



Ingenierie de la Maintenance du Génie Civil

LA NUMÉRISATION DU PATRIMOINE GÉNIE CIVIL AU SERVICE DE LA MAINTENANCE

Journée Technique

MARDI 5 Novembre 2024

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

en collaboration avec





Ingenierie de la Maintenance du Génie Civil

TERMINOLOGIE, TECHNOLOGIES, ÉTAT DE L'ART DE LA NUMÉRISATION À DIFFÉRENTES ÉCHELLES

KATIA MIRANDE, PIERRE CHARBONNIER
CEREMA, EQUIPE PROJET ENDSUM

Journée Technique

MARDI 5 Novembre 2024

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS



en collaboration avec



Sommaire

- **Terminologie**
La numérisation, pour quoi faire ?
La numérisation, la digitalisation,
le BIM, le jumeau numérique...
- **Technologies**
Les principales techniques de
numérisation 3D et leurs capacités
- **Conclusion**
Les possibilités offertes
Numérisations enrichies



Terminologie

Digitalisation vs. Numérisation

Numérisation : conversion de l'analogique au numérique

- Numérisation de fonds documentaire
- Numérisation d'ouvrages ou de structures

Digitalisation : utilisation des technologies numériques pour produire de la valeur

- Numérisation des données
- Informatisation / dématérialisation des procédés
- Visualisation / analyse de données
- Intelligence artificielle



Source : <https://le-consultant-digital.com>

La numérisation des ouvrages

Quelle numérisation ?

- La photographie numérique : établir des vues, éventuellement calibrées, de l'ouvrage, pour en tirer des informations 2D ou des rendus visuels
- La **numérisation 3D** : relever l'information géométrique d'un ouvrage existant et la convertir sous forme numérique
- On peut numériser d'autres informations, avec tous types de capteurs

Quel « produit » 3D, pour quoi faire ?

- La 3D « brute » : mesurer, comparer
- Les modèles maillés : visualiser, interpréter
- La maquette numérique : interagir
- Le jumeau numérique : simuler, prévoir



La 3D brute

Points et nuages de points

Visualisation

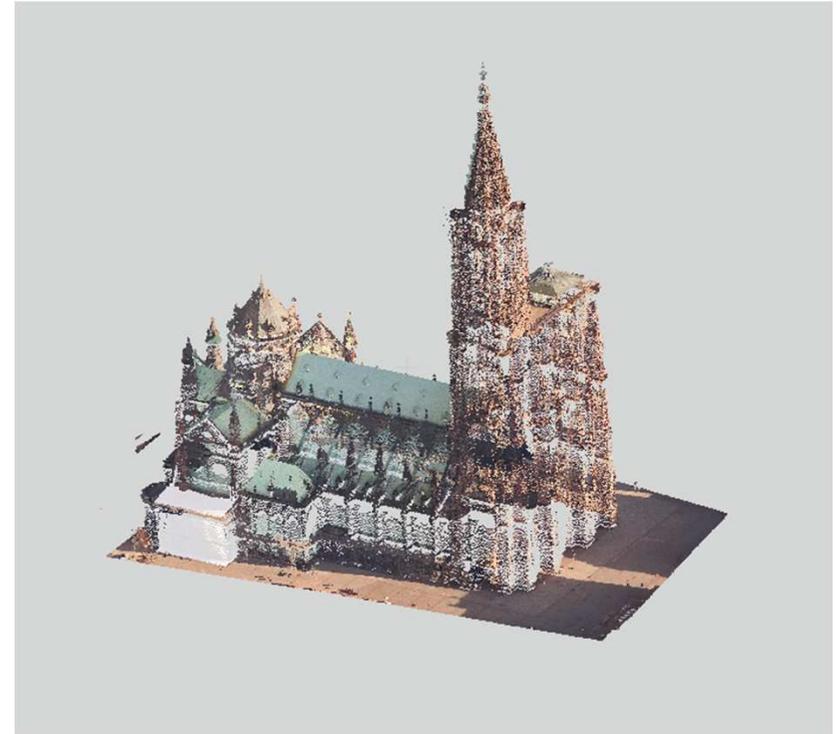
- Colorisation possible
- Pas de sémantique

Mesure

- Positions
- Distances entre points
- Profilométrie

Comparaison

- Nuage-à-nuage



Données : <https://data.strasbourg.eu>

Exemple : nuage de points Lidar aéroporté de la cathédrale de Strasbourg (opendata Eurométropole de Strasbourg)

Les modèles maillés

Maillage des surfaces par des triangles

- Texturation possible (image)
- Pas de sémantique



Mesure

- Surface et volumes

Comparaison

- Nuage-à-maillage
- Maillage-à-maillage

Visualisation

- Immersive (rendu des volumes)
- Réalité augmentée



Données : <https://odacit.3d.strasbourg.eu>

Exemple : modèle maillé de la cathédrale de Strasbourg (détail)

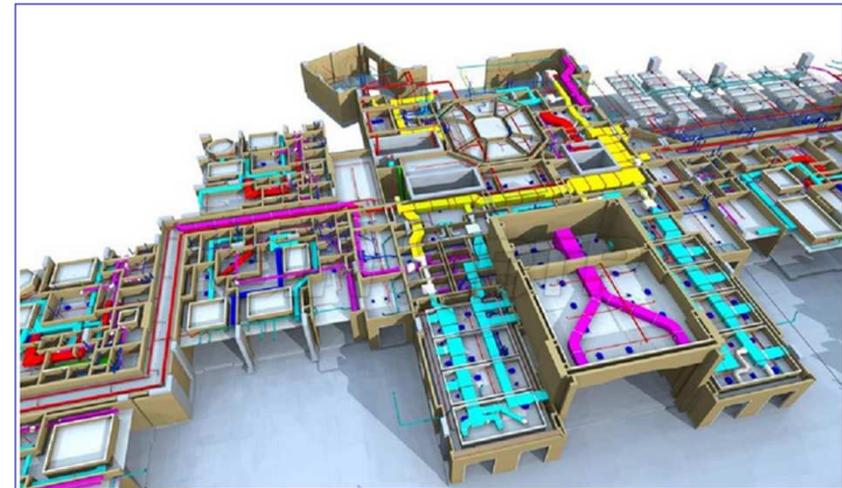
La maquette numérique

Modèle géométrique avec différents degrés de complexité

- Du plan 2D à l'assemblage de primitives géométriques 3D

Informations sémantiques

- Nécessite la segmentation des données 3D et l'ajustement de modèles
- Manuel ou semi-automatique
- Exemple de logiciels : TopoDOT, AUTODESK Docs, orbitGT
- L'automatisation reste un sujet de recherche



Source : <https://bimbt.com>

De la maquette au BIM

Building Information Modeling

- Processus collaboratif qui accompagne toute la vie de l'ouvrage
- Concerne tous les acteurs / corps de métier impliqués
- Centré sur un modèle numérique enrichi d'informations et de données

Maquette numérique acquise = modèle « tel qu'existant »



Source : <https://defibim.com>

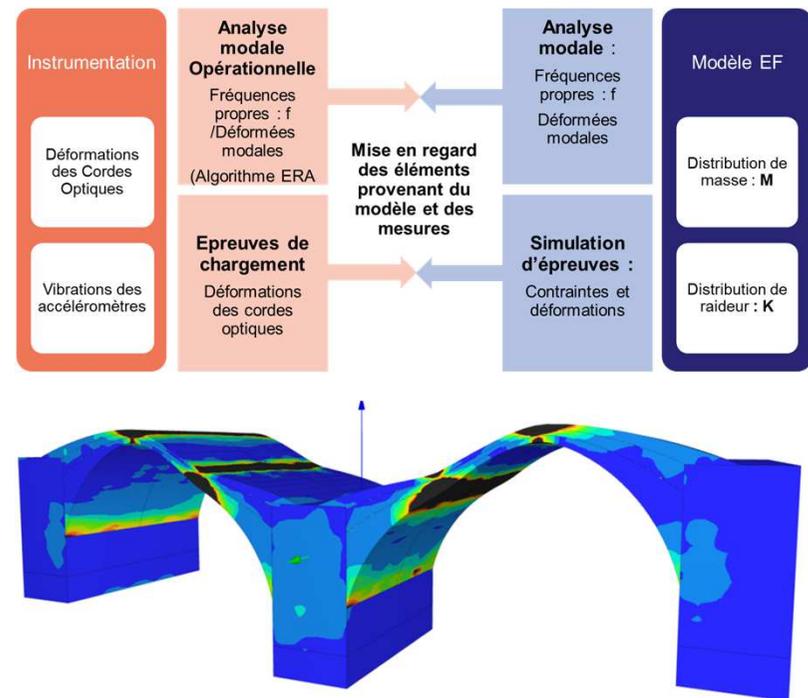
Maquette vs. jumeau numérique

Le jumeau numérique

- Représentation numérique réaliste d'un objet physique
- Modèle enrichi de données dynamiques issues de capteurs

Un modèle « exécutable »

- Permet de réaliser de la maintenance prédictive, de simuler des comportements, d'anticiper des évènements



Source : Projet GERICO, programme « Ponts connectés », SCE, OSMOS, STRAINS, Ville d'Angers, CD44

Technologies

Principales modalités d'imagerie 3D

Téledétection : interagir avec la matière

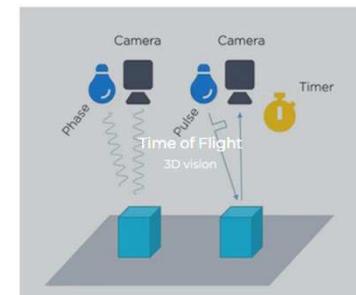
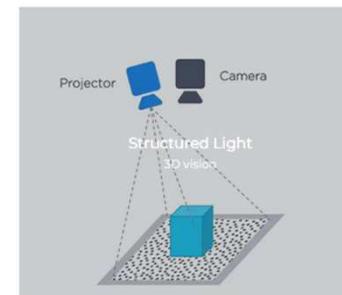
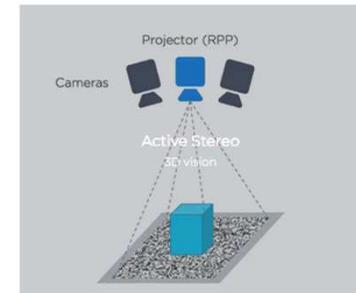
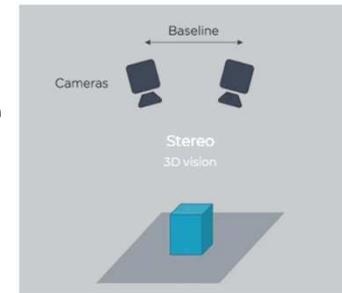
- Ondes électromagnétiques
- Ondes sonores

Systèmes actifs

- Emission d'impulsions ou d'ondes
- 3D par mesure de distance + balayage
- Lumière structurée : analyse de la déformation d'un motif projeté

Systèmes passifs

- Captation d'images (dans le domaine visible, le plus souvent)
- 3D par photogrammétrie, Visual SLAM, Structure from Motion
- *Approches de rendu visuel neuronal : NeRFs, Gaussian Splatting*



Source : <https://www.zivid.com>

Exemples de systèmes actifs



Source : <https://www.einfochips.com>



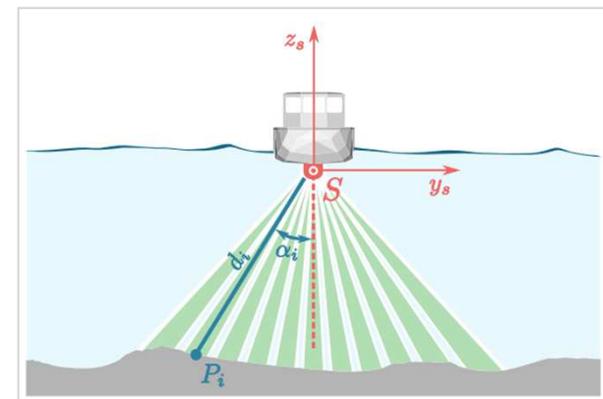
Source : <https://www.cnetfrance.fr>



© Pavemetrics



Source : <https://leica-geosystems.com>



(Moisan 2017)

Techniques photogrammétriques

SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*)

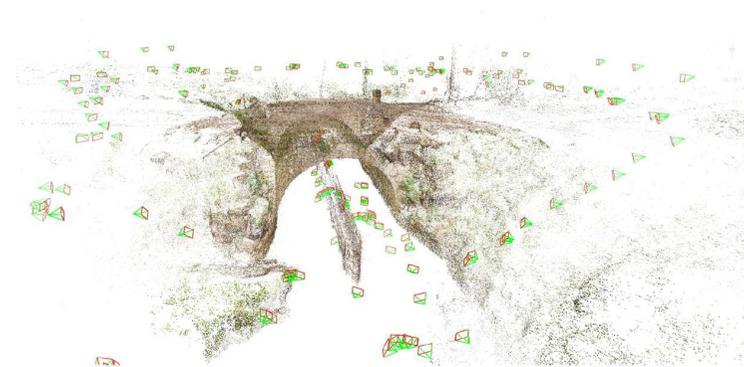
SFM (*Structure from motion*)

Principes

- Mise en correspondance robuste de points d'intérêt et ajustement de faisceaux
- Reconstruction à un facteur d'échelle près

Principaux logiciels

- Commerciaux : Agisoft Metashape, Photoscan, Pix4Dmapper
- Libres : Colmap, MicMac et Apero, Meshroom, VisualSFM, OrbSlam3



(Fauchard et al. 2013)

Consolidation/référencement

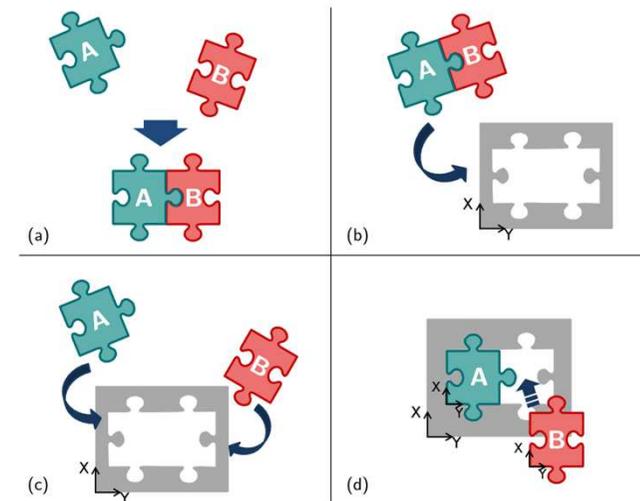
**Positionner les données acquises, entre elles
ou dans un repère monde/chantier**

La consolidation

- Nécessaire pour former un nuage de points
- Indispensable pour superposer des données différentes
- Obtenue à l'aide de capteurs (odomètres, IMU+CI+GNSS) ou calculée (SLAM, SFM)

Le référencement

- Relatif (abscisse curviligne dans un tunnel par ex.) par rapport à un système local, interne au projet (axes bâtiment)
- Absolu (géoréférencement) : les objets sont repérés dans un système de coordonnées connu, global (ex. WGS 84)

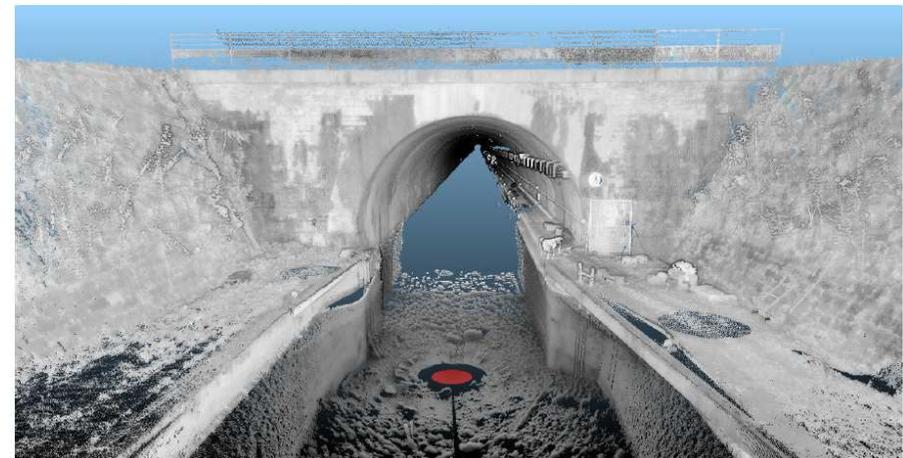
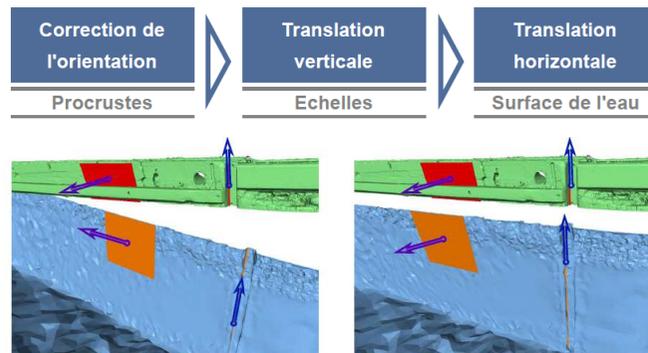


(Lachat 2019)

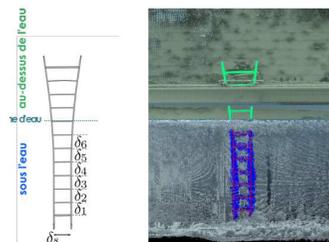
Recalage Laser / Sonar



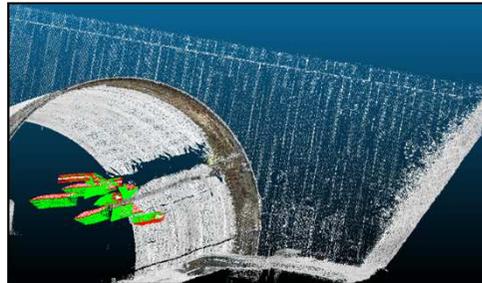
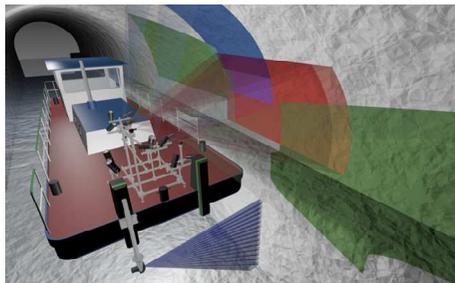
Reconstruction 3D d'une entrée de tunnel navigable à partir de données laser (TLS) et sonar (Sondeur multi-faisceau)



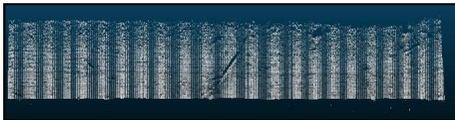
(Moisan 2017)



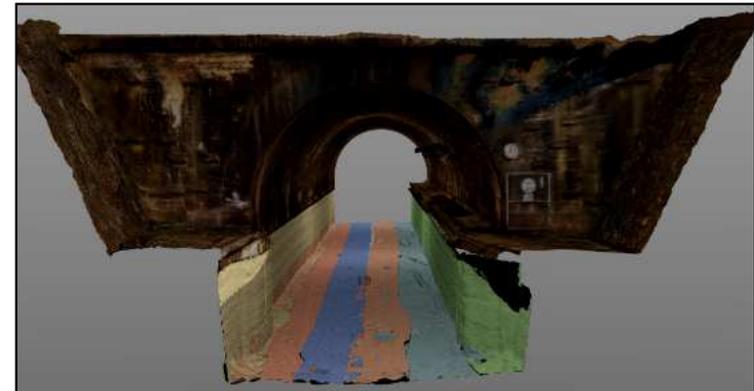
Combinaison 3D sonar/image



Modèle 3D voûte + trajectoire



Profils SONAR (SMF)



Fusion → modèle « tube entier »

(Moisan et al 2021)

Modélisation « tube entier » des tunnels navigables, quand photogrammétrie et topographie pallient l'absence de GPS pour la cartographie mobile

La mise en œuvre

Poste fixe (stations), portés, embarqués sur véhicules



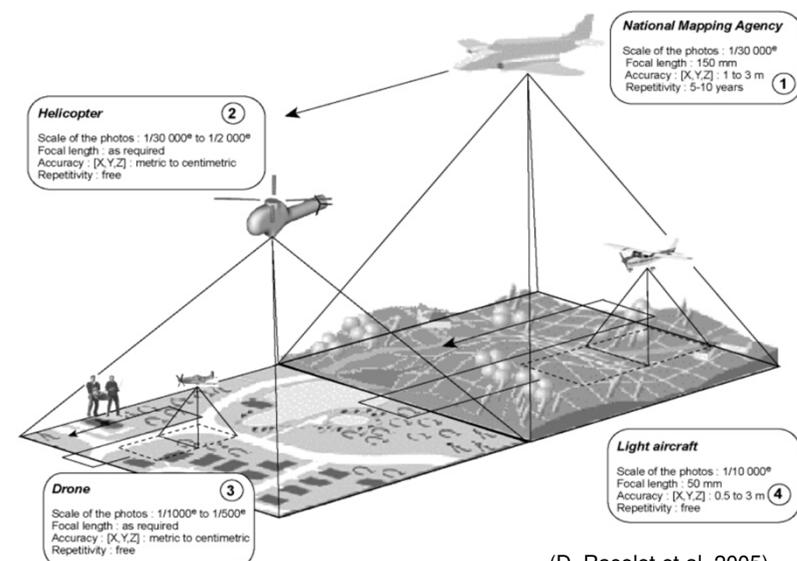
<https://mydigitalbuildings.com>



(c) Leica



(c) Cerema



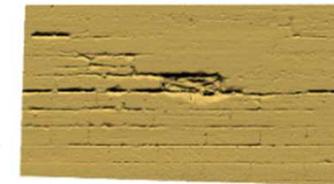
(D. Racolot et al. 2005)

Capacités métrologique des capteurs

La précision peut dépendre de la physique du capteur, de la configuration d'acquisition, etc.

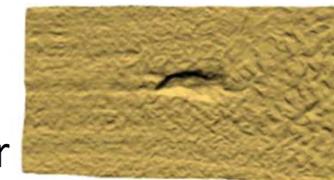


Laser



- 1m -

Sonar



- 1m -

(Moisan 2017)

Conclusion

Conclusion

Une offre variée pour la numérisation 3D

Méthode et technologie à employer dépendent directement

- Du milieu (air, eau)
- Du dimensionnement (taille de l'ouvrage, échelle de travail)
- De la précision attendue
- De l'accessibilité de l'ouvrage, du rendement souhaité
- De critères économiques

Name	Abbr.	Resolution	Active illumination	Direct point cloud access	Output values	Price
Laser triangulation	LT	< mm	Yes	Yes	XYZ (I)	€€€
Structured light approaches	SL	< mm	Yes	No	XYZI (RGB)	€€
Structure from motion	SfM	mm	No	No	XYZRGB	€
Time of flight	ToF	mm	Yes	Yes	XYZ (I)	€€
Light field measuring	LF	mm	No	No	XYZRGB	€€€
Terrestrial laserscanning	TLS	cm	Yes	Yes	XYZ (I/RGB)	€€€

Exemple d'analyse pour le scan de petits objets (Paulus, 2019)

Numérisation 3D enrichie

La numérisation 3D n'est pas une fin en soi !

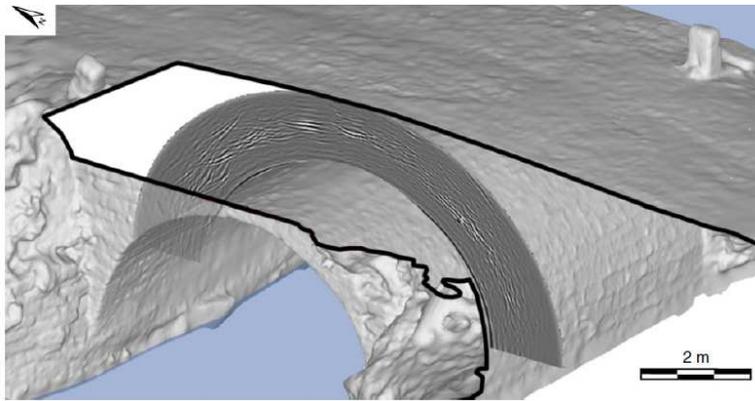
Enrichissement sémantique

- Recensement d'équipements (cf. BIM)
- Détection de défauts (cf. inspection)
- Rôle de l'IA dans l'automatisation

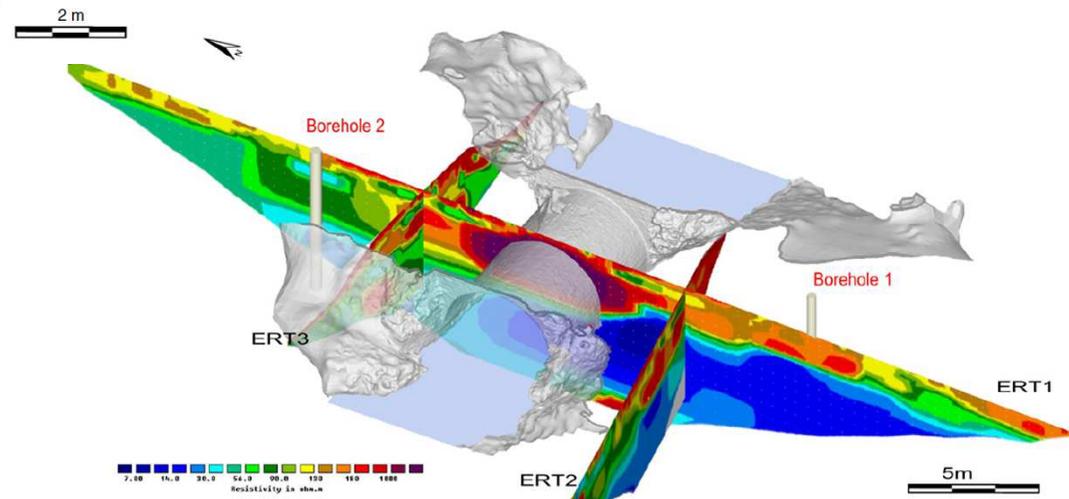
Croisement avec d'autres modalités

- Infra-Rouge
- Radar, imagerie géophysique, etc.

Imagerie multi-physique



Développer une vision de l'ouvrage dans son environnement pour mieux interpréter son état



(Fauchard et al. 2013)

Merci



Ingenierie de la Maintenance du Génie Civil

Références

- Wright, L., Davidson, S. How to tell the difference between a model and a digital twin. Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. 7, 13, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
- C. Fauchard et al. Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the Pont De Coq, France, Journal of Applied Geophysics, Volume 98, Pages 100-112, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.009>
- E. Lachat. Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg, 2019, <https://theses.hal.science/tel-02374000v1>
- E. Moisan, Imagerie 3D du "tube entier" des tunnels navigables, Thèse de doctorat. Université de Strasbourg, 2017. <https://theses.hal.science/tel-01710763>
- E. Moisan et al. Combining photogrammetric and bathymetric data to build a 3D model of a canal tunnel, The Photogrammetric Record, 36: 202-223, 2021. <https://doi.org/10.1111/phor.12379>
- D. Raclot et al. Photographies aériennes prises par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix, Géomorphologie : relief, processus, environnement , vol. 11 - n° 1, 2005. <http://journals.openedition.org/geomorphologie/209>
- S. Paulus. Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping. Plant Methods 15, 103 2019. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0490-0>