

Original Article**Utilisation De Systèmes D'aéronefs Télépilotés Pour L'inspection D'anciennes Constructions****Using Remotely Piloted Aircraft Systems for Old Construction Inspections****Rodríguez Elizalde, Rubén****Universitat Oberta de Catalunya Professeur Responsable des Matières de Prévention des Risques Professionnels Doctorat en Architecture et Patrimoine et Master Prévention des Risques Professionnels****Corresponding Author: Rodríguez Elizalde, Rubén****Abstract**

L'utilisation d'aéronefs sans pilote (SATP/RPAS), plus connus sous le nom de drones, s'est répandue ces dernières années avec des applications multiples et très diverses. Parmi elles figurent les inspections d'éléments du patrimoine architectural, de constructions uniques et de structures anciennes ou fragiles. Cet article est basé sur une inspection principale détaillée, effectuée sur un pont médiéval situé à côté d'un autre pont du 19^{ème} siècle qui supporte actuellement le trafic routier. Cette inspection était purement expérimentale. Avec l'achèvement de celui-ci et les informations obtenues, il sera possible d'évaluer si l'avion peut servir d'outil de qualité pour effectuer le travail qui est actuellement effectué avec du personnel qualifié, le transport et l'installation de moyens auxiliaires encombrants et un investissement économique et temporel élevé, en particulier dans la planification minutieuse des travaux.

Keywords: Drones, RPAS, Inspection, Construction Ancienne, Pont Médiéval**Introduction:**

Le 7 juillet 2022, l'auteur de cet article a participé à une inspection principale détaillée du viaduc avec d'autres professionnels, dans le but exclusivement expérimental de vérifier l'applicabilité des drones pour effectuer ce type d'inspection.

En fait, cette intervention était basée sur la conviction de l'auteur (et la conviction des techniciens qui l'ont aidé) que l'inspection des structures est fondamentale, car elle permet d'obtenir les données nécessaires pour connaître l'état fonctionnel, résistant et esthétique d'une structure à un temps donné. Dans le même temps, en utilisant un drone, le travail est également beaucoup moins cher, plus rapide et plus sûr pour les travailleurs.

Une inspection repose fondamentalement sur le contrôle, la caractérisation et la surveillance de l'ouvrage dans son ensemble et de chacun des différents éléments qui le composent. Selon la nature et l'étendue du contrôle effectué, ce contrôle peut être accompagné d'essais complémentaires au diagnostic réalisé par contrôle visuel.

Comme l'inspection a été effectuée en Espagne, les critères du ministère espagnol ont été pris en compte [1] [2]. De toute évidence, il existe de nombreux autres critères de classification suivis par de nombreuses autres institutions et organisations qui pourraient être appliqués à cette fin [3] [4] [5]. Ainsi, les différents types d'inspection inclus dans les différents guides élaborés par le ministère espagnol des Travaux

publics (Ministerio de Fomento) pour inspecter la structure des étapes du réseau routier sont les suivants [1]:

1. Inspection de routine. Il s'agit d'une inspection de base effectuée par du personnel non qualifié. Ce personnel provient généralement de l'entreprise qui entretient l'ouvrage (plus précisément, la route empruntée par l'ouvrage). Selon le Guide [1] [2], ces inspections sont réalisées sur tous les ouvrages d'une portée de 1,00 m (ou plus, bien entendu). Son objectif est de surveiller adéquatement l'état de l'ouvrage et ainsi de détecter au plus tôt les défaillances apparentes. Si ces pannes ne sont pas détectées et corrigées à temps, elles pourraient générer des coûts de réparation importants..
2. Inspection principale. Ce type d'inspection est plus approfondi que l'inspection de routine; cependant, bien qu'il soit encore essentiellement visuel. Elle doit comprendre l'examen de tous les éléments visibles de la structure. Cela implique la nécessité éventuelle d'utiliser des moyens d'accès auxiliaires. Par conséquent, en fonction de sa complexité, l'inspection principale est subdivisée en deux catégories possibles [2]:
 - A. Inspection principale générale. Cette inspection consiste en une observation visuelle détaillée de chaque élément visible, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des aides d'accès extraordinaires. En d'autres termes, des moyens plus complexes et plus coûteux que, par exemple, une échelle manuelle pour grimper.
 - B. Inspection principale détaillée. Dans cette inspection, contrairement à la précédente, il est essentiel d'utiliser des moyens d'accès extraordinaires qui permettent l'inspection de toutes les parties visibles. En ce sens, il faut faire la différence entre accessible et visible: un élément peut être visible et non accessible ou difficilement accessible.
3. Inspection de routine. Ce type d'inspection, contrairement aux autres, n'a pas à être fait systématiquement. Ce type d'inspection survient généralement à la suite d'un dommage détecté lors d'une inspection principale ou, exceptionnellement, à la suite d'une situation unique. Lors de ces inspections, en plus de

l'examen visuel que nous avons mentionné ci-dessus, nous avons besoin de tests et de mesures supplémentaires, avec des techniques et des équipements spéciaux. Ce niveau de reconnaissance nécessite un plan préalable à l'inspection, détaillant et évaluant les aspects à étudier, les techniques et les moyens à utiliser.

Il convient de noter que les critères de classification précédents ont été étendus à d'autres domaines que les structures routières [6] [7] [8]. Pour cette raison, il a été décidé de le présenter ici comme point de départ.

D'autre part, le concept de drone, d'aéronef sans pilote à bord, de véhicule aérien sans pilote (VASP/UAV) ou encore de système d'aéronef télépilote (SATP/RPAS) a également émergé il y a quelques années. Tous sont synonymes; ils font tous référence à des drones; tous se réfèrent à des aéronefs pouvant être contrôlés par le pilote à distance ou pouvant être programmés, étant complètement autonomes.

L'ajout d'accessoires à ces aéronefs, tels que des caméras d'enregistrement ou de capture d'images haute résolution, et le développement de microtechnologies de plus en plus précises et abordables [9] ont ouvert la porte à la possibilité d'intégrer des drones pour effectuer ces inspections pendant quelques années. Ces derniers temps, il y a eu de nombreuses avancées dans le génie civil et cela a conduit à l'incorporation de drones aux inspections encadrées dans la classification précédente.

Ainsi, pour réaliser l'inspection que nous allons analyser ici, un drone a été utilisé. Ainsi, puisque l'inspection était exclusivement visuelle et qu'un drone était utilisé comme moyen auxiliaire (si nous n'avions pas utilisé le drone, nous aurions dû utiliser des moyens d'accès extraordinaires pour pouvoir analyser certains éléments de la structure), selon le classement précédent, le contrôle que nous allons présenter ici était une inspection principale détaillée.

Matériels Et Méthodes

Le pont inspecté était le «Puente del Grajal» (Fig. 1). C'est un Pont situé aux coordonnées suivantes:

- Latitude: 40° 31' 9.12" N
- Longitude: 3° 47' 20.8" O

Le pont a plus de mille ans: il a été construit au Moyen Âge, pendant la domination musulmane de la Péninsule Ibérique. Entre le IX^e et le XI^e siècle, le pont faisait partie d'une route militaire du royaume andalou musulman, qui reliait deux postes frontières d'une grande importance

défensive [11] [12]. Il est possible que son origine d'origine soit romaine et qu'elle ait été associée à une voie romaine secondaire avec un développement en travers qui traversait l'endroit où le pont a été construit [13].



Figure 1: Photographie prise avec le drone utilisé dans l'inspection, où l'on peut voir le pont médiéval de Grajal, élévation nord, avec le pont du XIX^e siècle derrière (photographie de l'auteur).

C'est un pont construit en maçonnerie de granit. Seuls les voussoirs de la voûte et le contour de l'arc sont en pierre de taille régulière (Fig. 3), contrairement à la maçonnerie du mur extérieur et à la maçonnerie du parapet.

Il est configuré en arc en plein cintre, d'une portée de 10 m. Le tablier mesure 3,34 m de large. Cette largeur équivaut à 6 coudées rassassies, une des mesures les plus utilisées dans les ponts islamiques. Il conserve encore le pavage d'origine de grandes dalles de pierre situées dans un profil

typique en "dos d'âne" (avec une arête surélevée) caractéristique du Moyen Âge [14].

Le pont est fondé directement sur le rocher et est parfaitement conservé.

Le Pont a été remanié au XVIII^e siècle, par une opération qui en a légèrement modifié l'aspect. Il a été récemment restauré après, en 2013 [15].

En raison des limitations du pont, en 1895 [11] [12] un autre pont à une arche beaucoup plus moderne a été construit, à côté du premier, en aval (Fig. 1). Ce nouveau pont favorise la circulation des véhicules sur la route sus-jacente (Fig. 2).

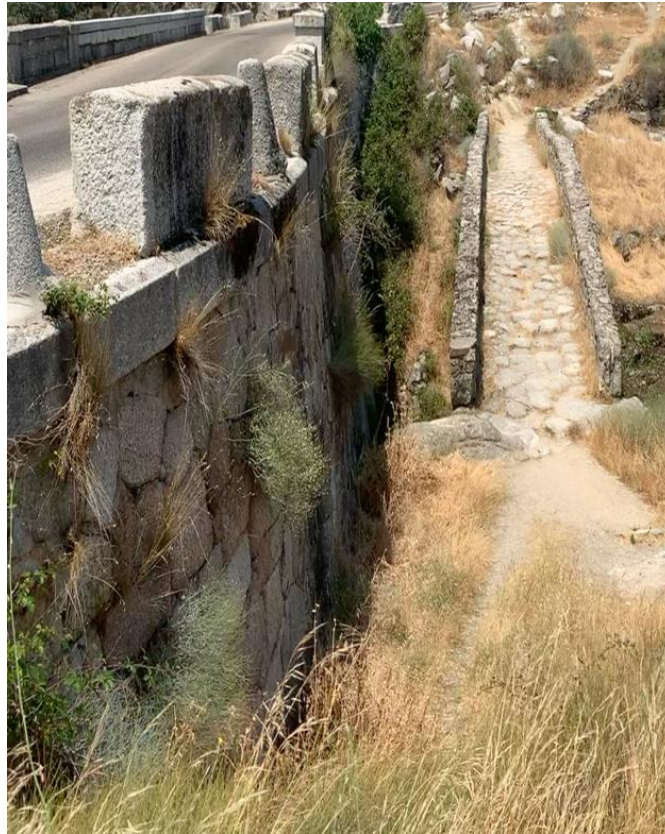


Fig. 1: Chaussée sur le pont médiéval (à droite) et chaussée sur le pont du XIXe siècle (à gauche). L'image donne une idée de la séparation entre les deux ponts (photographie de l'auteur).

Il existe aujourd'hui de nombreux types de drones très divers [16]. Par conséquent, il est très important de connaître dans chaque cas le type de drone le plus adapté à chaque situation. Parmi tous les critères de classement, le plus intéressant pour nous est celui qui porte sur la forme d'accompagnement de l'équipe dans les airs. Ainsi, on distingue les drones à voilure fixe et les drones à voilure tournante. Il ne fait aucun doute qu'un drone à voilure fixe présente de grands avantages qui le rendent adapté à une multitude d'applications [17]. Cependant, son incapacité à effectuer un décollage vertical et à maintenir une position stable dans les airs le rend inadapté à l'inspection de constructions anciennes (sauf si nous avons besoin d'imager de grandes surfaces, ce qui est très rare). Pour cette raison, le drone utilisé pour les travaux analysés ici est le plus souvent un drone à voilure tournante, et plus précisément multirrotor [18]: ce sont des drones à hélices multiples (toujours par paires) qui décollent verticalement et peuvent tourner sur

eux-mêmes. Cela les rend idéales pour effectuer des travaux verticaux et maintenir une certaine position fixe suspendue dans les airs, pour permettre une analyse précise.

L'existence d'un courant fluvial, la rivière Manzanares, les dimensions géométriques du pont et l'inaccessibilité de certaines zones du pont, ont fait du pont Grajal une structure parfaite pour vérifier la validité de l'utilisation du drone multirrotor pour l'inspection d'un construction patrimoniale. De plus, si l'on considère la beauté, la pertinence, la valeur historique et patrimoniale du Pont, l'inspection effectuée a encore plus de valeur.

Pour cette raison, un drone quadricoptère a été utilisé pour l'inspection. Il a pu approcher des zones visibles mais non accessibles du pont, réalisant une capture photographique des observations les plus remarquables faites pendant le vol. Ensuite, on voit le drone à quatre hélices utilisé s'approcher du pont (Fig. 3), pour analyser les points de construction les plus intéressants.



Fig. 3: Drone s'approchant du Pont Médiéval pour inspection (photo de l'auteur)
Résultats / Observations

Une fois l'inspection commencée, la première chose a été d'analyser la fondation [19]. Le drone nous a permis de nous en approcher, car ici il était partiellement visible (Fig. 2). Ainsi, nous avons pu vérifier que les culées du pont reposent sur un socle en granit, matériau identique à celui qui compose la maçonnerie du pont [19].

La fondation et la base de la voûte étaient en bon état (Fig. 2). Le drone a été utile pour une inspection visuelle détaillée de la fondation (au moins, la partie visible). Grâce à cela, nous avons

pu vérifier que le pont est effectivement fondé directement sur le roc solide. C'était la procédure habituelle au Moyen Âge [20]. De plus, avec la technologie incorporée, l'avion peut estimer le type et les dimensions de l'élément de fondation et nous aider avec d'autres opérations importantes dans ce type de structure, telles que l'estimation approximative du type de terrain, l'estimation du profil longitudinal de la lit de la rivière, estimation de la section en amont et en aval du pont, détermination du degré de propreté du chenal et implantation des éléments de traînée dans celui-ci.



Fig. 2: Photographie prise avec le drone, où l'on voit les fondations de la culée Est du Pont Médiéval (photographie de l'auteur).

Après avoir analysé la fondation, nous continuons avec l'inspection structurelle du reste des éléments. Le point le plus intéressant était la voûte intrados. L'intrados est intéressant à cause des dégâts qu'on y trouve et il l'est aussi à cause de son inaccessibilité. Pour effectuer une inspection visuelle complète de l'intrados, il faudrait entrer dans la rivière, nager ou naviguer sur un bateau. Mais dans aucun de ces cas, le niveau d'approche du sommet que le drone permet d'atteindre n'a pu être atteint.

Le granit constitutif du monument présente des altérations dans l'intrados, dues à la synergie d'actions de nature diverse: phénomènes de nature chimique et phénomènes de nature biologique. Ainsi, on observe diverses formations de croûtes noires, notamment dans les pierres de taille extérieures (Fig. 3 y Fig. 4), vraisemblablement liées à l'action des agents contaminants et surtout à l'humidité de la rivière. On sait que ce pont a été restauré à plusieurs reprises : la dernière en 2013 [15]. L'utilisation de mortier de chaux lors de la dernière restauration aurait pu augmenter ces dégâts.

En plus des croûtes sombres, on peut voir des taches de noircissement. Ces dommages sont également caractéristiques des éléments structuraux exposés à une humidité élevée. Ces

souillures résultent de l'action conjointe de l'eau (humidité), de la cristallisation des sels apportés par les agents contaminants et des maçonneries granitiques [21].

L'inspection a permis de localiser des efflorescences dans la zone centrale de la voûte de l'intrados. C'étaient ces taches blanchâtres que l'on peut observer (Fig. 3 y Fig. 4). Les efflorescences apparaissent généralement autour des zones où il y a également une forte concentration d'humidité. Dans ce cas, la cause de l'efflorescence semble également liée à l'utilisation de mortier de chaux [21]. Ainsi, chaque microfissure apparaissant sur les joints de mortier de chaux peut devenir une porte ouverte pour l'accès de l'eau à l'intérieur de la maçonnerie. Comme le pont se trouve dans un environnement humide, il y a beaucoup plus d'eau et, par conséquent, la quantité d'eau qui pénètre dans la maçonnerie par le joint est plus importante [22].

Cet accès à l'eau peut être antérieur à une attaque ultérieure par les sels et la glace [21]. Nous avons détecté de la végétation enracinée dans de nombreux points communs du pont (Fig. 5). C'est la meilleure preuve que ces microfissures existent dans les joints de mortier. Le plus curieux de tout, c'est que ce mortier servait à

restaurer sûrement pour empêcher les plantes de s'enraciner entre les maçonneries [22].

Il faut se rappeler que les croûtes et surtout les efflorescences sont le résultat de la cristallisation des sels. Ces sels ont tendance à s'agglutiner autour des points où se produisent de fortes concentrations d'humidité. Cette anomalie est produite par la cristallisation des sels solubles, dissous dans le système poreux granitique [21]. Le drone a été efficace pour détecter les efflorescences ainsi que pour détecter d'éventuelles sources de sel [23] (provenant de la maçonnerie elle-même ou d'agents extérieurs - pollution, matériaux d'interventions antérieures, etc.).

Dans la partie haute du Pont intrados, outre les

dégâts précités, nous avons découvert, grâce au drone, le cloquage et le sablage de plusieurs voussoirs (Fig. 5). Ce processus d'alvéolisation est directement lié aux processus précédents : l'humidité et les sels peuvent également provoquer cette détérioration. Généralement, celle-ci apparaît au confluent des cours d'eau intérieurs (de l'extrados à l'intrados, en passant par le remblai, du fait d'un mauvais drainage) avec l'action érosive du vent [22]. Par conséquent, ils sont situés dans des zones exposées où l'humidité s'accumule, comme c'est la clé de la voûte. Là, les voies de sortie des eaux intérieures et la surface de dessiccation se rejoignent. Une fois le processus enclenché, les tourbillons de vent dans la cavité l'accélèrent [21].

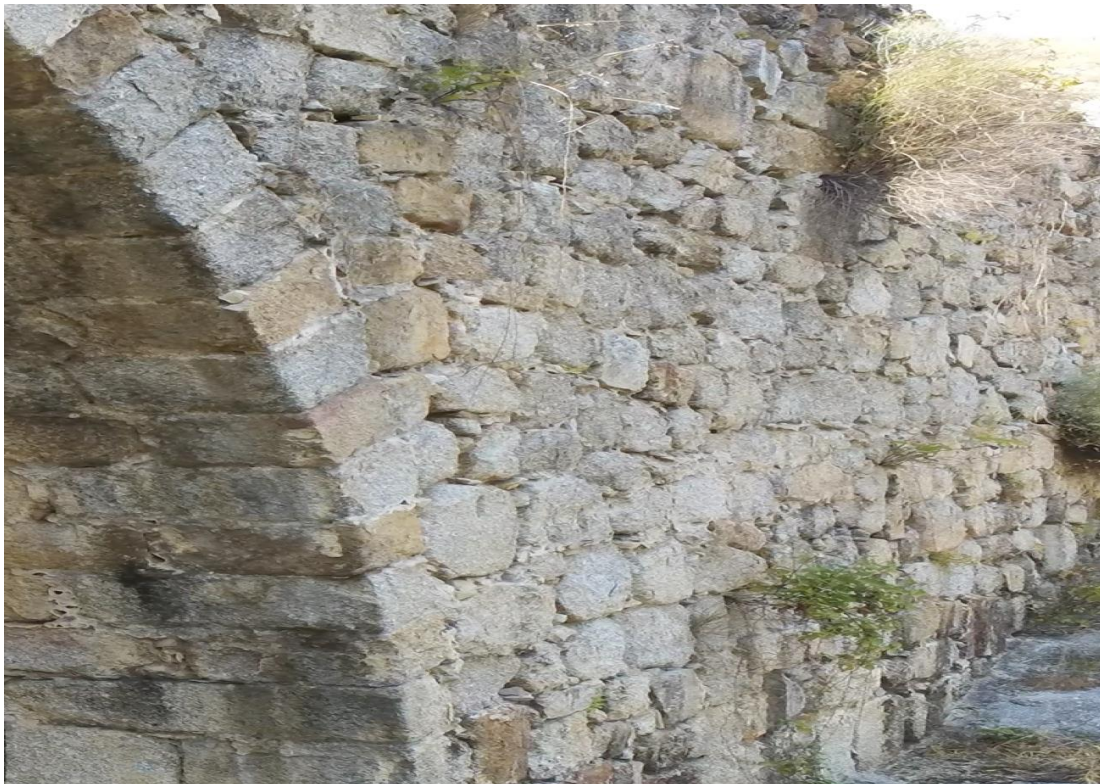


Fig. 3: Image prise avec le drone quadricoptère au départ ouest de la voûte, où différentes lésions peuvent être observées, comme des efflorescences ou des croûtes foncées (photographie de l'auteur).



Fig. 4: Image capturée avec le drone quadricoptère à l'entrée Est de la voûte, où différentes lésions peuvent être observées, telles que des efflorescences ou des croûtes sombres (photographie de l'auteur).



Fig. 5: Image prise au drone quadricoptère dans l'intrados de la partie supérieure de la voûte, où en plus des lésions précédentes (Fig. 3 y Fig. 4) on a observé la vésiculation des pierres de taille (photographie de l'auteur).



Fig. 6: Image capturée avec le drone quadricoptère, où l'on voit de la végétation (un figuier) enracinée dans les joints de la maçonnerie (photographie de l'auteur).

Parallèlement à ces dégâts, on observe la présence abondante de biocolonies (plantes). Ils ont poussé en prenant racine dans les joints qui sont disposés entre la maçonnerie, en particulier dans les joints de points anguleux (Fig. 6). Cette végétation se répercute sur les phénomènes d'humidité, d'efflorescence et de ruissellement, comme en témoignent les taches observées (par exemple, les taches noires que nous avons observées sur le mur de parapet, **Error! Reference source not found.**). Une attention particulière doit être apportée à la végétation, surtout les plus grosses, en raison de l'action des racines des arbres et autres plantations sur l'usine [22]. Le drone peut nous aider à contrôler l'apparence de la végétation et la croissance des plantes.

Les dommages précédemment perçus ne sont pas des dommages structurels. Ce sont des dommages liés à la durabilité des matériaux qui composent la construction. En d'autres termes, ce ne sont pas des blessures qui affectent l'intégrité du monument, du moins à court terme. Cependant, ce sont des blessures qui peuvent entraîner des dommages plus graves si elles continuent à se développer. Preuve en sont les voussoirs en grès.

Lorsque nous parlons de dommages liés à la

durabilité du matériau qui compose un élément, nous nous référons aux dommages qui résultent de l'interaction d'un matériau détérioré avec les conditions environnementales imposées par celui-ci. En d'autres termes, la durabilité du matériau doit être comprise comme la capacité du matériau à résister à l'action de l'environnement. Il comprend toutes les attaques chimiques, physiques et biologiques, ou tout autre processus environnemental tendant à détériorer le matériau.

La présence d'efflorescences indique deux aspects importants [21] [22] : le premier, dans certaines maçonneries, un processus de dégradation chimique est en cours, en principe peu dangereux. Le second d'entre eux, des contraintes mécaniques internes importantes dues à la cristallisation du sel peuvent être générées, selon le système poreux de la maçonnerie. Le drone peut nous aider, par des inspections ultérieures, à étudier de telles pathologies.

Lorsque deux (ou plusieurs) bâtiments anciens et patrimoniaux sont rapprochés, ils sont faits des mêmes matériaux. Cela est dû aux limitations de transport qui existaient dans le passé. Ce fait a rendu cette construction particulièrement intéressante : le pont du XIXe siècle érigé à côté

du pont médiéval, avec des matériaux identiques, aurait dû subir les mêmes dégradations, quoique dans une moindre mesure.

En effet, le drone a permis de corroborer ce qui précède. La voûte du pont du XIXe siècle présentait les mêmes blessures, bien qu'avec une intensité différente (Fig. 7): croûtes noires, traces d'eau de ruissellement et efflorescences. Sur les murs, il y avait aussi des croûtes noires et des

traces d'eau de ruissellement, en synergie avec la végétation enracinée dans les joints entre les pierres de taille (Fig. 8). La seule lésion de ce pont, qui n'était pas incluse dans l'ancien Pont, était une lésion de vandalisme anthropique : un graffiti sur le mur de la culée est (en bas à gauche de la Fig. 7). C'est un dommage à prendre en compte, compte tenu des dégradations causées par les produits de graffitis [23].



Fig. 7: Image capturée avec le drone quadricoptère dans l'intrados de la voûte du nouveau pont, avec des lésions identiques à celles du pont médiéval observées : efflorescences ou croûtes sombres (photographie de l'auteur).



Fig. 8: Image capturée avec le drone quadricoptère, où l'on voit un détail de la culée ouest, avec de la végétation enracinée, des croûtes noires et des traces d'eau de ruissellement (photographie de l'auteur).

Discussion

Les sections précédentes ont exposé la réalisation d'une visite technique de reconnaissance sur un Pont Médiéval. Les inspections de routine ou inspections principales, notamment les inspections principales détaillées, nécessitent un contrôle visuel, par un opérateur spécialisé, de tous les éléments visibles de l'ouvrage, qu'ils soient accessibles ou non. Cette condition d'inaccessibilité peut conduire à la nécessité d'utiliser des moyens d'accès extraordinaires, qui garantissent l'inspection de chaque partie visible (Fig. 9).

Ces moyens d'accès sont encombrants, difficiles à transporter, économiquement coûteux et, ce qui est encore plus important, leur utilisation présente toujours un risque pour la sécurité du travailleur qui doit les utiliser ou grimper dessus pour accéder à ces parties du monument. qui, bien que visibles, sont plus difficiles d'accès. En effet, les inspections visuelles des structures, lorsqu'elles sont effectuées directement par le personnel,

nécessitent généralement l'utilisation d'équipes de travail mobiles qui déplacent les personnes vers une certaine position, ce qui permet d'effectuer l'inspection.

L'utilisation de ces moyens auxiliaires implique la coexistence de travailleurs avec des risques tels que la chute au même niveau ou, surtout, à un niveau différent, le renversement de l'équipement, la chute de matériaux sur des personnes ou des biens, des coups, des chocs ou un coincement de l'opérateur. ou de la machine elle-même contre des objets fixes ou mobiles ; coincement entre l'une des pièces mobiles de la structure de la machine et entre celle-ci et le châssis, pour ne citer que quelques exemples. Pratiquement tous ces risques disparaissent lorsque les inspections sont réalisées avec des drones, le cas de chute de hauteur étant particulièrement significatif à cet effet, car il est inutile pour tout opérateur d'avoir accès à ce type de moyens auxiliaires ou de devoir descendre pour accéder à des points complexes. Outre serait les dommages qui peuvent être causés au monument.

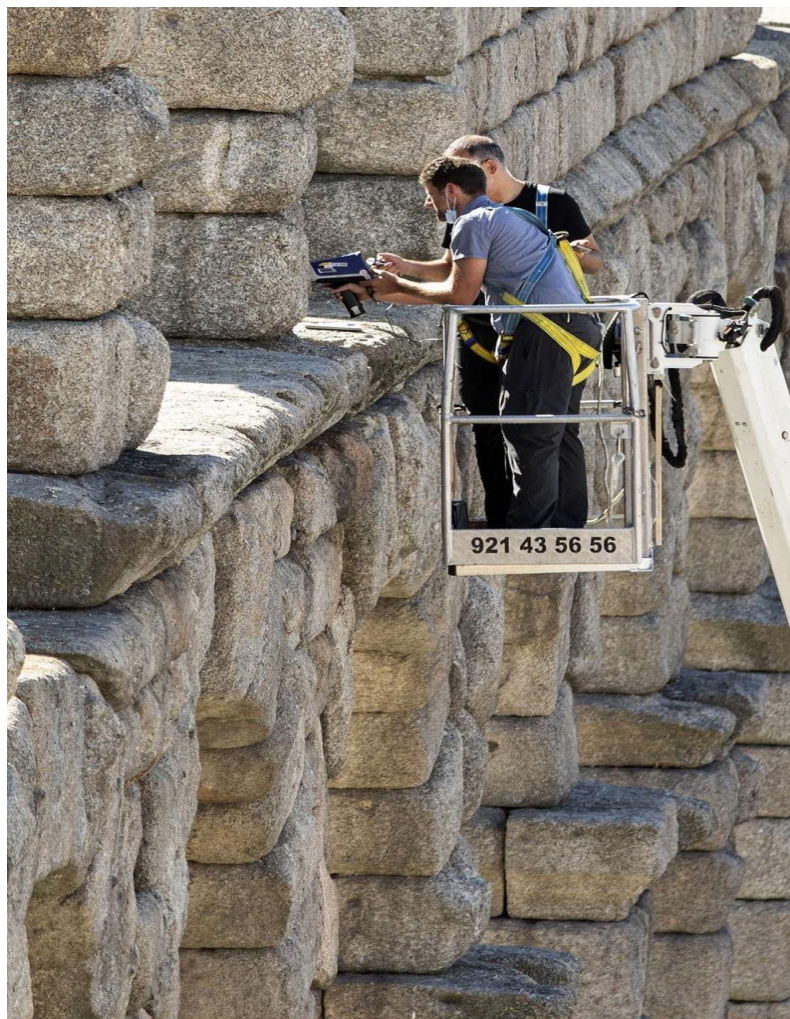


Fig. 9: Image d'une inspection de contrôle (inspection spéciale) de l'aqueduc de Ségovie : deux ouvriers de l'Institut géologique et minier espagnol (IGME) prélèvent des données sur le granit qui compose les pierres de taille pour sa caractérisation géochimique (photographie de Rosa Blanco [25]).

Conclusions Et Futurs Axes De Recherche

Grâce à l'inspection visuelle effectuée avec le drone, nous avons pu avoir un reportage photographique complet de tous les éléments visibles du Pont. Ce reportage photographique nous a permis de diagnostiquer toutes les blessures subies par le viaduc. Heureusement, aucune de ces lacunes n'est grave et il n'y a aucun danger pour la sécurité du monument. Les photographies peuvent maintenant être stockées et utilisées comme référence pour une inspection future. Avec les photographies des inspections futures, nous pourrions analyser l'évolution des dommages détectés ou diagnostiquer l'apparition de nouveaux dommages.

Les résultats de l'inspection ont montré que l'utilisation d'un drone approprié permet une observation visuelle parfaitement détaillée de tous les éléments visibles, accessibles et non accessibles, qui forment une construction patrimoniale, telle que Puente del Grajal. Avec cet outil, il n'a pas été nécessaire de recourir à des moyens d'accès extraordinaires, comme s'ils auraient été nécessaires si le drone n'était pas disponible.

Par conséquent, sur la base de l'expérience recueillie ici, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

1. Le drone simplifie le travail de planification, car il réduit la planification et l'acquisition de moyens d'accès auxiliaires.
2. Le drone simplifie le travail de terrain, pour l'identification et l'évaluation des dégradations de chacun des éléments constitutifs du monument.
3. On peut travailler plus vite grâce aux deux simplifications précédentes.
4. Le drone réduit beaucoup de risques pour les agents de sécurité qui doivent collaborer aux inspections. Il faut penser au danger inhérent à l'utilisation de certains moyens auxiliaires pour accéder à certains éléments de structure : avec un drone, aucun travailleur ne doit, par

exemple, s'exposer au risque de chute de hauteur.

5. Les quatre points précédents justifient une économie économique considérable, qui n'implique pas une diminution de la qualité du travail.

Avec les données collectées avec le drone, comme cet article l'illustre, nous pouvons générer un rapport technique complet de l'inspection principale dans l'armoire. De plus, nous pouvons également fournir les informations pertinentes pour son intégration dans un éventuel système de gestion et obtenir les indices d'état de chaque élément et de l'ensemble de la construction dans son ensemble. Avec cela, nous pourrions évaluer si un certain type d'action urgente est nécessaire ou si, comme dans ce cas avec pratiquement toutes les blessures détectées, un contrôle périodique des dommages détectés est suffisant pour l'instant.

Les drones, à leur tour, sont une nouvelle technologie et également en cours de développement. Ils intègrent de nouveaux accessoires qui augmentent leurs utilités. Certaines d'entre elles permettent de leur donner de nouveaux usages qui ouvrent des voies de recherche futures. Ainsi, par exemple, on peut utiliser des drones pour des relevés photogrammétriques ou pour des inspections thermographiques.

La thermographie est une autre technique que nous pouvons également utiliser pour détecter d'éventuels défauts dans les vieux ponts, comme le Puente del Grajal. Il est intéressant par les informations qu'il apporte et parce qu'il n'a pas besoin de toucher le matériel et donc ne l'abîme pas. La thermographie infrarouge permet, grâce au rayonnement infrarouge émis par les corps, de mesurer la température de surface, et ainsi de détecter les dommages.

Ensuite, on peut voir l'analyse thermographique de l'intérieur d'une voûte d'un pont en arc maçonné (Fig. 10) et du mur en retour du pont avec la gamme de températures (Fig. 11). Les deux images correspondent au pont de Grajal, objet de cet article inspecté par l'auteur.

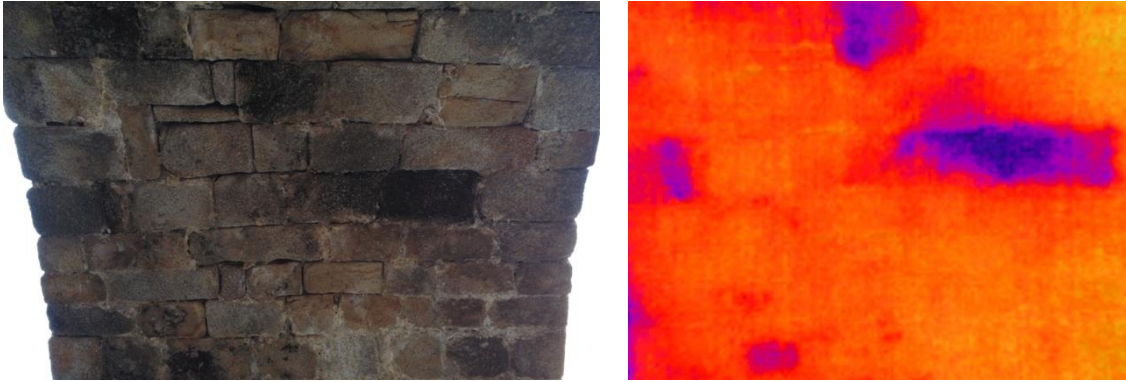


Fig. 10: Comparaison entre l'image réelle (à gauche) et l'image capturée par la caméra thermique portée par le drone (à droite), à l'intérieur de la voûte du Puente del Grajal (photographies de l'auteur).

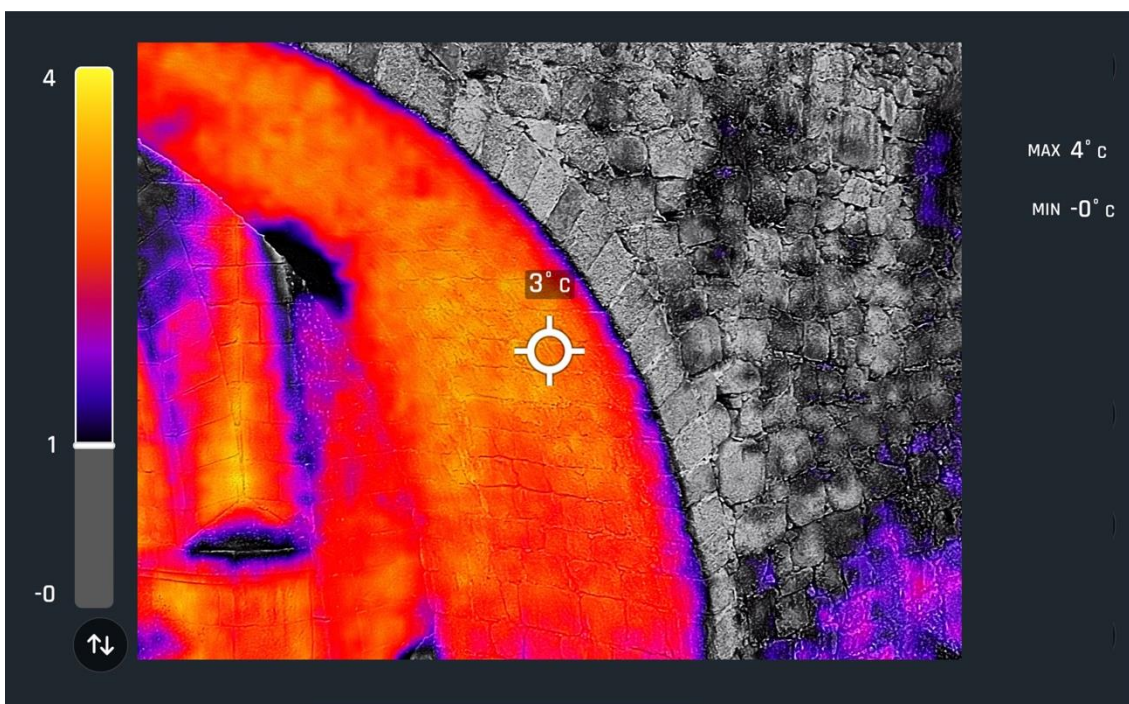


Fig. 11: Analyse thermographique du Puente del Grajal, avec échelle relative des températures enregistrées lors de l'inspection (photo de l'auteur).

References

1. VVAA (2009). Guía de inspecciones de obras de paso. Madrid, Espagne: Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento; 124 p (en espagnol). Disponible sur: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0870300.pdf (dernier accès le 2 décembre 2022)
2. VVAA (2012). Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado. Madrid, Espagne: Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento; 355 p (en espagnol). Disponible sur: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0870250.pdf (dernier accès le 2 décembre 2022).
3. VVAA (2010). Manuel d'Inspection des Structures. Quebec, Canada: Ministère des Transports du Québec; 572 p.
4. VVAA (2017). Bridge Inspection Manual. Albany, USA: Department of Transportation, New York State; 2017: 342 p. Disponible sur: https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/structures/repository/manuals/inspection/nysdot_bridge_inspection_manual_2017_comments_allowed.pdf (dernier accès le 2 décembre 2022).

5. VVAA (2022). Washington State Bridge Inspection Manual. Olympia, USA: Washington State Department of Transportation. 642 p. Disponible sur: <https://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M36-64/BridgeInspection.pdf> (dernier accès le 2 décembre 2022).
6. Boletín Oficial del Estado (2005). Orden FOM/1951/2005, de 10 de junio, por la que se aprueba la instrucción sobre las inspecciones técnicas en los puentes de ferrocarril (ITPF-05). June 2015 (en español). Disponible sur: <https://www.boe.es/boe/dias/2005/06/24/pdfs/A22192-22199.pdf> (dernier accès le 2 décembre 2022).
7. ADIF (2020). Inspección Básica de Puentes de Ferrocarril (NAP 2-4-0.0_1E). January 2020 (en español). <http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/91DB4D69076B81C6C12584FF0032E3BC?OpenDocument&tDoc=F> (dernier accès le 2 décembre 2022).
8. ADIF (2020). Inspección Principal de Puentes de Ferrocarril (NAP 2-4-1.0). July 2020 (en español). <http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/D2ED6B6DB14AA4D1C12585AE0054660F?OpenDocument&tDoc=F> (dernier accès le 2 décembre 2022).
9. Cuerno Rejado, C. (2015). “Origen y Desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto”. Proceeding of Los Drones y sus aplicaciones a la Ingeniería Civil. Dirección General de Industria y Energía de la Comunidad de Madrid (Eds). Pages 15 – 32 (en español). Disponible sur: <https://www.fenercom.com/wpcontent/uploads/2015/03/Los-Drones-y-sus-Aplicaciones-a-la-Ingenieria-Civil-fenercom2015.pdf> (dernier accès le 2 décembre 2022).
10. Rodríguez Elizalde, R. (2022). “Structural Inspection by RPAS (Drones): Quality Work with Preventive Guarantee”. Proceeding of Journal of Engineering and Applied Sciences Technology, 2022, Volume 4(2), 1 – 11. Disponible sur: [doi.org/10.47363/JEAST/2022\(4\)143](https://doi.org/10.47363/JEAST/2022(4)143) (dernier accès le 2 décembre 2022).
11. Gutiérrez Cardona, E. and Puerta Hernando, D. (1997). “Puentes del Grajal”. Proceeding of Cuadernos de estudios: revista de investigación de la Asociación Cultural “Pico San Pedro”, (9), Pages 85 – 108 (en español).
12. VVAA (2006). Historic Bridges in Madrid Region. Consejería de Cultura Deporte y Turismo, Dirección General de Turismo, Delegación de Turismo Cultural, Comunidad de Madrid, Pages 29 – 31. Disponible sur: <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM002585.pdf> (dernier accès le 2 décembre 2022).
13. VVAA (2001). Catálogo Regional de Patrimonio Arquitectónico de la Comunidad de Madrid. Catálogo Sectorial del Sistema de Infraestructuras Históricas Calzadas, Caminos Reales y Carreteras. Consejería de Vivienda, Dirección General de Arquitectura y Rehabilitación, Área de Arquitectura y Patrimonio, Comunidad de Madrid, Page 90 (en español). Disponible sur: https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/vivienda/texto_fichas_puentes_final.pdf (dernier accès le 2 décembre 2022).
14. Hill, D. (1984). A History of Engineering in Classical and Medieval Times. Routledge, London, 1984, Pages 61 – 75. Disponible sur: <https://doi.org/10.4324/9781315800110> (dernier accès le 2 décembre 2022).
15. García Page, C. (2016). “Puentes: viaje a un nuevo esplendor”. Proceeding of BIA, 288, Primavera 16, Pages 18 – 26 (en español). Disponible sur: <https://www.riarte.es/bitstream/handle/20.500.12251/743/BIA%20288%20PRIMAVERA-16.%201826.%20Puentes.%20Viaje%20a%20un%20nuevo%20esplendor.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (dernier accès le 2 décembre 2022).
16. Vergouw, B.; Nagel, H.; Bondt, G.; Custers, B. (2016). “Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments”. Proceeding of The Future of Drone Use. Information Technology and Law Series, vol 27. T.M.C. Asser Press, The Hague, Pages 21 – 45. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6_2 (dernier accès le 2 décembre 2022).
17. Elijah, T.; Jamisola Jr., R. S.; Tjiparuro, Z.; Namoshe, M. (2021). “A review on control and maneuvering of cooperative fixed-wing drones”. Proceeding of International Journal of Dynamics and Control, volume 9, Pages 1332 – 1349 (2021). Disponible sur: <https://>

- doi.org/10.1007/s40435-020-00710-2 (dernier accès le 2 décembre 2022).
18. Li, Y.; Liu, C. (2019) “Applications of multirotor drone technologies in construction management”. *Proceeding of International Journal of Construction Management*, Volume 19, 2019, Issue 5, Pages 401 – 412. Disponible sur: <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452101> (dernier accès le 2 décembre 2022).
 19. Baguelin, F., Corte, J., & Levillain, J. (1980). *Methodes D'inspection et D'auscultation des Fondations et Piles des Ponts Anciens. Travaux*, (544).
 20. Viollet-le-Duc, E. (1854), *Dictionnaire de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Paris, B. Bance Éditeur, 1854, Vol. 5, Pages 524 – 526. Disponible sur: [https:// books.google.es/books?id=v7xLAAAAYAAJ&printsec=frontcover&hl=es](https://books.google.es/books?id=v7xLAAAAYAAJ&printsec=frontcover&hl=es)(dernier accès le 2 décembre 2022).
 21. García de Miguel J.M. (2009). *Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones*. Madrid, Espagne: Consejo General de la Arquitectura Técnica de España; 2009: 684 p.
 22. Sowden, A.M. (1990). *The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structures* (1st ed.). CRC Press. Disponible sur: <https://doi.org/10.1201/9781003062066> (dernier accès le 2 décembre 2022).
 23. García de Miguel J.M. (2017). “Mecanismos de deterioro de los puentes de piedra o ladrillo”. *Proceeding of León, J and Goicolea J. M. (eds.) Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño*. Fundación Juanelo Turriano, Pages 193 – 204. Disponible sur: https://biblioteca.juaneloturriano.com/Record/Xebook1-11095/Read?_=50485B22-37E9-32B3-A6D9-8B707D29463D (dernier accès le 2 décembre 2022).
 24. Pozo – Antonio, J. S.; Rivas, T.; González, N.; Alonso – Villar, E. M. (2022). “Deterioration of graffiti spray paints applied on granite after a decade of natural environment”. *Proceeding of Science of The Total Environment*, Volume 826, 20 June 2022, 154169, Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154169> (dernier accès le 2 décembre 2022).
 25. VVAA (2020). “Chequeo al Acueducto”. *Proceeding of El Día de Segovia, 2020, August 9th* (en espagnol). Disponible sur: <https://www.eldiasegovia.es/noticia/ZB0AAA2CF-D66F-0590-C8F9D368927ABD0D/202008/Chequeo-al-Acueducto> (dernier accès le 2 décembre 2022).