

Inspection Détaillée des tunnels Nouvelles Technologies – ID NT©

Sébastien FRACHON¹, Benjamin POLI²

¹ Setec Diadès, Lyon, France

² Setec Diadès, Vitrolles, France

RESUME Le retour d'expérience de Setec Diadès et sa proximité avec les exploitants d'ouvrage, ont conduit au développement, d'une nouvelle technologie d'inspection en tunnel alliant matériel d'acquisition de dernière génération et méthode d'inspection traditionnelle. Le but est de garantir une inspection détaillée conforme à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art en intégrant les contraintes d'exploitation des maîtres d'ouvrage. Pour cela, il s'agit d'utiliser l'acquisition photographique et thermographique comme un outil support et de le coupler aux compétences des inspecteurs d'ouvrages. Il est ainsi possible, non pas d'enlever tout impact sur l'exploitation, mais de le limiter au maximum tout en conservant une intervention cohérente avec les attentes des maîtres d'ouvrages et des recommandations en vigueur. Le principe général est une acquisition semi-automatisée de l'intrados de l'ouvrage, supervisée par des inspecteurs d'ouvrages expérimentés ayant la capacité de détecter des zones potentiellement pathologiques. De retour au bureau, un opérateur expérimenté réalisera une cartographie des désordres en s'appuyant sur les supports photographiques et thermographiques.

Mots-clés Inspection, Tunnel, Cartographie

Key-words Inspection, Tunnel, Maps

Glossaire :

ITSEOA : Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art

IQOA : Image Qualité des Ouvrages d'Art

IDNT : Inspection Détaillée Nouvelle Technologie

I. INTRODUCTION

L'ITSEOA au travers de son fascicule 40 – Génie civil, fournit un outil complet permettant aux maîtres d'ouvrage et aux bureaux d'études, la réalisation d'inspection détaillée du génie civil en garantissant une gestion du patrimoine optimale et la sécurité des usagers tout au long de la vie des ouvrages.

Les inspections de tunnels sont parfois plus complexes que sur certains ouvrages d'art car elles peuvent générer plus de perturbations à l'exploitation. En effet, Les inspections détaillées des ouvrages selon la méthode dite traditionnelle (relevée de tous les désordres, contact avec la totalité du parement) demandent une présence sur site longue, compte tenu de leur exhaustivité et des méthodes d'acquisitions actuelles. Cela s'avère de moins en moins compatible avec les contraintes

d'exploitation des maitres d'ouvrage notamment sur les autoroutes et autres grands axes routiers et ferroviaires.

II. Genèse de la démarche et construction du mode de développement

Le retour des principaux exploitants des réseaux routiers comportant des tunnels met en avant :

- La problématique de plus en plus fréquente de fermeture d'un sens de circulation et qui plus est sur plusieurs nuits,
- La volonté pour eux d'être conforme à l'instruction technique (fascicule 40). [CETU, 2012]

Synthétiquement, il s'agit d'organiser des inspections détaillées avec le plus faible impact possible sur l'exploitation, tout en respectant la réglementation.

Cette problématique d'équilibre entre contrainte d'exploitation et exhaustivité des constats est présente depuis longtemps mais de plus en plus, les exploitants sont tentés de privilégier l'absence de contrainte d'exploitation. De fait, les inspections à distance permettent l'acquisition de données d'un tunnel dans un délai relativement réduit, avec des passages « furtifs » qui sont, soit « noyés dans le trafic », soit réalisés de nuit dans un créneau de balisage travaux, elles sont notamment citées dans le guide d'inspection des tunnels routiers du CETU [CETU, 2015]. Cela se traduit par une augmentation des prestations d'acquisition scanner. Deux technologies sont bien développées et largement utilisées pour les acquisitions en tunnels employant deux approches différentes, l'une étant issue de la topographie et l'autre basée sur le traitement d'image. La première démarche de notre phase de recherche et développement a été d'analyser ces technologies existantes que nous n'utilisons pas mais que nous devons connaître afin d'en déterminer les avantages et les inconvénients de fonctionnement.

A. Technologie Scanner topo

- Utilisation d'un scanner tournant,
- Permet le couplage avec un relevé thermographique,
- Permet l'acquisition de nuage de point et d'appliquer des photographies couleurs haute définition

B. Technologie scanner embarquée

- Utilisation d'un scanner tournant embarqué sur véhicule,
- Permet l'acquisition d'image haute définition en nuance de gris
- Permet le relevé thermographique

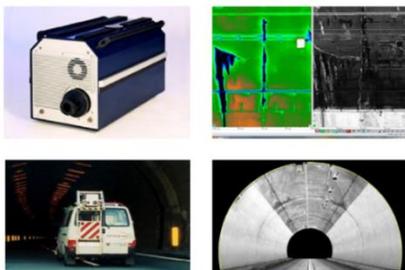


FIGURE 1. Modèle et rendu – scanner topo [Géotopo]

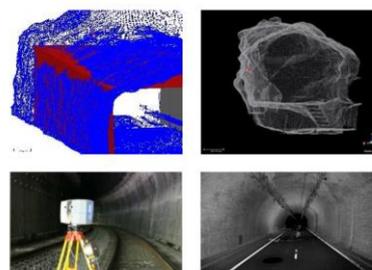


FIGURE 2. Modèle et rendu – scanner embarqué [Spacetec]

C. Comparaison des méthodes existantes

TABLEAU 1. Comparatif des différentes méthodes d'inspections détaillées actuelles

Technologies	Avantages	Inconvénients
Inspection détaillée « traditionnelle »	<ul style="list-style-type: none"> • Contact direct avec le parement de l'ouvrage, Inspection de toutes les parties d'ouvrages y compris têtes, assainissement, zone d'influence, • Possibilité d'auscultation au marteau et de purge si nécessaire, • Réalisé par des inspecteurs qualifiés : Degré de précision permettant une analyse exhaustive des désordres et une bonne qualité des rapports d'inspection, • Conforme à l'ITSEOA. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de présence sur le terrain important, • Contrainte vis à vis de l'exploitation notable, • Nécessité d'utilisation d'un moyen d'accès permettant le contact et le déplacement en continu le long du parement de l'ouvrage
Levé scanner embarqué	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition de l'image de la totalité de la surface de revêtement, • Rapidité d'acquisition/faible impact sur l'exploitation, • Relevé thermographique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de contact avec le parement, • Aucune zone n'est inspectée au sens de l'ITSEOA, • Pas de constat au droit des assainissements / drainages, des têtes et zones d'influence, • Il ne s'agit que d'acquisition, aucune compétence d'analyse des données afin de rendre un rapport d'ID, • Coût élevé.
Levé scanner topo	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition de l'image de la totalité de la surface de revêtement, • Nuage de point extrêmement précis, • Esthétisme du rendu 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de contact avec le parement, • Aucune zone n'est inspectée au sens de l'ITSEOA, • Pas de constat au droit des assainissements / drainages, des têtes et zones d'influence, • Il ne s'agit que d'acquisition, aucune compétence d'analyse des données afin de rendre un rapport d'ID, • Coût élevé, • Durée d'acquisition longue, impact important sur l'exploitation

III. Système d'assistance à la réalisation d'inspection de structure type tunnel

A. Description du dispositif

Le système développé et breveté par Diadès est constitué de différents capteurs combinés entre eux et regroupés dans un seul et même boîtier suspendu sur un système mobile à pousser manuelle ou tractable. Il rentre dans la catégorie des nouvelles technologies d'acquisitions qui ont fait l'objet d'une analyse comparative par le Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) [Doreau-Malioche, J. et al., 2021].

Cinq éléments composent ce dispositif :

- Des caméras et appareils photos de très haute précision dans le domaine visuel (1mm/pxl),
- Des caméras infrarouges,
- Des profilomètres et distancemètres (précision au cm),
- Des sondes de température / Humidité,
- Un Odomètre.



FIGURE 3. Dispositif d'acquisition ID NT en action et module de contrôle

Le dispositif possède un contrôle autonome de son positionnement afin d'effectuer des acquisitions toujours perpendiculaires aux parois latérales. Le déclenchement simultané de chaque acquisition est effectué de manière autonome en prenant en compte la distance au parement, le cône de visée de chaque appareil photo et la valeur d'avancement du système dans le tube.

Une attention particulière a été portée au niveau du système d'éclairage. Un système d'éclairage continu a été privilégié afin de minimiser la gêne potentielle d'un éclairage de type « flash » pour les véhicules et opérateurs se trouvant à proximité du système.

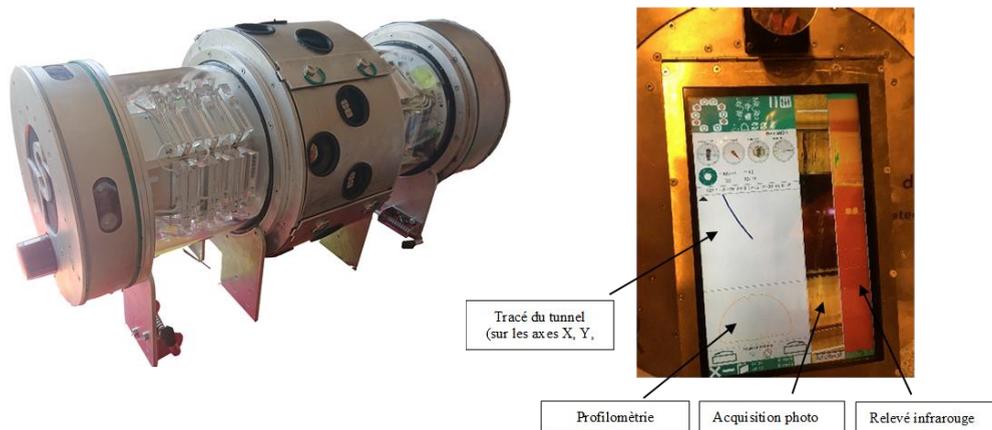


FIGURE 4. Module d'éclairage et d'acquisition **FIGURE 5.** Ecran d'affichage des données d'acquisition en temps réel

Une interface a été développée afin de permettre le contrôle des données pendant l'acquisition. Cette interface permet également, grâce aux différents capteurs implémentés, la détection sur site de zones de désordres ou de doutes sur l'état de l'ouvrage, générant automatiquement une liste de réserves paramétrable et identifiable directement sur site par sondages au parement, en parallèle à

la phase d'acquisition, afin de profiter des créneaux en place de balisage ou de fermetures de la voie et de limiter la multiplication d'interventions.

B. Fonctions

Acquisition domaine visible :

Ces appareils photographiques de haute définition permettent le contrôle de l'état de surface du parement dans le domaine visible. L'acquisition en qualité photo garantit notamment de détecter des fissures jusqu'à des ouvertures comprises entre 0,3 et 0,5 mm.

Acquisition domaine thermographique :

Ces caméras vont permettre l'acquisition thermographique de l'ensemble de l'intrados permettant ainsi de déceler de manière précise et en temps réel, l'étendue des différentes zones humides et venues d'eau mais également de pouvoir détecter par variation de température les éventuels décollements de revêtement tels que les écailles de béton projeté en formation.

Scanner 2D :

Ce dernier va permettre le relevé profilométrique transversaux de la totalité du linéaire de l'ouvrage permettant ainsi de déceler les différents « hors » et « en » profil et la création du squelette tridimensionnel.

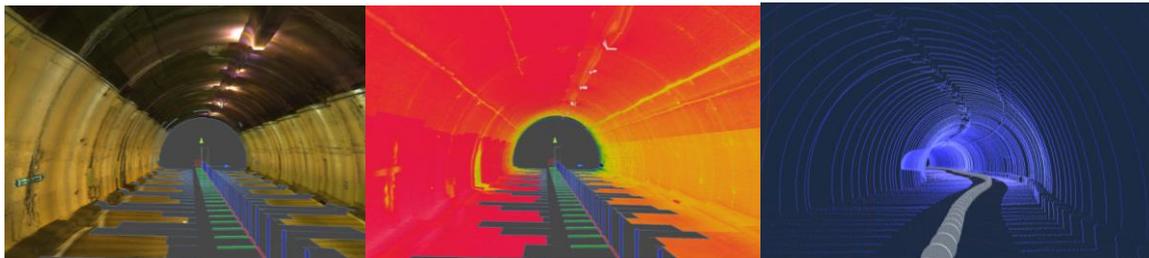


FIGURE 6/7/8. Acquisition photo HD / Acquisition infrarouge / Relevé profilométrique

C. Mode opératoire

Cette technologie consiste à parcourir en un seul passage l'intrados d'un ouvrage à une vitesse comprise entre 1 et 3 km/h limitant ainsi le nombre de coupures de nuit.

La lecture en temps réel et un système d'alerte basé sur des différences de températures, permettent d'identifier (à l'aide de la thermographie notamment) les zones pouvant représenter un doute sur certains désordres. La présence d'un inspecteur confirmé pendant l'acquisition permet d'arbitrer ces alertes mais également de les lever en accédant (au moyen d'une nacelle) au contact des parties d'ouvrage concernées. La présence de l'inspecteur permet également d'inspecter les zones non accessibles par les moyens automatisés (têtes, inter-tubes, réseau de drainage, zone d'influence) et qui font partie intégrante des constats dans le rapport d'inspection détaillée. A l'issue de l'intervention sur site, les inspecteurs ont donc l'ensemble de l'acquisition photographique dans le domaine visible et infrarouge de l'intrados de l'ouvrage et ont levé la totalité des zones de doutes qu'ils auraient eu s'ils n'avaient eu recours qu'au moyen d'acquisition scanner. La qualité des supports photographiques et thermographiques permettra à l'inspecteur, une fois hors site, de finaliser les constats de l'intrados et de réaliser les cartographies des désordres sur un support Autocad. Les rendus seront conformes aux attendus du cahier des charges présentés dans le

fascicule 40 [CETU, 2012] de l’instruction technique (fiche signalétique de l’ouvrage, les constats, la cotation IQOA, les suites à donner, un reportage photographique, cartographie des désordres).

Identification des zones de levées de réserves

La pertinence des identifications des zones de levées de réserve est primordiale dans le process de la Nouvelle Technologie car cela permet de se conformer aux exigences de l’ITSEOA en inspectant au contact du parement, uniquement les zones pouvant représenter un risque pour la pérennité de la structure ou la sécurité des usagers. Ainsi, la Nouvelle Technologie a rempli son rôle en proposant plusieurs outils efficaces pour permettre le relevé de désordres fréquemment présents en tunnel, mais également d’identifier des désordres moins évidents et pourtant plus impactant à court terme sur la structure.

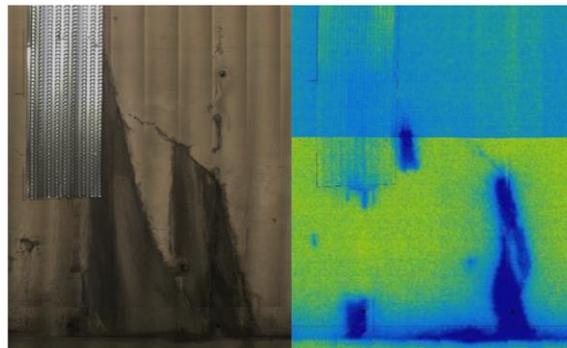


FIGURE 9. Localisation d’une fissure biaise depuis le relevé photographique et zonage précis de l’impact lié à l’eau au droit de cette zone

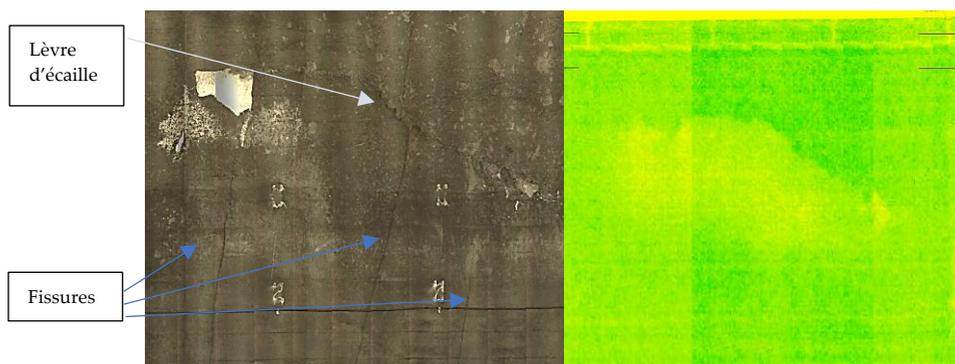


FIGURE 10. Localisation de multiples fissures et ce qui semble être une lèvre d’écaillage depuis le relevé photographique avec décoloration thermographique laissant supposer un défaut d’adhérence

L’analyse de ces données directement sur site permet de localiser pendant l’avancement du module, les zones devant faire l’objet d’une levée de réserve à savoir auscultation visuelle et au marteau, au contact du parement.

Levée de réserves

Les zones de levées de réserves sont localisées en Points Métriques ou par rapport aux plots de bétonnage. L’accès au contact du parement se fait au moyen de nacelles semblables à celles utilisées

pour les inspections détaillées traditionnelles. Cette phase du processus consiste à enlever le moindre doute de l'inspecteur concernant l'état de la structure de l'ouvrage.

Ainsi, le doute émis concernant la zone identifiée dans la figure 10 a pu être confirmé dans la continuité de l'acquisition en mettant en évidence un désordre structurel.



FIGURE 11. Auscultation au marteau mettant en évidence des écailles de béton en formation et un vide d'extrados

Ce procédé de levée de réserves réalisé par des inspecteurs expérimentés dans la continuité de l'acquisition photographique et thermographique a permis d'identifier un désordre pouvant présenter un risque pour les usagers et de mettre en place instantanément les mesures conservatoires adaptées.

Identification des désordres sur supports photographiques et thermographiques

Une fois l'acquisition photographique, thermographique et les levées de réserves réalisées, l'opérateur NT peut au bureau, démarrer l'analyse de données et l'identification des désordres. Pour ce faire, il va utiliser les deux supports d'acquisition afin de corrélérer toutes les informations permettant de restituer une cartographie des désordres la plus précise possible. En reprenant la zone de désordres de la figure 9, on peut constater la complémentarité des différents supports permettant la production d'une cartographie conforme à l'ITSEOA.

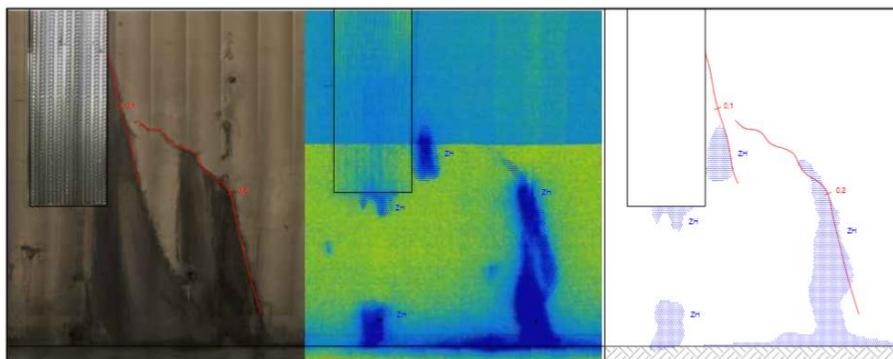


FIGURE 12. Identification des différents désordres présents sur zone au moyen des supports photographiques et thermographiques – production de la cartographie conforme à l'ITSEOA

Rendus

Les rendus cartographiques sont identiques à ceux produits dans le cadre d'une inspection détaillée traditionnelle. Il est également possible de produire les cartographies de désordres en intégrant soit le support photographique, soit le support thermographique.

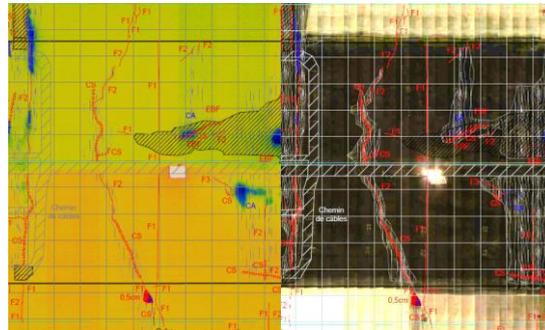


FIGURE 13. Identification des différents désordres présents sur zone au moyen des supports photographiques et thermographiques – production de la cartographie conforme à l'ITSEOA

IV. Conclusions

Les campagnes d'inspection détaillée au moyen de la Nouvelle Technologie réalisées entre 2018 et 2022 ont permis un retour d'expérience permettant de positionner ce nouveau process d'inspection détaillée par rapport aux méthodes existantes.

Technologie	Avantages	Inconvénients
IDP NT	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition de l'image de la totalité de la surface de revêtement, • Rapidité d'acquisition/faible impact sur l'exploitation, • Relevé thermographique, • Détection des zones potentiellement sensibles en temps réel, • Intervention ciblée au contact du parement dans la continuité de l'acquisition • Possibilité de sécuriser l'ouvrage par purge au marteau si nécessaire, • Réalisée par des inspecteurs qualifiés : Degré de précision permettant une analyse exhaustive des désordres et une bonne qualité des rapports d'inspection, • Inspection de toutes les parties d'ouvrages y compris têtes, assainissement, zone d'influence, 	<ul style="list-style-type: none"> • Contact avec le parement ciblé donc partiel, • Fichiers de traitement pouvant être volumineux • Temps de traitement bureau pouvant être long en fonction du volume de données à traiter

Les contraintes d'exploitation de plus en plus fortes ont conduit les professionnels de l'inspection d'ouvrage à s'adapter, et à proposer des solutions innovantes afin de minimiser l'impact de ces inspections sur l'exploitation. Néanmoins, il est primordial de conserver la nature même d'une inspection détaillée à savoir, la connaissance la plus complète de l'ensemble de l'ouvrage à un instant T. Cette connaissance ne peut s'acquérir sans du personnel compétent et expérimenté, et sans une auscultation au contact des parties d'ouvrages les plus sensibles. Au-delà d'une nouvelle technologie, l'IDP NT est avant tout un ensemble de process impliquant outils technologiques, retour d'expérience et organisation. Les outils technologiques ne sont que des supports aux inspecteurs d'ouvrage permettant, d'orienter leur expertise sur des zones pouvant remettre en cause la pérennité de la structure ou la sécurité des usagers au milieu d'une surface de revêtement extrêmement vaste.

REFERENCES

CETU (2012). Fascicule 40 : Tunnels Génie civil et équipements. *Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.* https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/itsea_fascicule_40_2012_tunnels_gc_et_equipements_cle7ffa23.pdf

CETU (2015) Guide de l'inspection du Génie civil des tunnels routiers. *Livre 1 : du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation.* https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_Livre1_Guide_Methodologique_Janvier2015.pdf

Géotopo. Modèle d'acquisition par scanner topo. <https://www.geotopo.fr/43-scanners-3d>

Spacetec. Modèle d'acquisition scanner. <https://www.spacetec.de/en/products/>

Doreau-Malioche, J., Paillette, F., Larive, C. (2021) Revue Tunnels & espaces souterrains n°278. *Nouveaux outils d'inspection du génie civil des tunnels : quelles performances et quel mode d'emploi ?*