

# Inspection et diagnostic de châteaux d'eau à partir d'images de drones

Jérôme LOYER<sup>1</sup>, Jean-Louis LEPREUX<sup>2</sup>, François GENAIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> VEOLIA/ GINKEO (affiliation 2015)

<sup>2</sup> VEOLIA/ GINKEO – jean-louis.lepreux@veolia.com

<sup>3</sup> VEOLIA / Région Nord-Ouest - francois.genain@veolia.com

**RÉSUMÉ.** – Les châteaux d'eau assurent plusieurs fonctions essentielles dans les services d'eau : la défense incendie, une réserve de sécurité pour l'eau potable, et le lissage des cycles de production.

Leurs voiles minces, les charges fixes et les charges cycliques, l'exposition aux intempéries, en font des ouvrages d'art très sollicités.

La génération des « trente glorieuses » donne des signes de vétusté, alors que les collectivités propriétaires doivent gérer les services avec des budgets et des tarifs toujours plus contraints.

Les instruments d'aide à la décision existent, parmi lesquels le coût global de possession, mais ils demandent des informations très précises sur l'état des structures, et des modèles de vieillissement toujours plus raffinés.

Dans ce contexte les images prises par drones apportent un changement de paradigme dans la gestion patrimoniale. Le traitement numérique des données et l'archivage qui permet des détections fines du changement au fil des ans, vont permettre d'optimiser des programmes de réhabilitation.

Tant dans l'évolution des fissures, que dans la dynamique de la corrosion des bétons, les images numériques de surfaces sont de plus en plus parlantes. Le diagnostic fonctionne à partir de codage des défauts selon leurs types et leurs intensités. Des profils longitudinaux ou circulaires s'adaptent à la géométrie des tours.

Pour des questions d'accès ou de sécurité, les drones sont aussi une alternative économique vis-à-vis de moyens d'inspection par cordistes, ou depuis des nacelles sur véhicules lourds.

L'article montre également comment l'usage du proche infrarouge permet de « tracer » l'origine des suintements et de distinguer entre un défaut d'étanchéité de cuve ou un simple problème d'eau pluviale.

Enfin, la constitution de bases de données 3D associant les défauts, avec les données de structure, et les diverses sollicitations calculées, semble être une voie prometteuse de suivi technique des ouvrages. Un site collaboratif serait à créer.

Mots-clés : ouvrages hydrauliques, châteaux d'eau, gestion patrimoniale, drone, inspection, diagnostic, site collaboratif

## Inspection and diagnosis of water towers with images taken from drones (UAV)

**ABSTRACT.** – Drinking water quality and fire protection minimum storage impose conditions upon design of watertowers. Concrete is often chosen as structural material.

Secondaries functions : optimizing the pumping cycle, antenna installation, advertizing ... , imply other constraints on access and maintenance.

Height and weight lead to rather thin yet waterproof walls. Cyclic stresses are a key issue.

Anti-terrorism rules as well as availability of drinking water limit staff access and periods of outage of service.

**The instruments carried by drones are more and more accurate and versatile. Drones also solve some access problems. Drones are not the unique mean of inspection, but they are to take a growing part in a more and more demanding asset management.**

Expected technical life of water towers ranges between 60 and 100 years.

The budgets of owner authorities are under pressure, and a lot of water towers that have been built in the sixties are now ageing.

Priorities of repairs should be defined with a base line assessment, and periodic reviews.

Decision making requires sophisticated ageing modelling for materials and structures, and use of concepts such as Total Cost of Ownership.

Several agencies or laboratories have already developed photo guides for assessing the damage of the material / structure from the pattern and the extent of the surface defaults. However there is a need for standardization.

Infra red images should be added, to track the origine of leaks, as an example.

The defaults are coded on vertical profiles, or on horizontal radar plots.

VEOLIA has also used a data base software to combine the information from defaults, from structural elements and materials. All relevant data may be added : orientation, wind, chemical environment, type of foundation, stress calculation, history of incidents and repairs ...

These data can be filtrated and displayed on a 3D model with a « principal components approach ».

Key-words: water towers, drone, Data storage and access, cooperative web sites, self-learning machines, asset management.

## I. INTRODUCTION

Élément indispensable à la mise en œuvre des services public de l'eau, la construction des châteaux d'eau a connu un réel essor au sortir du conflit de la seconde guerre mondiale au cours des décennies 1950, 1960 et 1970.

Ainsi, la grande majorité de ces ouvrages a, à ce jour, plus de 50 ans. Leur rôle reste primordial car ils permettent de sécuriser la distribution, de rationaliser le dimensionnement des réseaux, de garantir une qualité de service, d'optimiser les coûts de gestion et de contribuer à la défense incendie.

Ces ouvrages, dont la réalisation relève parfois de la prouesse technique, font partie intégrante de nos paysages et leur vieillissement constitue une préoccupation grandissante tant pour les collectivités maître d'ouvrage que pour leurs exploitants.

L'évaluation de leur vieillissement constitue un enjeu majeur, mais leurs caractéristiques et leurs conditions de fonctionnement rendent leur diagnostic difficile.

C'est dans ce contexte qu'il est apparu nécessaire, chez Veolia, de développer de nouvelles méthodes visant à améliorer l'analyse de l'état d'un réservoir en utilisant des technologies modernes, simples et innovantes.

Le présent article vise à décrire l'intérêt d'avoir recours aux drones et à leur possibilité d'embarquer des moyens de visualisation et de diagnostic jusque dans les endroits les plus inaccessibles des châteaux d'eau.

Les châteaux d'eau ne sont pas éternels, comme le rappelle spectaculairement ces deux images :

VIERZON 1963

VIERZON 1995



**Cet accident pose la question : Quelle gestion patrimoniale aujourd'hui et demain ? Cet exposé apporte une réponse avec les drones et le traitement des données qu'ils permettent de rassembler.**

## II. ROLES DES CHATEAUX D'EAU

**Réserve d'Eau potable:** des exigences volumétriques et qualitatives.

La bonne pratique pousse à stocker 1 jour moyen de consommation. L'analyse de risque, et les contraintes de site viennent moduler ce critère. (Ce dimensionnement ne s'ajoute pas au critère de défense incendie).

D'un point de vue qualitatif, le critère essentiel est celui de la qualité sanitaire des matériaux au contact de l'eau. Le béton et le ciment sont en général tout à fait acceptables. C'est une raison de leur large utilisation, tant en construction initiale qu'en réhabilitation.

**Lutte contre les incendies :** autre élément de dimensionnement.

Ce rôle est probablement aussi ancien que celui de réserve d'eau potable.

Au stade de l'instruction des Permis de Construire les Pompiers sont consultés et des prescriptions de débit et de temps d'autonomie sont données. Cette autonomie se calcule en écoulement gravitaire, d'où la nécessité souvent d'avoir des réservoirs tours. Les immeubles de grande hauteur portent sur le toit ou à certains niveaux leurs propres réservoirs.

C'est vrai pour les zones d'habitation, ou d'activités tertiaires ou commerciales, mais aussi pour les sites industriels ou des exigences de sécurité peuvent conduire à des créations d'ouvrages spécifiques.

**Optimisation des pompages :** un rôle économique.

Les réservoirs d'eau ont permis des économies de dimensionnement du réseau et des pompes.

Ils apportent une protection de la ressource en limitant les à-coups sur les puits et les forages.

Ils permettent une optimisation tarifaire, qui a effet positif collectif de lissage de la demande électrique.

**Rôles annexes :** des exigences supplémentaires.

Par son élévation, un château d'eau peut devenir un signal urbain et architectural, un amers pour les marins, une tour d'antennes, un support publicitaire, un observatoire touristique, ou ... crêperie panoramique ! (Ex. à Ploubalay 22).

Ces rôles secondaires sont pour certains anecdotiques, mais ils entraînent des exigences supplémentaires sur la maintenance structurelle, l'accessibilité, et le bon état visuel.

## III. CONSEQUENCES EN TERMES DE GESTION PATRIMONIALE.

La présence de l'eau et les fonctionnalités décrites ci-dessus expliquent un certain nombre de caractéristiques des ouvrages et entraînent des exigences particulières.

La hauteur fait des châteaux des ouvrages d'art, le poids à porter exige une optimisation des dimensions : finesse relative des parois par exemple tout en assurant l'étanchéité. Les contraintes cycliques de la pression de l'eau, des températures, sont autant de causes d'endommagement.

Les aspects sanitaires restreignent le choix des matériaux et durcissent les conditions de chantier.

La gestion des châteaux d'eau est en outre soumise à d'autres exigences :

- Accès, sécurité : règlement « Vigipirate »,
- Disponibilité : les périodes d'arrêt, les périodes de visite sont limitées.

La dimension économique est un enjeu majeur, avec une durée de vie économique attendue entre 60 à 100 ans

Le contexte actuel, avec des contraintes budgétaires qui fait suite au « baby-boom » des Trente Glorieuses, rend urgente une politique d'état des lieux rapide, et de prolongation intelligente des durées de vie techniques.

La gestion patrimoniale doit s'affiner plus que jamais :

- Une action optimisée, qui passe par un état des lieux précis, et un suivi dans le temps également fin. (C'est une remarque qui concerne de nombreux ouvrages, et qui trouve son écho dans l'essor remarquable des solutions d'instrumentation en continu des structures avec traitement avancé des données).

- Un raisonnement dans la prise de décision porté par des outils de plus en plus précis en matière de modèles de vieillissement.

lissement des matériaux et des structures, d'analyse économique de cycle de vie, et de coût global de possession. Le coût global de possession est le coût actualisé qui sur le long terme combine l'investissement initial, la maintenance et le grand entretien régénération (GER). Il est un élément d'arbitrage entre la durabilité de la construction (ou du renouvellement), et le coût, supposé en général croissant, de la maintenance.

#### IV. APPORT DES DRONES

Les drones ne sont pas (encore) équipés de carottes, pour faire des prélèvements de béton. Mais ils peuvent déjà poser et reprendre des capteurs temporaires dans des endroits difficiles ou dangereux d'accès.

Cependant d'une façon commune, ils sont surtout aujourd'hui capables de photographier, avec une haute définition, des ouvrages en extérieur, et si vraiment le cadre s'y prête, en intérieur aussi.

Leur apport réside aussi sur la légèreté de leur mise en œuvre, et son caractère non intrusif. Ils apportent une solution intéressante vis-à-vis de la continuité du service, de la sécurité des personnes, et des coûts d'auscultation classique.

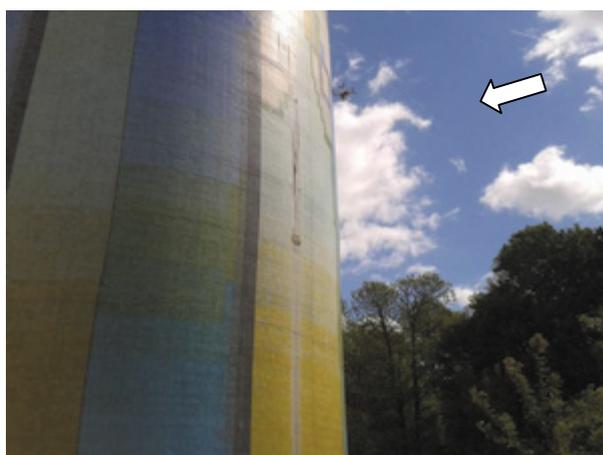
L'apport des drones va ainsi reposer essentiellement sur la pertinence des images et la capacité que les spécialistes ont d'en tirer des diagnostics structurels.

Pour ce qui est de l'aspect esthétique des ouvrages, les choses sont plus triviales. Les moyens classiques d'inspection visuelle ou de photographie à pied peuvent suffire.

L'intérêt des images drones pour les questions d'esthétique sera donc un sous-produit de l'analyse structurelle.

Encore que ... dans certains cas, la réhabilitation de surface peut être grandement facilitée, et son coût réduit, par l'intervention de drones qui vont cerner au mieux les zones à réparer, en limitant l'intervention de cordistes, ou d'autres techniciens perchés sur une nacelle.

Le château d'eau que voici, entièrement recouvert de mosaïque 2 cm x 2 cm, illustre cette remarque. Sa décoration n'empêche pas l'examen précis des fissures structurelles.



#### V. INFORMATIONS TIREES DE L'OBSERVATION DE LA SURFACE DES STRUCTURES

Les dégradations des structures proviennent, pour faire simple, d'attaques de l'extérieur (L'eau avec toute sa chimie, son rôle

de solvant, ses cycles de gel et dégel, ou encore les courants vagabonds, l'érosion), ou depuis l'intérieur de la matière même, à cause d'états de contrainte ou de déformation non prévus ou mal pris en compte.

Ensuite les deux sources de dégradation, interne et externe, peuvent se combiner et s'entretenir mutuellement lorsque des chemins sont ouverts : fissures, piquage de corrosion, perte de couverture de joints...

Dans tous les cas, les surfaces des structures, même si elles ne suffisent pas pour porter un diagnostic complet, sont très riches d'information.

— Les contraintes et déformations sont souvent maximales dans des points de surface. C'est là que démarre une fissure. Les photos deviennent pertinentes. Pour le béton on s'intéressera aux fissures présentant un risque de circulation d'eau, en lien avec les forces de capillarité. La valeur de 0,2 mm de largeur est communément admise. Cette valeur permet de prescrire une définition minimale aux images numériques.

— Pour les déformations sans fissure ouverte, ou considérées dans un sens « macro », et sous sollicitations dynamiques, il existe des développements sur les images numériques qui rappellent la bonne vieille méthode du moiré. (F. Hild, MLT Ens Cachan, Y. Le Sant, ONERA).

La surface des structures montre assez bien la nature de l'attaque, son extension évidemment, et dans une certaine mesure sa progression à l'intérieur.

Dans le second cas, celui d'une dégradation dans la masse, les défauts internes finissent par se révéler en surface par des relargages de composants, ou par des changements de couleur.

Bien sûr, des tests de pH, de porosité, de densité, de conductivité, des mesures de recouvrement des armatures, voire des prises d'échantillon pour analyses, sont nécessaires dans certaines situations, et ces examens même non destructifs, ne sont pas aujourd'hui réalisés par des drones.

La richesse d'information des images de surface reste grande et sans doute est-elle encore sous employée. (L'archivage des données permettra de revenir sur l'historique des endommagements).

Un problème concret est souvent l'accessibilité des parois intérieures des ouvrages par les drones. Des vols de drones en intérieur ont cependant déjà été faits. Veolia a utilisé un drone hélicoptère pour l'inspection intérieure d'une cuve de réservoir.

Les défauts repérés à partir des images de surface des structures doivent être classés, évalués, c'est-à-dire codés et quantifiés. Il faut en effet pouvoir objectiver les diagnostics, (éventuellement en développant les logiciels de reconnaissance des formes automatiques), et de disposer d'échelles numériques pour l'aide à la décision.

On peut saluer à ce propos le guide photographique d'évaluation des ouvrages élaboré par le CETMEF (Maintenant CEREMA), notamment parce qu'il concerne les ouvrages hydrauliques.

Voici quelques exemples (parmi de nombreux autres) qui montrent le principe du guide photographique. Le niveau de désordre est en général estimé sur le pourcentage de surface dégradée.

On pourra aussi se référer au recueil très complet: « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton » AFGC, COFREND, sous la direction de Denys Breyse et Odile Abraham, Presses des Ponts et Chaussées 2005.

Une autre référence bibliographique peut servir à construire les approches technico-économiques: « AFGC

Fissuration en réseau			
Fissuration non observée	Fissuration en réseau observée	Fissuration important, en réseau, à valider avec un spécialiste, sur la base des photographies et des données de contexte (ouverture des fissures, densité de mailles, exsudation ou calcitr...) )	
Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4



- Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Indicateurs de durabilité ». 2004.

Ou encore, de façon plus générale sur l'approche de la surveillance des ouvrages, on pourra se servir de cette référence: SETRA ITSEOA Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.

Ces différents documents, qui datent de 10 ans, ne parlent pas de drones, mais fournissent des idées pour avancer sur la classification et l'évaluation des défauts.

Ils sont une introduction au calcul (ou re-calcul pour les ouvrages existants déjà un peu anciens) de la durée de vie résiduelle.

Une piste technologique tirée de ces recueils: mettre un émetteur d'onde (acoustique, ultrasonique, électromagnétique, rayons X, etc.) à l'intérieur de l'ouvrage, et cartographier le signal capté à l'extérieur par un drone.

On peut aussi y trouver les bases pour un critère de gravité intéressant : l'état de surface et le positionnement de l'ouvrage par rapport à la période d'incubation, versus phase de propagation, dans les longues maladies du béton : carbonatation, contamination aux chlorures, alcali-réaction.

**D'autres tentatives de hiérarchisation des désordres existent. (Source : Ginger-CSTB) :**

- **B** : défauts sans conséquence autre qu'esthétique,
- **C** : défauts qui indiquent qu'une évolution risque de se faire anormalement. Ces défauts doivent être surveillés.
- **D** défauts révélateurs de dégradation. Ils sont rangés en 2 classes :

- **DA** : défauts qui indiquent un début d'évolution. Ils doivent être surveillés régulièrement et des mesures doivent être prises en cas d'évolution.

- **DB** : défauts qui indiquent une évolution avancée. Des mesures de renforcement ou de remplacement doivent être prises.

- **E** : défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de l'ouvrage et mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage. Des mesures doivent être prises dans les plus brefs délais.

- **F** : défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage.

**Malheureusement, tout n'est pas normalisé. Le croisement des types de défauts et de leur indice de gravité devrait, comme dans le domaine Santé-Sécurité-Environnement, aboutir à des matrices de risque reconnues dans la profession.**

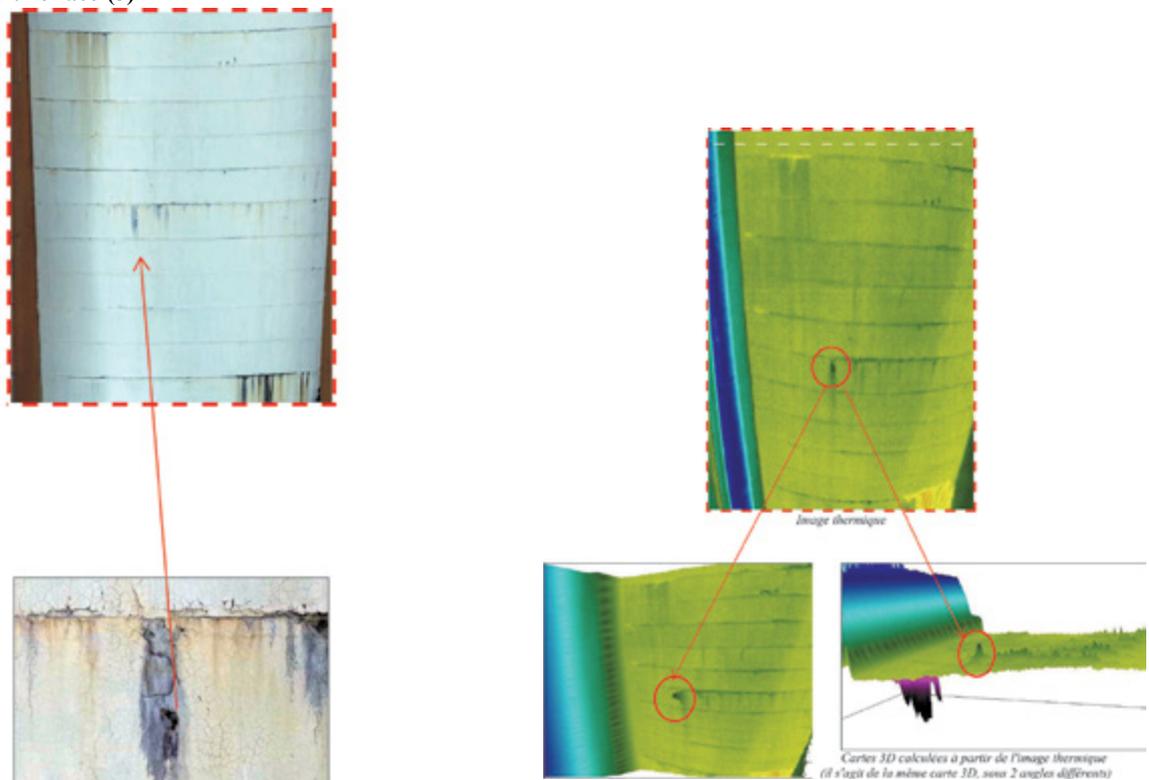
## VI. EXEMPLE D'APPORT DES IMAGES INFRAROUGE PRISES PAR DRONES

Certaines dégradations sont évidentes et tout le monde peut les constater ou les examiner à la jumelle; cependant l'examen d'un ouvrage à l'aide d'un drone permet d'observer des endroits non visibles du sol, comme les surfaces supérieures de certains murs, les ouvertures ou les fonds de cavités. Mais d'autres possibilités s'offrent encore, par l'utilisation d'une caméra thermique portée par le drone. A titre d'exemple, montrons ici faces 4 et 5 du réservoir photographié ci-dessous dans le spectre visible, puis en imagerie thermique.



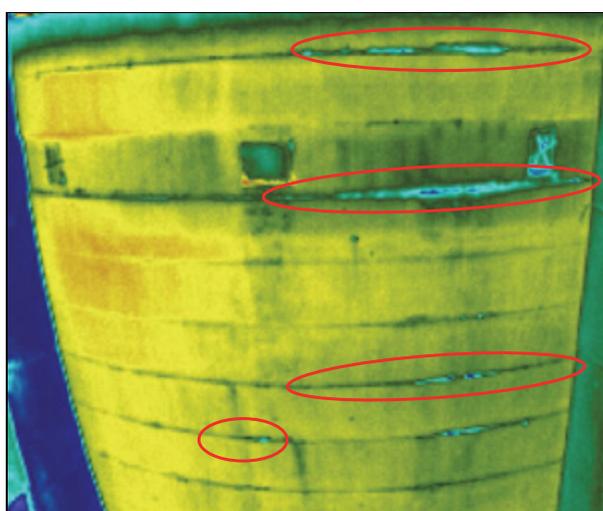
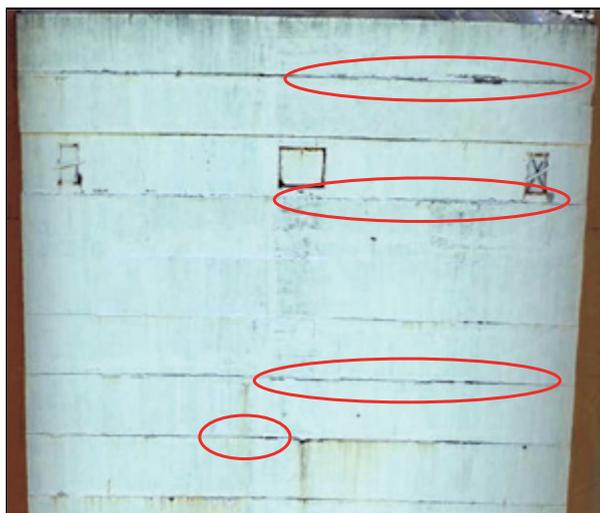
Vue générale de l'ouvrage inspecté dans le visible et dans le proche infrarouge.

**Examen d'une face (5)**



Ces cartes 3D font apparaitre en relief, une émergence de température d'environ 2°C par rapport à la surface voisine, révélant la mise à nu d'un ferrailage suite à la dégradation de l'enduit.

**Comparaison des images du haut de la face 4**



Dans le spectre visible, les 4 zones entourées ne sont pas plus significatives que des zones voisines, apparemment similaires. L'image thermique de ces 4 zones fait apparaître des différences de plus de 11 °C au niveau des températures !

Ces émergences de température apparaissent nettement sur les vues 3 D calculées à partir de l'image thermique. Cette technique permet de discerner entre résidu de ruissellement et petite fuite active.

**VII. MODES DE PRESENTATION DES RESULTATS**

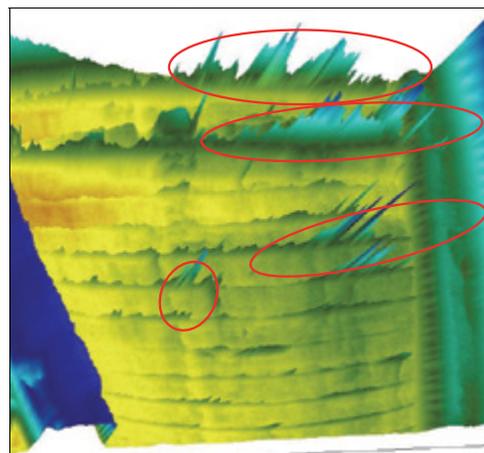
**La présentation de résultats est importante du point de vue communication. Elle utilise, pour les châteaux d'eau, leur géométrie de révolution. Elle mériterait, sur la base de la classification des désordres, une normalisation.**

Outre le code des couleurs pour l'échelle des défauts, et la représentation par profils verticaux, on peut signaler l'usage des roses horizontales ou graphiques radar, qui combine type de défaut et fréquence selon les directions (pour une tranche donnée en hauteur).

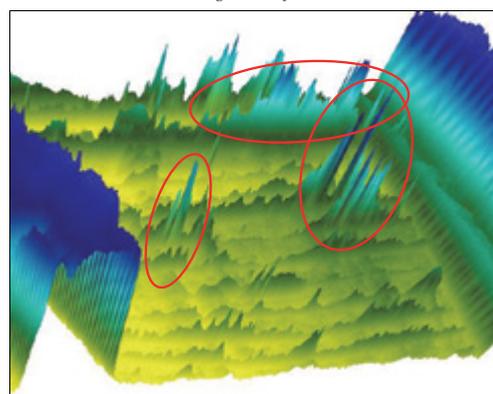
**VIII. UTILISATION DE BASES DE DONNEES AVEC VISUALISATION 3D.**

Les châteaux d'eau sont des structures à forte courbure ce qui ne facilite pas le « plaquage » des mosaïques d'images

**Comparaison des images du haut de la face 4**



*Image 3D de la face 4*



*Même image 3D que précédemment, mais un peu plus inclinée*



Les pics bleu foncé sont à 28 °C, alors que les zones jaune/vert sont à 16/17 °C environ.

Entre les 2, les zones vert/bleu indiquent des températures de l'ordre de 23 °C. ...

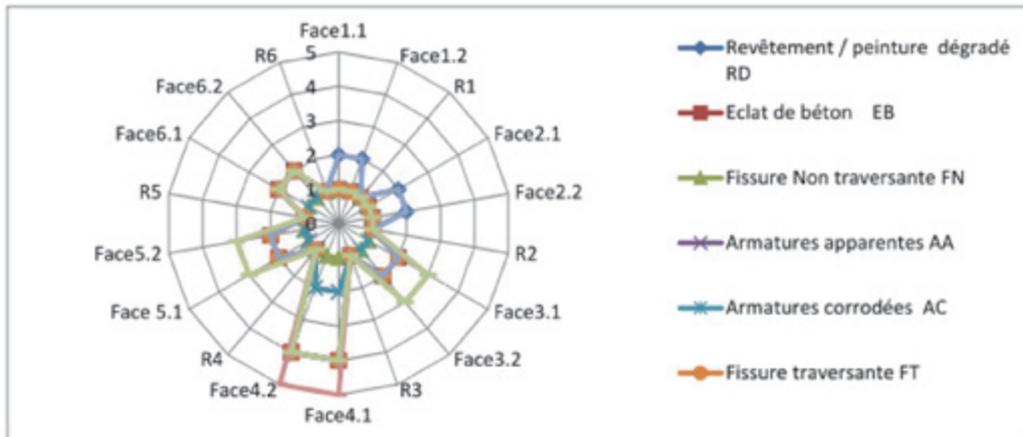
sur un plan 3D. Mais ils ont en général une symétrie de révolution qui permet de recréer assez facilement leur géométrie par des formules analytiques.

Veolia / Ginkeo a testé l'idée de traiter les points représentant la structure comme des éléments de base de données, au même titre que les défauts.

**En utilisant un logiciel de statistique et de traitement des données permettant de générer des graphiques 3D, il est possible de réunir dans une même vue la structure et les défauts.**

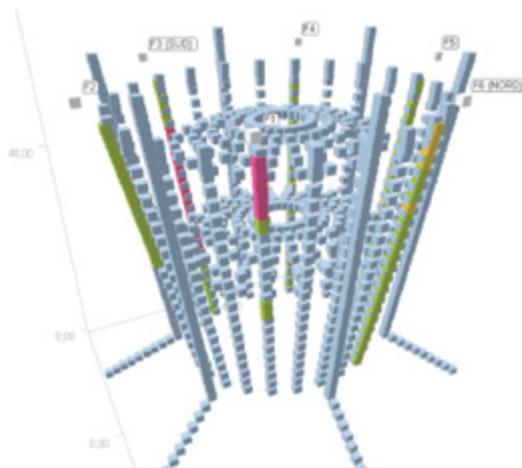
Les défauts sont caractérisés par leur type et par leur intensité, et par leur position x,y,et z. Dans le cas affiché, cela a été fait de façon quasi manuelle lors de l'inspection des mosaïques d'image. La saisie une fois faite, sous Excel par exemple, elle peut être utilisée sans nouvelle reprise manuelle pour nourrir la base de données.

Les points qui représentent la structure sont générés sous Excel. Un paramétrage permet de régler la densité des points. Les points appartiennent à des sous-ensembles de la



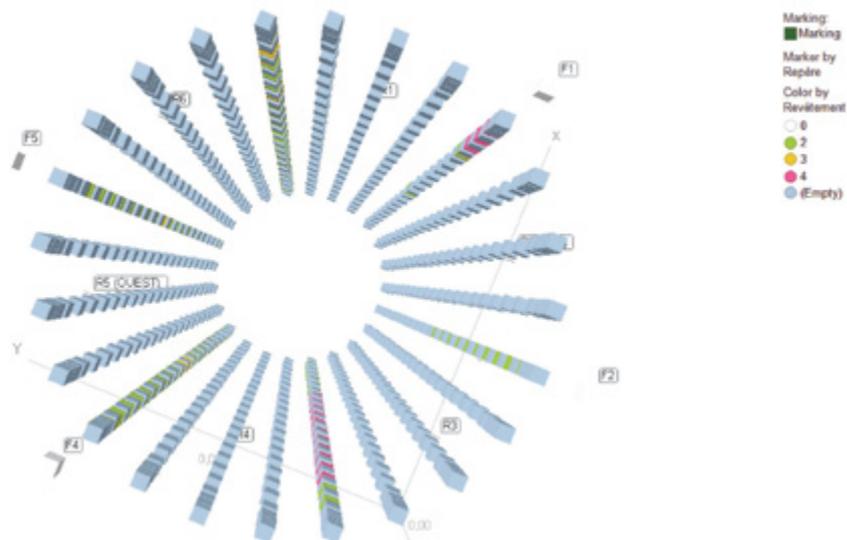
**Château d'eau - Pb de revêtement sur structure 3D**

bleu = revêtement sans dégradation  
 vert = légèrement dégradé  
 jaune = dégradé  
 rose = très dégradé



**Château d'eau - Pb de revêtement sur structure 3D**

bleu = revêtement sans dégradation  
 vert = légèrement dégradé  
 jaune = dégradé  
 rose = très dégradé



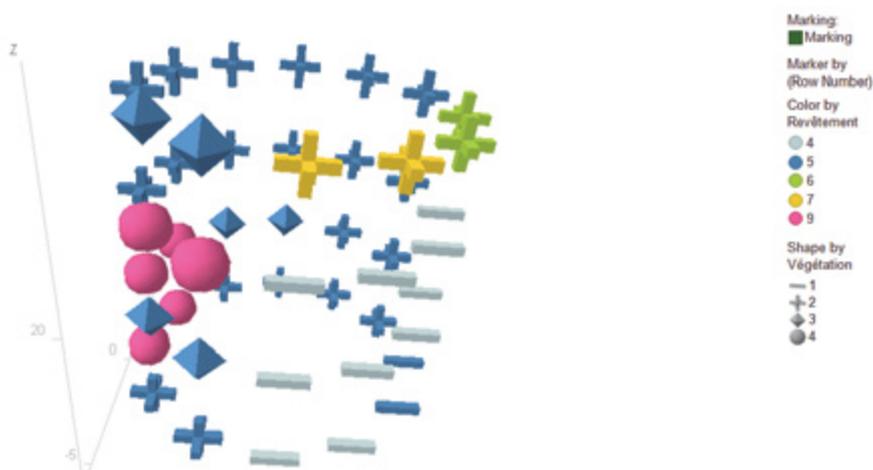
structure, ce qui ouvre la voie à des analyses statistiques, des rapprochements avec les défauts. Cela permet aussi de choisir les présentations graphiques les plus parlantes : couleurs, transparence, dimension des éléments de base, etc.

On peut incliner et faire pivoter la figure générée, qui associe la structure et les défauts.

**La figure qui suit, très simplifiée, associe la présence de végétation (mousses et plantes) et le type de revêtement de la structure.**

Revêtement et végétation des faces par étage de 10 m

- couleur selon revêtement  
- forme selon végétation



## IX. CONCLUSION

### Perspectives pour la filière drones

Il y a plusieurs dizaines de milliers de châteaux en France, mais le nombre concerné pour des inspections par drones (dimension, état) peut être estimé à 3 000. Soit un marché annuel moyen de 300 par an, mais probablement plus dans les prochaines années (600 à 1000), dans l'idée d'une montée en régime pour les états initiaux. Cela n'est pas énorme en termes d'opérations de terrain. Avec le traitement des données cela représente quand même plusieurs dizaines d'emplois.

Un gros changement se profile pour les Maîtres d'Ouvrages, car il s'agit d'une mutation de la gestion patrimoniale vers le numérique, et la modélisation technico-économique.

### Quelques retours pratiques d'expérience:

- Bien préparer le dossier: plans, historique.
- Prendre des dispositions terrain : repères d'orientation et de niveau, étalon de longueur, secrétariat des prises de vue, mesures de T°.

L'utilisation de bases de données relationnelles ouvre encore d'autres perspectives: on peut introduire la pression de l'eau, l'ensoleillement, la température ou ses variations, ou de façon générale un champ de contraintes. Certaines données peuvent être introduites de façon simple et manuelle. D'autres peuvent provenir de calculs type différences ou éléments finis.

Les gestionnaires de bases de données dont nous parlons ont des capacités gigantesques, il n'y a pas de limitation pratique de ce côté. Ils permettent en retour de créer des méta-modèles descriptifs analytiques.

### Utilisation des bases de données graphiques pour le diagnostic :

Permet d'associer la structure et les désordres. Technique simple et prometteuse.

### Un appel pour la constitution de 3 Groupes de Travail

1. **Domaine Contractuel** : Préciser le vocabulaire, les périmètres de prestation et de responsabilité entre « inspection », « diagnostic préliminaire, ou initial », « diagnostic », etc.
2. **Domaine Technologique** : Développement de moyens de mesures et d'auscultation à partir de drones, ou par association de dispositifs *in situ* et de drones.
3. **Domaine du Génie Civil** : Classification des défauts d'après photos. Indices de gravité, et Matrice de risques.

**REMERCIEMENTS** : Société **Flying Partners** pour la réalisation des prises de vue et la réalisation des « mosaïques » d'images.