Ensemble de points organisés dans un système de coordonnées à trois dimensions

Utiles pour générer les extrados des ouvrages

S'obtient par laser- ou photogrammétrie

Toujours préciser le géoréférencement

Exemples

Un nuage de points 3D est un objet composé d'un ensemble de points organisés dans un système de coordonnées à trois dimensions ou plus. Ces points se définissent en général à l'aide de coordonnées x , y et z et peuvent également comporter des informations liées à leur couleur RGB (Red, Green, Blue), à leur classification, à l'intensité du retour ou encore à l'heure GPS. Il est possible de découper ou d'assembler un ou des nuage(s) de points.

Les nuages de points font partie des principales sources d'informations *in situ* dans le processus de rétro-ingénierie. Ils sont utilisés pour aider à la modélisation de l'extrados des ouvrages à considérer.

Deux principales méthodes d'obtention des nuages de points existent à ce jour :

- Par photogrammétrie. Cette méthode s'appuie sur le traitement d'images du site. Le recouvrement des images ainsi que le positionnement GPS des clichés permettent ensuite à des algorithmes de reconstruire un nuage de points.
- Par lasergrammétrie. Dans le cas des infrastructures linéaires, cette méthode associe mesure laser, positionnement GPS et mesure par accéléromètre afin de repositionner les points de mesure dans un environnement 3D.

La création d'un nuage de point est d'abord réalisée dans un repère local, on parle alors d'un système de référence relatif. Il peut ensuite être géoréférencé à l'aide d'un système de référence externe (Lambert93, RGF93-CC48, WGS84, ...). On parlera alors d'un système de référence absolue.

Système de coordonnées des GCPs

Datum : Reseau Geodesique Français 1993; Système de coordonnées : RGF93 / CC49 (2D)

Tableau des GCPs/MTPs

	Nom	Type	X [m]	Y [m]	Z [m]
0	mtp69	Point de liaison m...	1642903.159	8152049.398	93.472
0	mtp68	Point de liaison m...	1642905.172	8152048.669	93.499
0	mtp67	Point de liaison m...	1642908.363	8152047.490	93.528
0	mtp66	Point de liaison m...	1642908.829	8152047.330	93.542
0	mtp65	Point de liaison m...	1642909.796	8152046.986	93.444
0	mtp64	Point de liaison m...	1642911.940	8152046.209	93.502
0	mtp63	Point de liaison m...	1642912.667	8152045.924	93.597
0	mtp62	Point de liaison m...	1642914.344	8152045.319	93.636
0	mtp61	Point de liaison m...	1642915.034	8152045.069	93.643

Fig 8. Exemple de points d'un nuage de points dans un système de référence RGF93/CC49 lors de son import dans un logiciel de traitement.

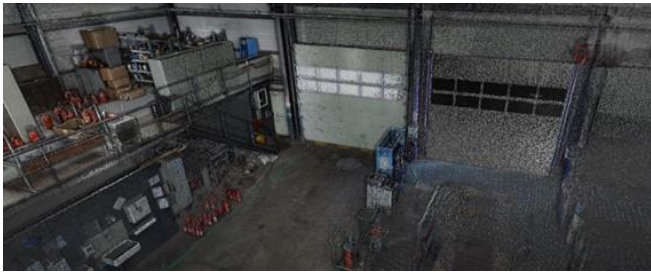


Fig 9. Exemple d'un nuage de points (Intérieur)



Fig 10. Exemple d'un nuage de points (Extérieur)

Usages tant pour la géométrie des ouvrages que pour leurs déformations

Interprétation facilitée par les dimensions colorimétriques des relevés de points ou leur structuration lors du relevé.

Exemple

Le poids très lourd des données complique les

Un nuage de points permet notamment de définir :

- l'enveloppe complète de l'intrados ou de l'extrados de l'ouvrage,
- les mesures de déformation / théorique d'un ouvrage,
- le contrôle de la déformation (état) de l'ouvrage.

La compréhension d'un nuage de points se définit comme la reconnaissance des objets présents et à l'association d'interprétations aux nuages d'objets qui le composent ²⁹.

Pour une meilleure interprétation du nuage de point il est nécessaire de demander le classement des points et éventuellement leur colorisation (dans le cas d'un nuage de points obtenu par lasergrammétrie).

Les nuages de points peuvent ensuite être structurés ; pour ce faire, des méthodes de segmentation automatiques ou semi-automatiques, telles que le maillage, le partitionnement en grille, la triangulation...sont développées ^{30,31}. Les nuages de points peuvent être modélisés par des primitives géométriques représentatives des objets ³².

Le nuage de points ci-dessous a été classifié. Cette classification permet un affichage en fausses couleurs. Chaque couleur étant associée à une classe d'objet (sol, végétation, bâtiment).

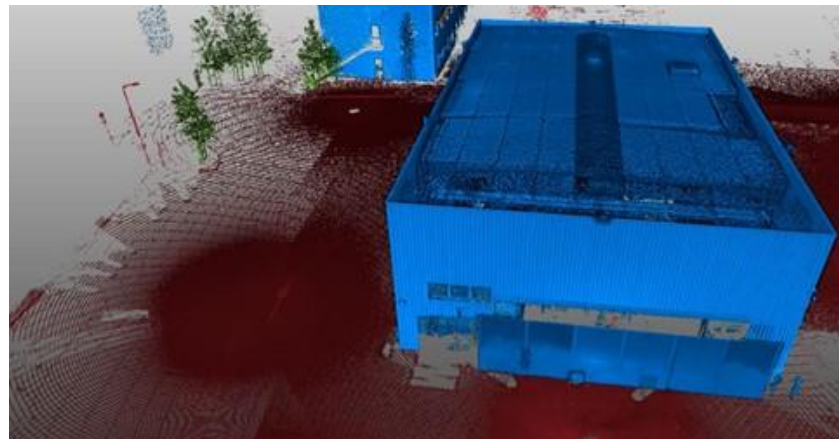


Fig 11. Exemple de nuage de points avec classification

Les nuages de points engendrent deux principales problématiques :

²⁹ Sylvie Daniel, « Revue des descripteurs tridimensionnels (3D) pour la catégorisation des nuages de points acquis avec un système LiDAR de télémétrie mobile », *Geomatica*, vol. 72, n°1, 2018, p. 1-15.

³⁰ Thomas Chaperon, *Segmentation de nuage de points 3D pour la modélisation automatique d'environnements industriels numériques*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002.

³¹ Keith Williams, Michael J. Olsen, Gene V. Roe et Craig Glennie, « Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR », *Remote Sensing*, vol. 5, n° 9, 2013, p. 4652-4692.

³² Sylvie Daniel, « Revue des descripteurs tridimensionnels (3D) pour la catégorisation des nuages de points acquis avec un système LiDAR de télémétrie mobile », *op. cit.*

aspects de stockage et de traitement

- Le stockage : un nuage de points d'un kilomètre de section autoroutière peut représenter plusieurs giga-octets de données (fonction de la densité, de la colorisation, du nettoyage).
- L'exploitation de ces nuages de points demande énormément de ressources informatiques (temps processeur, mémoire vive, capacité de calcul graphique).

Ainsi, même si leur intérêt est indéniable dans un processus de rétro-ingénierie, leur usage reste aujourd'hui limité aux experts ayant à disposition les ressources logicielles et matérielles nécessaires.

10.2 Ortho-photo (photogrammétrie)

Une photo redressée comme une carte

Une orthophotographie est un document photographique obtenu par redressement, mise à l'échelle et assemblage des surfaces élémentaires d'une ou de photographies aériennes qui peuvent être géoréférencées dans n'importe quel système de coordonnées. Les points étant situés sur un terrain parfaitement plat³³.

En d'autres termes, une orthophotographie semble être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces points étant situés sur un terrain parfaitement plat.

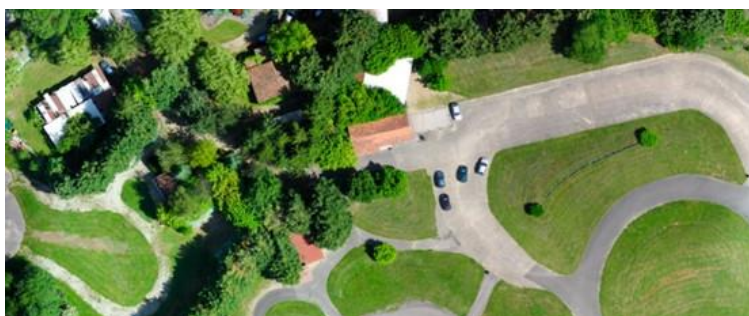


Fig 12. Exemple d'une ortho photo plan

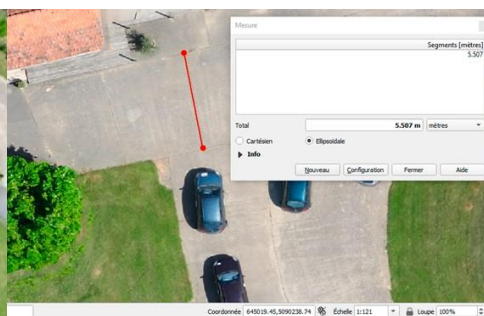


Fig 13. Exemple de mesure effectuée sur une orthophotographie géoréférencée

10.3 SIG

Un outil de gestion des territoires

Un Système d'Information Géographique est un outil informatique permettant de recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

Les SIG sont incontournables dans les métiers de la gestion des territoires.

Usages variés et multiples

Le SIG est un terme général qui se réfère à un certain nombre de technologies, de processus et de méthodes. Celles-ci sont étroitement liées à l'aménagement du territoire, la gestion des infrastructures et réseaux, le transport et la logistique, l'assurance, les télécommunications, l'ingénierie, la planification, l'éducation et la recherche, etc.

Les données des SIG sont donc une source incontournable d'informations dans le processus de rétro-ingénierie des infrastructures.

³³ Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *Trois questions pour comprendre l'ortho-photographie*, <https://www.ign.fr/institut/kiosque/3-questions-pour-comprendre-lortho-photographie>, consulté le 25 juillet 2022.

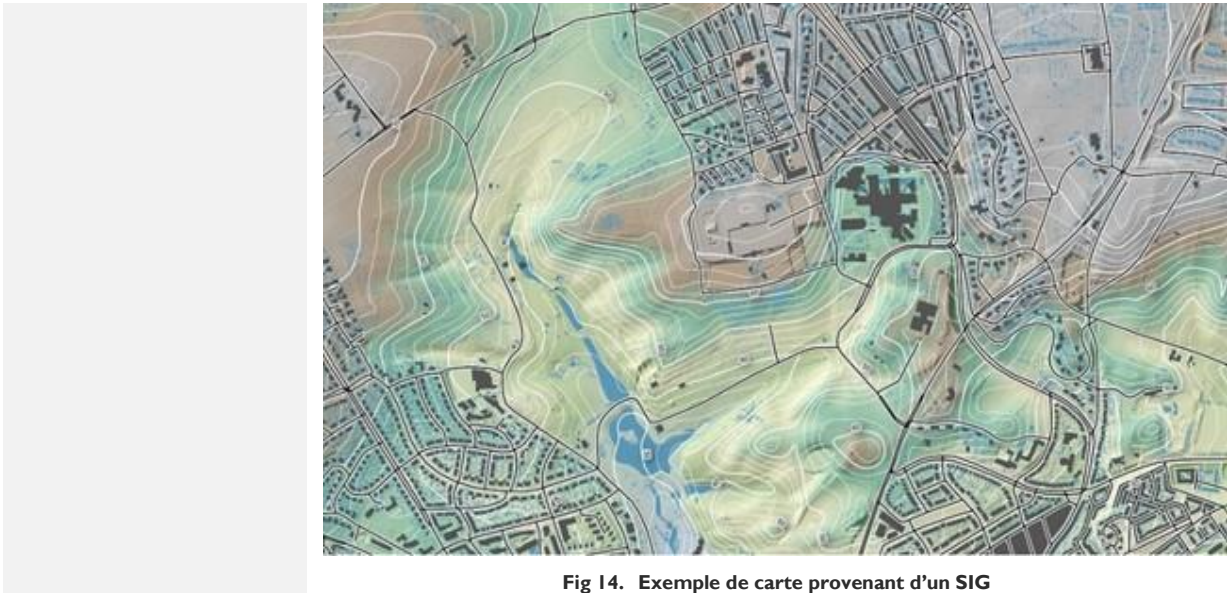


Fig 14. Exemple de carte provenant d'un SIG

II. RÉFÉRENCES

- Beaufils Mickaël, Barthélémy Yves, Baudin Thierry, Beaudouin Maxime, Bernard Emilie, Canac Robin, Castro-Moreno Juan, Chapron Gilles, Cousin Vincent, Delrieu Nicolas, Gabalda Sunseare, Grellet Sylvain, Lancien Nolwenn, Le Hello Bastien et Léonard Jean-Marie, « Proposition de standard OpenBIM pour les données géotechniques », *MINnD_UC08_01_Standardisation_donnees_geotechniques_027A_2019 - Livrable du PN MINnD Saison 1 - IFC Infrastructures souterraines (UC8)*, août 2019.
- Beaufils Mickaël, Halfon Isabelle, Garnier Pierre, Cochard Jean, Miraillet Pierre, Hassane Norane, Chapron Gilles, Serieys Alexis, Galandrin Clément et Bretelle Sylvie, « Standardisation des données géotechniques pour la conception d'infrastructures souterraines », *Livrable du PN MINnD Saison 2 - GT1.5 - Géotechnique*, décembre 2021.
- buildingSMART France - Mediaconstruct, « Géoréférencement de projets BIM - Éléments méthodologiques : notions de base, cas d'usage et outils », *Guide*, avril 2020.
- Bureau international des poids et mesures (BIPM), « Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure », *JCGM 100:2008*, 2008.
- CEREMA, « L'innovation AIGLE 3D : un outil au service d'une gestion patrimoniale intégrée », *Fiche de présentation*, 2019.
- Chaperon Thomas, *Segmentation de nuage de points 3D pour la modélisation automatique d'environnements industriels numérisés*, Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002.
- Daniel Sylvie, « Revue des descripteurs tridimensionnels (3D) pour la catégorisation des nuages de points acquis avec un système LiDAR de télémétrie mobile ».
- 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*, mai 2019.
- Formlabs, *Exactitude, précision et tolérance en impression 3D*, <https://formlabs.com/fr/blog/exactitude-precision-tolerance-impression-3d/>, consulté le 24 juillet 2022.
- Hajar Ziad, Castaing Christophe, Breton Fabrice, Afonso Patrice, Poinsignon Michel, Tribouillois François, Lepert Philippe, Platelle Simon, Le Bars Gaëlle, Layerle Eric, Dupouy Olivier, Arnould Clara et Casse Maxime, « Modélisation des informations des chaussées sur le cycle de vie », *MINnD_TH03_UC02_01_Modelisation_informations_chaussées_cycle_vie_008_2015 - PN MINnD Saison 1 - Thème 3: Structuration des données - UC2: Cycle de vie des chaussées*, décembre 2015.
- Institut Géographique National (IGN), « Les représentations planes de l'ellipsoïde », *Documentation, version 3*, 2018.
- Institut Géographique National (IGN), « Projection cartographique », 2018.
- Institut Géographique National (IGN), « Le système RGF et la projection Lambert 93 », *IGN-DirCom 08/2008*, 2008.

- Institut Géographique National (IGN) / Service de Géodésie et de Métrologie (SGM), « Repères de référence géodésiques en France métropolitaine », *Documentation, version 9*, 2022.
- Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), *Réglementation anti-endommagement*, <https://www.reseaux-et-canalisation.ine-ris.fr/gu-presentation/fag/reglementation-anti-endommagement.html>, consulté le 25 juillet 2022.
- Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *Trois questions pour comprendre l'orthophotographie*, <https://www.ign.fr/institut/kiosque/3-questions-pour-comprendre-lortho-photographie>, consulté le 25 juillet 2022.
- Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *LIDAR HD - Une cartographie 3D du sol et du sursol de la France*, <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>, consulté le 22 juillet 2022.
- Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), *La géodésie*, <https://geodesie.ign.fr/>, consulté le 23 juillet 2022.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, « Relevé des dégradations de surface des chaussées », *Méthode d'essai LPC N° 38-2*, 1997.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, « Exécution et exploitation des carottages de chaussées », *Méthode d'essai LPC N° 43*, 1996.
- Ministère de l'Éducation Nationale, « Nombres, mesures et incertitudes », *Eduscol - Ressources pour la classe de seconde et le cycle terminal général et technologique*, avril 2012.
- mlpc, « TUS : Transversoprofilomètre à ultrasons », *Mesures sur ouvrages - Chaussées*.
- Nicolas Julie, « WiseBIM convertit les plans en maquette numérique », *Le Moniteur*, 14 janvier 2020.
- The Cross Product (TCP), *The Cross Product - Développement de logiciels*, <https://www.linkedin.com/company/thecrossproduct>, consulté le 22 juillet 2022.
- Vectra France, « APL - Mesure en continu de l'uni longitudinal », *Auscultation des chaussées - Matériel mlpc*, 2014.
- Veremes, « Échange et traitement de données géographiques : à quoi sert un ETL spatial ? », *Livre blanc ETL spatial*, 2014.
- Wikipédia, *Incertitude de mesure*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Incertitude_de_mesure#Causes_d'incertitudes, consulté le 25 juillet 2022.
- Williams Keith, Olsen Michael J., Roe Gene V. et Glennie Craig, « Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR », *Remote Sensing*, vol. 5, n° 9, 2013, p. 4652-4692.
- Wisebim, *L'éditeur de logiciels qui met l'Intelligence Artificielle au service de la modélisation en BIM*, <https://wisebim.fr/home>, consulté le 22 juillet 2022.

12. TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE DU DOCUMENT	2
MINnD Saison 2	2
Programme saison 2	2
Programme du GT5.....	2
Historique du groupe de travail.....	2
Livrables envisagées.....	2
Glossaire	3
2. ACTEURS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE	4
2.1 Identification des acteurs	4
Un processus multi-acteurs	4
Exploitant.....	4
MOA.....	4
AMO.....	4
MOE.....	4
Géomètre.....	4
Entreprise de détection des réseaux	4
Constructeur.....	4
3. ÉLÉMENTS CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE	5
Maquette Numérique	5
Ingénierie des systèmes.....	5
Modélisation.....	5
Incertitude	6
Transformation	6
4. LA RÉTRO-INGÉNIERIE EN DÉTAIL	7
4.1 Définition de la rétro-ingénierie	7
Analyse d'un objet destinée à retrouver le processus de sa conception, de sa fabrication, ainsi que son fonctionnement	7
Dans nos projets d'infrastructure.....	7
Les objectifs de modélisation.....	7
Les objectifs de contextualisation.....	7
Rétro ingénierie et rétro modélisation	7
4.2 Imbrication dans un projet	7
Faciliter et fiabiliser l'information	7
Partir des documents existants tout en les reformulant aux exigences de la nouvelle demande.....	7
Faire appel aux nouvelles technologies de relevés automatiques.....	8
4.3 Les informations d'entrée	8
Des éléments d'information bruts descriptifs de l'ouvrage	8
Des formats variés et à adapter aux processus.....	8
Des données décrivant la nature des objets et de leur environnement utile à la conception	8
Méthodes d'acquisition	8
Préciser l'expression des besoins de l'opération de rétro-ingénierie.....	9
Penser à compléter par des fouilles et levés spécifiques.....	9
Veiller à collecter les logs des activités et interventions	9
Planifier soigneusement les processus avant leur lancement	9
Structurer et renseigner un livrable des opérations de levé.....	9
4.4 Dans le bâtiment	9
Une longueur d'avance acquise à avoir travaillé à partir de plans 2D	9
la transformation 2D -> 3D est très consommatrice et souvent externalisée	9
Disponibilité de routines automatisées	9
Scan To BIM.....	10

4.5	Dans les infrastructures	10
	Des outils supportant la rétro-ingénierie existent déjà dans le monde SIG	10
	Mais les usages sont limités et incompatibles avec les IFC.....	10
	Les techniques des nuages de points se répandent et sont de plus en plus ouvertes à l'automatisation.....	10
	Projet IGN LIDAR HD propose un levé complet du territoire	10
	Du drone aussi dans les canalisations	11
5.	ÉTAPES CLÉS DE LA RÉTRO-INGÉNIERIE	12
	Processus par étapes	12
	Un enchaînement logique à suivre absolument	12
	Définition des besoins	12
	Formalisation des besoins.....	12
	Inventaire et analyse des informations	12
	Compléter les données.....	12
	Modélisation.....	12
	Exploitation du modèle.....	12
6.	ACQUISITION DES INFORMATIONS DU SITE	13
	Acquisition des données numériques	13
	Les méthodes d'acquisition précisées en Saison I	13
	Le livrable Saison I ne traite que des informations visibles.....	13
	Restriction du périmètre de notre groupe de travail aux chaussées	13
6.1	Cahier des charges	13
	Spécifier le besoin est indispensable	13
	À chaque objectif son outil.....	13
	Ne pas oublier les contraintes environnementales et temporelles.....	13
	Ni celles liées aux contraintes d'exploitation et coactivités	13
6.2	Acquisition des données visibles des chaussées	13
	Collecter des éléments de performance et de l'état de vieillissement des chaussées	13
	Outils de mesures de la route.....	14
6.3	Méthodes d'acquisition des structures enterrées	14
	Acquisitions non destructives et destructives	14
	Informations du sous-sol	14
	Informations des structures de chaussées.....	15
7.	LES TRANSFORMATIONS	16
7.1	Géoréférencement	16
	Travailler dans un territoire	16
	Système de projection	16
	Aller plus loin	16
	Géo-référencer un modèle BIM.....	17
7.2	Transformation de coordonnées	17
	Multiplicité des systèmes de géoréférencement	17
	Ne pas jouer aux apprentis sorciers !.....	17
	Changer de système de coordonnées.....	17
	Géoréférencement étape indispensable pour travailler dans un territoire	17
	Altération linéaire, un point de vigilance important dans le domaine des infrastructures	18
	En Lambert, pas d'altération angulaire	18
7.3	Formatage d'informations	18
	Le format des informations est à préciser selon les logiciels utilisés	18
	Convertisseur de données ou logiciels ETL pour transformer d'un format en un autre	19
	Préalablement exporter données dans un format propriétaire pour pouvoir les exploiter.....	19
	Contrôle indispensable	19
8.	PRINCIPAUX USAGES DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE	20
8.1	Conception et réalisation	20

Mieux comprendre l'intégration de l'ouvrage dans son environnement	20
Focaliser sur les éléments d'intégration dans l'environnement	20
La non prise en compte d'un ouvrage existant (le plus souvent enterré) est le risque principal à éviter	20
L'usage dans un but de simulation nécessite des données surtout présentes dans les documents.....	20
Fiabiliser l'information	20
Limites actuelles de l'exercice	20
8.2 Exploitation	21
Connaissance ciblée du patrimoine	21
Prix du ticket d'entrée élevé.....	21
Peu d'appétence	21
9. PRÉCISIONS GÉOMÉTRIQUES	22
Adapter la précision recherchée aux enjeux et usages	22
Mauvaises pratiques	22
Pour un ouvrage	22
Bien positionner le curseur	22
Pistes d'amélioration	22
9.1 Incertitude	22
Évaluer la fiabilité des données d'entrée ?	22
Se référer aux travaux du GT2-2	22
Mesures	22
Exactitude, précision et tolérances	23
Interpolations et extrapolation entre deux valeurs	23
Classe d'incertitude des plans des réseaux des concessionnaires	23
Complétude	24
Positionnement	24
10. PRINCIPALES SOURCES D'INFORMATION	25
10.1 Nuages de points	25
Ensemble de points organisés dans un système de coordonnées à trois dimensions	25
Utiles pour générer les extrados des ouvrages.....	25
S'obtient par laser- ou photogrammétrie.....	25
Toujours préciser le géoréférencement	25
Exemples	25
Usages tant pour la géométrie des ouvrages que pour leurs déformations.....	26
Interprétation facilitée par les dimensions colorimétriques des relevés de points ou leur structuration lors du relevé.	26
Exemple	26
Le poids très lourd des données complique les aspects de stockage et de traitement	26
10.2 Ortho-photo (photogrammétrie)	27
Une photo redressée comme une carte	27
10.3 SIG 27	
Un outil de gestion des territoires	27
Usages variés et multiples	27
11. RÉFÉRENCES	29
12. TABLE DES MATIÈRES	31
13. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS	34

I3. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS

Fig 1. Schéma d'une maquette numérique composée de modèles 3D, eux-mêmes composés de briques élémentaires	5
Fig 2. Étapes du processus de rétro-ingénierie	12
Fig 3. Coordonnées cartographiques (source : www.geogebra.org)	16
Fig 4. Exemple de système de projection (source : IGN, Les représentations planes de l'ellipsoïde)	16
Fig 5. Représentation d'une transformation permettant le passage d'un plan exposé dans un système de coordonnées A vers un système B.	17
Fig 6. Schéma explicitant l'altération linéaire	18
Fig 7. Illustration de l'Exactitude (accurate) et de la répétabilité (precise)	23
Fig 8. Exemple de points d'un nuage de points dans un système de référence RGF93/CC49 lors de son import dans un logiciel de traitement.	25
Fig 9. Exemple d'un nuage de points (Intérieur)	26
Fig 10. Exemple d'un nuage de points (Extérieur)	26
Fig 11. Exemple de nuage de points avec classification	26
Fig 12. Exemple d'une ortho photo plan	27
Fig 13. Exemple de mesure effectuée sur une orthophotographie géoréférencée	27
Fig 14. Exemple de carte provenant d'un SIG	28