

Centre Eau Terre Environnement

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'EXPLOITATION POUR L'AIDE AU DIAGNOSTIC DES OUVRAGES DU GÉNIE CIVIL

Par
Olivier Anterrieu

Thèse présentée pour l'obtention du grade de
Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Président du jury et Examineur interne	Didier Perret, Ph.D. Commission géologique du Canada
Examineur externe	Éric Samson, Ph.D. SIMCO Technologies
Examineur externe	Frédéric Taillade, Ph.D. EDF R&D
Directeur de recherche	Bernard Giroux, Ph.D. INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Erwan Gloaguen, Ph.D. INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Christophe Carde, Ph.D. SETEC LERM

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier conjointement et également Bernard Giroux et Erwan Gloaguen, respectivement directeur et co-directeur de mes recherches à l'INRS, pour leur soutien inconditionnel dès la genèse de ce projet. Je remercie Bernard d'avoir accepté de superviser mes travaux, de m'avoir judicieusement aiguillé et éclairé sur les bonnes pratiques du développement informatique ainsi que sur la rigueur et les astuces de programmation. Je tiens à souligner ta pédagogie, la limpidité de tes propos et la facilité de nos échanges. Je remercie Erwan de m'avoir expliqué les rouages de la géostatistique et de m'avoir éveillé aux concepts nébuleux du machine learning. Merci aussi pour nos discussions toujours constructives et motivantes. Je vous remercie également, Messieurs, pour le climat convivial et décontracté qui règne au sein de votre équipe de recherche et pour votre savoir être. Je vous ai quitté chercheurs à l'École Polytechnique de Montréal il y a plus de 12 ans et vous ai retrouvé professeurs avec plaisir durant ces trois années à l'INRS.

J'aimerais remercier mon second co-directeur de recherche, Christophe Carde, d'avoir cru en moi et au bien-fondé de ce projet avant même qu'il ne prenne corps. Je te remercie pour ta disponibilité, ton écoute, ta présence active et attentive malgré la distance, ainsi que pour ton appui technique en génie civil et en pathologie des matériaux. Je me souviendrai longtemps de ce jour d'octobre 2014 où, dans les locaux du LERM, je vous ai fait part de cette idée de doctorat au Québec et de l'accueil positif que vous y avez accordé, François et toi. Sans votre soutien indéfectible et votre relai auprès de la direction, ce projet n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier cordialement les autres membres du jury, Didier Perret, Éric Samson et Frédéric Taillade d'avoir accepté de consacrer une partie de leur temps précieux à la révision de ce document et pour l'intérêt porté à mes travaux.

Je souhaite également remercier Sétéc Canada Inc. et le programme MITACS Accélération pour la contribution financière apportée à ces travaux et le MTMDET pour m'avoir permis d'accéder à plusieurs ouvrages dans la ville de Québec.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Monsieur Jean-Pierre Jacquet, directeur général du LERM, qui a accepté de me laisser quitter les rangs de ses équipes Arlésiennes dans la belle Provence, pour me permettre de réaliser ce projet dans la belle Province. Je tiens à vous remercier Jean-Pierre, pour votre soutien en béton armé, votre clairvoyance, vos encouragements, votre écoute et votre disponibilité malgré le décalage horaire.

Je tiens aussi à remercier Eric Perard et Pierre Lescaut respectivement directeurs généraux de Sétéc Canada Inc. et du groupe SETEC ainsi que Michel Kahan, Président du groupe SETEC, pour avoir soutenu ce projet et contribué à sa mise en valeur.

Merci à mes collègues et ex-collègues du LERM pour m'avoir toujours permis de me sentir à l'aise et inclus dans l'équipe lors de mes retours en France. Je pense notamment à l'équipe du Département Ouvrages et Patrimoine avec des mentions spéciales pour Magali, François, Cédric, Fred, Libo, Terry et J.P. Un merci particulier à Jean-Luc Garciaz pour m'avoir épaulé techniquement et humainement, pour son ingéniosité, sa créativité débordante et ses remarques constructives toujours empreintes de pragmatisme.

Merci aussi à tous les étudiants et anciens étudiants de l'INRS avec qui j'ai eu l'occasion de partager des moments de convivialité qui ont rendu mon passage agréable et enrichissant. Je pense principalement à mes collègues et ex-collègues du local 2402 et du 4^{ième} étage, Shiva, Cecilia, Simon, Marc, Gabriel, Lorenzo, Martin, Pierre et Jean-Sébastien.

Un merci chaleureux à mes amis de longue date : Swell, Gropol, Galbouek, La bouche, Pilou, Carter.

Un merci empli de tendresse et d'affection à mes parents et à ma sœur Marie, la meilleure commissaire que je connaisse. Merci pour vos mots, votre écoute, votre confiance, votre amour inconditionnel et vos qualités humaines. Ces piliers qui font de moi qui je suis devenu depuis 37 ans.

Finalement, je te remercie du fond du cœur. Toi qui a hissé la grand-voile en ce jour glacial de Janvier et qui a accepté de tout quitter pour me suivre dans cette nouvelle aventure. Toi qui partage ma barque depuis tant d'années sur des eaux calmes, tumultueuses, rugissantes, sous un soleil de plomb comme sous 1 m de neige. Toi qui demeure mon principal sujet de recherche. Toi mon diamant brut, ma Lili.

DEDICACE

*I'll be always laughing like a clown
Won't someone help me 'cause
I've got to pick myself from off the ground,
In this concrete jungle.*

Bob Marley & The Wailers (Catch a Fire, 1973).

Aux feuilles sans sève tombées trop tôt sur le gazon.
À ces jours sombres dont j'aurais pu ne jamais me relever.
Aux éclats de vie, de joie et d'amour qui donnent envie de continuer.
À ces jalons lumineux qui me hantent parfois,
Me rappellent à mon éphémère condition souvent,
M'incitent à me dépasser toujours.
À Nico, que la camarade a emporté sans qu'il n'ait pu terminer ses études.
À Eric, qu'un flot de roches a englouti sous nos yeux poussiéreux.
Et à toi, mon frère, éternel estivant que la Grande Bleue nous a pris bien trop tôt.

RÉSUMÉ

La préservation et la maintenance des ouvrages en béton armé ne peuvent être assurées que par une bonne compréhension de l'état des matériaux et du comportement des structures considérées. À l'échelle d'un ouvrage, la caractérisation de l'état du béton armé nécessite la réalisation de contrôles non destructifs (radar, potentiel électro-négatif, capacimétrie, ultrasons, etc.) permettant de cartographier rapidement et en continu la distribution spatiale de différents paramètres physiques intrinsèquement liés aux pathologies en cours de développement. Ces cartographies permettent d'implanter judicieusement les prélèvements indispensables à la réalisation d'analyses en laboratoire (essais physique, chimique, microstructure). Dans l'optique d'une approche performantielle, le monitoring de différents paramètres structurels (roulis, basculement, ouverture de fissures, etc.) et environnementaux (température, hygrométrie, etc.) doit également être réalisé afin de déterminer le comportement de l'ouvrage au cours du temps et d'évaluer sa durabilité. Les gestionnaires d'ouvrages et les ingénieurs chargés des études se trouvent ainsi confrontés à devoir gérer d'importants volumes de données multi-échelles et multivariées évoluant dans l'espace et le temps. La gestion, la compilation et la valorisation de ces données représentent actuellement un travail fastidieux, redondant, extrêmement chronophage, pouvant mener à des erreurs d'appréciation et d'interprétation et donc à des diagnostics erronés. Pour fiabiliser les diagnostics, il est crucial d'intégrer ces données entre elles de manière intelligible, claire et cohérente dans le but d'offrir aux gestionnaires d'ouvrages un outil pertinent d'aide à la décision basé sur des éléments factuels (identification et caractérisation des hétérogénéités, répartition de l'humidité, potentiel de corrosion, vitesse de corrosion, indicateurs de risque, simulation, prédiction, etc.).

Dans cette optique, un nouveau système d'exploitation de données a été développé. Ce système, nommé *Datae*, repose notamment sur l'utilisation de techniques d'imagerie 3D et de méthodes innovantes d'intégration des données qui augmentent considérablement leur représentativité et leur exploitation dans l'espace et le temps. *Datae* permet à la fois d'exploiter des flux de données diversifiés, de représenter ces données de façon claire, de réaliser des simulations et d'aider les gestionnaires d'ouvrages à anticiper l'évolution des pathologies des infrastructures de manière à optimiser les travaux de maintenance. Cette optimisation a pour but de limiter les pertes d'exploitation des infrastructures, bénéfice important pour les gestionnaires d'ouvrages.

Mots-clés : Diagnostic; béton armé; corrosion; contrôles non destructifs; suivi temporel; analyses en laboratoire; représentation; intégration de données; logiciel; aide à la décision.

ABSTRACT

The preservation and maintenance of reinforced concrete structures can only be ensured by a good understanding of the state of the materials and the behavior of the considered structures. At the scale of a structure, the characterization of the state of the reinforced concrete requires the realization of non-destructive tests (radar, electronegative potential, capacitometry, ultrasound, etc.) allowing to map rapidly and continuously the spatial distribution of different physical parameters intrinsically related to pathologies under development. These maps make it possible to judiciously collect samples required for laboratory analyzes (physical, chemical, microstructure tests). In the context of a performance-based approach, the monitoring of various structural parameters (roll, tilt, crack opening, etc.) and environmental parameters (temperature, hygrometry, etc.) must also be performed in order to determine the behavior of the work over time and evaluate its durability. The book managers and the engineers in charge of the studies are thus confronted with having to manage large volumes of multi-scale and multivariate data evolving in space and time. The management, the compilation and the utilization of these data represent a tedious work, redundant, extremely time consuming, which can lead to errors of appreciation and interpretation and thus erroneous diagnoses. To make diagnostics more reliable, it is crucial to integrate these data in an intelligible, clear, and consistent manner in order to provide resource managers with a relevant evidence-based decision support tool (identification and characterization of heterogeneities, moisture distribution, corrosion potential, corrosion rate, risk indicators, simulation, prediction, etc.).

With this in mind, a new data operating system has been developed. This system, called Datae, is based in particular on the use of 3D imaging techniques and innovative data integration methods that considerably increase the representativeness and the exploitation of the data, both in space and time. Datae allows exploiting diversified data flows, representing these data in a clear way, performing simulations, and helps project owners anticipating the evolution of infrastructure pathologies in order to optimize the work of maintenance. This optimization aims to limit infrastructure operating losses, a major benefit for building owners.

Keywords : Diagnosis; reinforced concrete; corrosion; non-destructive testing; monitoring; laboratory analysis; representation; data integration; software; decision support.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
DEDICACE	V
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVII
LISTE DES ALGORITHMES	XVIII
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Preambule.....	1
1.2 Mise en contexte	2
1.3 Enjeux, objectifs et problématique	4
1.4 Contributions originales	6
2 ETAT DES CONNAISSANCES.....	7
2.1 Principales pathologies des ouvrages en béton armé.....	7
2.1.1 Corrosion des armatures.....	8
2.1.2 Alkali-réaction	10
2.1.3 Gel-dégel	11
2.1.4 Gonflement – Réaction sulfatique interne.....	11
2.2 Principaux moyens de caractérisation sur site	12
2.2.1 Les contrôles non destructifs.....	13
2.2.1.1 Réflectométrie radar	13
2.2.1.2 Potentiel de corrosion.....	14
2.2.1.3 Capacimétrie électrique.....	14
2.2.1.4 Vitesse de corrosion	15
2.2.1.5 Résistivité électrique.....	17

2.2.1.6	Vitesse du son.....	17
2.2.1.7	Vidéo-endoscopie.....	17
2.2.1.8	Autres contrôles non destructifs	18
2.2.2	Évaluation mécanique des ouvrages précontraints	19
2.2.2.1	Courburemétrie	19
2.2.2.2	Arbalète.....	20
2.2.3	Instrumentation et investigations destructives	21
2.2.3.1	Suivi temporel (<i>Monitoring</i>).....	21
2.2.3.2	Carottage, prélèvement, percement et ouverture.....	23
2.2.4	Synthèse.....	24
2.3	Principaux moyens de caractérisation en laboratoire.....	27
2.3.1	Caractéristiques intrinsèques des bétons.....	27
2.3.1.1	Essais mécaniques	27
2.3.1.2	Paramètres de formulation	28
2.3.1.3	Indicateurs de durabilité	29
2.3.2	Caractéristiques de vieillissement des bétons	32
2.3.2.1	Profondeur de carbonatation	32
2.3.2.2	Dosage des chlorures.....	33
2.3.2.3	Microscopie électronique à balayage.....	34
2.3.3	Synthèse.....	35
2.4	Principaux moyens de représentation des ouvrages.....	36
2.4.1	Moyens de représentation des ouvrages.....	36
2.4.1.1	Relevés topographiques conventionnels	36
2.4.1.2	Scanner (nuage de points 3D).....	36
2.4.1.3	Photogrammétrie numérique multi-images (enveloppe texturée 3D)	37
2.4.2	Solutions logicielles de représentation des ouvrages	38
2.5	Principales solutions logicielles d'aide à la maintenance des ouvrages	40
2.6	Conclusions et constats.....	41

3 CONTRIBUTION À LA REPRESENTATION DES RÉSULTATS.43

3.1	Introduction	43
3.2	Contribution à la représentation des données de <i>monitoring</i>	44
3.2.1	Défi lié à l'influence des variations thermiques	44
3.2.2	Méthode utilisé et exemple de représentation du suivi d'ouverture d'une fissure....	44

3.3	Contribution à la représentation des données sur support photographique	45
3.3.1	Défi lié au support photographique.....	45
3.3.2	Algorithme développé et exemple de représentation.....	47
3.4	Contribution à la représentation des résultats sur modèle 3D.....	50
3.4.1	Défis.....	50
3.4.2	Algorithme de restitution 3D au format *.obj et exemple de restitution.....	50
3.4.3	Algorithme d'interaction avec le modèle 3D et exemple de représentation.....	53
3.5	Synthèse	64
4	APPORT DES MÉTHODES D'INTÉGRATION DE DONNÉES....	65
4.1	Introduction	65
4.2	Méthodes d'intégrations utilisées.....	65
4.2.1	Fusion de CND et d'analyses en laboratoire (algorithme développé)	66
4.2.2	Méthodes d'intégrations géostatistiques.....	68
4.2.2.1	Cokrigage.....	69
4.2.2.2	Simulation séquentielle bayésienne.....	70
4.2.3	Apprentissage automatique.....	73
4.3	Exemple d'application des méthodes d'intégration de données.....	76
4.3.1	Présentation du site d'étude et des données acquises.....	76
4.3.2	Résultats.....	80
4.3.2.1	Fusion de CND.....	80
4.3.2.2	Cokrigage.....	82
4.3.2.3	Simulation séquentielle bayésienne.....	83
4.3.2.4	Arbre de décision (apprentissage supervisé).....	84
4.3.3	Discussion.....	86
4.4	Conclusions.....	88
5	SYSTÈME D'EXPLOITATION DÉVELOPPÉ.....	90
5.1	Présentation générale du système d'exploitation.....	90
5.1.1	Considérations techniques.....	90
5.1.2	Architecture modulaire	91
5.1.3	Les données d'entrée.....	92
5.2	Solution pour le <i>monitoring</i>	95
5.2.1	Présentation de l'interface et des fonctionnalités.....	95

5.2.2	Exemple d'exploitation	96
5.2.3	Bénéfices et gains.....	97
5.3	Solution 2D.....	98
5.3.1	Présentation de l'interface et des fonctionnalités.....	98
5.3.2	Exemple d'exploitation	100
5.3.3	Bénéfices et gains.....	102
5.4	Solution 3D.....	105
5.4.1	Présentation de l'interface et des fonctionnalités.....	105
5.4.2	Exemple d'exploitation	106
5.4.3	Bénéfices et gains.....	109
5.5	Solution pour la courburemétrie.....	109
5.5.1	Présentation de l'interface et des fonctionnalités.....	109
5.5.2	Exemple d'exploitation	110
5.5.3	Bénéfices et gains.....	111
5.6	Synthèse	111
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	114
6.1	Conclusion	114
6.2	Perspectives.....	115
	BIBLIOGRAPHIE.....	117
	ANNEXE – PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE	121

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Étapes du cycle de vie d'un ouvrage et segment de positionnement du projet (en rouge) 3
Figure 1.2	Schéma de principe du temps alloué aux différentes phases d'une étude de diagnostic mesures. (Crédit SETEC) 4
Figure 2.1	Principe de la réaction chimique à l'origine de la corrosion par carbonatation (à gauche) et par pénétration des ions chlorures (à droite) (Crédit SETEC). 8
Figure 2.2	Illustration des conséquences du phénomène de corrosion des armatures en environnement marin (Crédit SETEC). 9
Figure 2.3	Gel d'alcali-réaction observé au microscope électronique à balayage (en haut) et illustration des conséquences du phénomène d'alcali-réaction sur les structures (Crédit SETEC). 10
Figure 2.4	Illustration des conséquences de cycles répétés de gel-dégel (Crédit SETEC). 11
Figure 2.5	Ettringite massive observée au microscope électronique à balayage (à gauche) et illustration des conséquences du phénomène de gonflement (à droite) (Crédit SETEC). 12
Figure 2.6	Exemple de radargramme interprété (Coupe profondeur sur une poutre en béton précontraint auscultée avec une antenne 3GHz (Crédit SETEC). 13
Figure 2.7	Aspect général d'une culée de pont (gauche) et cartographie du potentiel de corrosion (droite) (Crédit SETEC). 14
Figure 2.8	Aspect général d'un mur de soutènement (en haut) et distribution spatiale de l'humidité superficielle relative du béton obtenu par capacimétrie électrique (en bas) (Crédit SETEC). 15
Figure 2.9	Schéma de la courbe de polarisation d'une armature soumise à un courant constant d'intensité <i>I_{app}</i> (Crédit SETEC). 16
Figure 2.10	Photographie extraite d'une acquisition par vidéo-endoscopie réalisée à l'intérieur d'une gaine de précontrainte (Crédit SETEC). 18
Figure 2.11	Schémas de principe de la courburemétrie (gauche et milieu) et exemple de réalisation d'un essai sous chargement contrôlé (droite) (Crédit SETEC). 20
Figure 2.12	Schémas de principe de l'Arbalète (gauche) et exemple de réalisation d'un essai sous une poutre précontrainte d'un ouvrage isostatique (droite) (Crédit SETEC). 20
Figure 2.13	Illustrations de l'ouverture et de la fermeture d'une fenêtre (Crédit SETEC). 21
Figure 2.14	Exemples de techniques traditionnelles de <i>monitoring</i> d'une fissure (a – témoin de plâtre, b- mesure de l'ouverture, c- mesures du désaffleurement, d- mesure du mouvement tridimensionnel) (Saugnac 2016). 22
Figure 2.15	Capteur de <i>monitoring</i> multi-paramètres CAPTAE® implanté sur un ouvrage en béton armé (Crédit SETEC). 23

Figure 2.16	Carottage réalisé en sous-face d'un tablier de pont (à gauche) et carotte de béton associée (à droite) (Crédit SETEC).....	24
Figure 2.17	Vue d'une presse de compression (gauche) et d'un système de mesure des déformations pour la détermination du module d'élasticité (droite) (Crédit SETEC).....	28
Figure 2.18	Principe de l'essai de migration sous champ électrique (haut), vue de cellules pour essai de migration (bas gauche) et vue du front de pénétration des chlorures par aspersion d'une solution de nitrate d'argent (bas droite) (Crédit SETEC).....	31
Figure 2.19	Appareillage permettant de mesurer la perméabilité aux gaz (Crédit SETEC).....	32
Figure 2.20	Mesure de la profondeur de carbonatation sur site (à gauche) et en laboratoire (à droite). La zone carbonatée est incolore, la zone non carbonatée colorée en rose (Crédit SETEC).....	33
Figure 2.21	Exemple d'un appareillage potentiométrique pour le dosage des chlorures (à gauche) et de résultats obtenus (à droite) (Crédit SETEC).....	34
Figure 2.22	Exemple de bétons au microscope électronique à balayage : gel d'alcali-réaction avec analyse élémentaire (à gauche) et ettringite expansive avec analyse élémentaire (à droite). (Crédit SETEC).....	34
Figure 2.23	Exemple de représentation de la maquette 3D d'un pont à partir d'un relevé topographique conventionnel.....	36
Figure 2.24	Principe de l'acquisition de données par scanner 3D.....	37
Figure 2.25	Restitution numérique d'un ouvrage en maçonnerie et d'un mur en béton armé (gauche : vue de face - droite : vue de dessus) (Crédit SETEC).....	37
Figure 2.26	Exemple de restitution photogrammétrique des piles d'un pont (Crédit SETEC).....	38
Figure 3.1	Évolution de l'ouverture d'une fissure avant (en bleu) et après (en noir) correction de l'influence de la température (en rouge).....	45
Figure 3.2	Principe de la transformation projective sur un plan (cartographie vers photographie).....	47
Figure 3.3	Exemple de projection selon trois plans (gousset 1, travée, gousset 2 – haut) d'une cartographie de potentiel de corrosion (milieu) avec l'algorithme « <i>map2pic</i> » en sous-face d'un ouvrage de type passage inférieur (bas).....	49
Figure 3.4	Illustration du format de fichier .obj et d'un fichier image de texture segmentée auquel le fichier principal fait référence.....	51
Figure 3.5	Exemple de restitution d'une pile de pont avec l'algorithme « <i>Obj2matRGB</i> » à partir d'un modèle 3D (format *.obj) généré par le logiciel <i>Recap Photo</i> [®]	53
Figure 3.6	Schéma de principe de la sélection d'un point sur un modèle 3D affiché à l'écran.....	54
Figure 3.7	Représentation des vertex (en gris) du modèle 3D présentée sur la Figure 3.5 et de l'axe optique (pointillés rouges) matérialisant la direction entre le point de vue et un point cible (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).....	55

Figure 3.8	Représentation des vertex du modèle 3D après rotation (M_r – en kaki) reportés sur les différentes vues présentées sur la Figure 3.7. L'axe optique après rotation (AO_r , trait vert) est orthogonal au plan XY (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).	56
Figure 3.9	Détection des vertex (en bleu) situés dans un faisceau centré sur l' AO_r . À gauche - vue 3D générale. À droite - zoom et mise en évidence de deux ensembles de vertex situés sur deux faces opposées du modèle 3D.....	57
Figure 3.10	Cible sélectionnée (point rouge) parmi les vertex (en bleu) situés à proximité de l' AO_r (en vert). À gauche – vue 3D générale. À droite – vue dans le plan XY incluant uniquement les vertex dont les normales pointent dans la direction du point de vue.	58
Figure 3.11	Représentation du point cible (en vert) sur le modèle 3D initial (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).	59
Figure 3.12	Définition des quatre coins (P_1 à P_4) d'une zone d'étude à l'aide de l'algorithme <i>clic2cloud</i> . (Haut) - Vue dans le plan XY du modèle 3D texturé et des vertex du modèle après rotation (en kaki). Le vecteur P_1P_2 (en rouge) devient $P_1'P_2'$ (en bleu) après rotation et est parallèle à l'axe des abscisses (Bas).	61
Figure 3.13	Transformation projective permettant d'allouer aux vertex situés à l'intérieur du polygone $P_1'P_2'P_3'P_4'$ (à gauche) une couleur RGB dans le repère de la cartographie (à droite).	62
Figure 3.14	Cartographie de CDN projeté sur le modèle 3D.....	63
Figure 4.1	Exemple d'indexation des armatures à partir d'un radargramme relativement au front d'infiltration des chlorures.	67
Figure 4.2	Démarche d'intégration de données par fusion de CND.	68
Figure 4.3	Exemple de variogramme expérimental (points gris), modèle ajusté (trait rouge) et paramètres géostatistiques.	69
Figure 4.4	Schéma de principe de la simulation séquentielle bayésienne.	72
Figure 4.5	Caractéristiques géométriques de l'ouvrage (a) et emprise de la zone d'étude (b - en vert).	76
Figure 4.6	Cartographie d'enrobage et report sur le modèle photogrammétrique 3D.	77
Figure 4.7	Cartographie du potentiel de corrosion et report sur le modèle photogrammétrique 3D.	77
Figure 4.8	Cartographie d'humidité superficielle relative et report sur le modèle photogrammétrique 3D.	78
Figure 4.9	Implantation (points rouges) et valeurs des mesures de vitesse de corrosion (en $\mu\text{m}/\text{an}$) et du prélèvement (point jaune) reporté sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté.	79
Figure 4.10	Profil des teneurs en chlorures libres mesurées à proximité de l'axe du terre-plein central.....	80
Figure 4.11	Indicateur de risque obtenu par fusion de CND par rapport à la carbonatation et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge= mesure de V_{cor}).	81

Figure 4.12	Indicateur de risque obtenu par fusion de CND par rapport aux agressions par les ions chlorures et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge= mesure de V_{cor}).....	81
Figure 4.13	Cartographie de V_{cor} obtenue par cokrigeage et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge = mesure de V_{cor}).....	82
Figure 4.14	Du haut ver le bas – cartographies de probabilité que V_{cor} soit supérieure à 1,2,3,4,5 et 6 $\mu\text{m}/\text{an}$ obtenue par simulation séquentielle (point rouge = mesure de V_{cor}).....	83
Figure 4.15	Écart type des données simulées par SSB.....	84
Figure 4.16	Exemple de cartographie de probabilité que la vitesse de corrosion soit supérieure à 3 $\mu\text{m}/\text{an}$ obtenue par simulation séquentielle bayésienne, reportée sur le modèle photogrammétrique 3D de l’ouvrage ausculté.....	84
Figure 4.17	Cartographie de V_{cor} obtenue par arbre de décision (apprentissage supervisé) et report sur le modèle photogrammétrique 3D de l’ouvrage ausculté (point rouge=mesure de V_{cor}).....	85
Figure 4.18	Comparaison entre les mesures de vitesse de corrosion acquises et les données estimées par arbre de décision.....	85
Figure 5.1	Présentation générale des différentes interfaces du système d’exploitation <i>Datae</i>	91
Figure 5.2	Données d’entrée dans l’interface <i>Datae Monitoring</i>	93
Figure 5.3	Aspect général de l’interface <i>Datae Monitoring</i>	95
Figure 5.4	Exemple de prédiction de tendance avec <i>Datae Monitoring</i> – a : prédiction de l’évolution du basculement à 4 mois – b : Comparaison après trois mois de nouvelles données acquises.....	97
Figure 5.5	Aspect général de l’interface <i>Datae 2D map</i> pour le panneau 1 : gestion et de représentation des données sur support photographique.....	99
Figure 5.6	Aspect général de l’interface <i>Datae 2D map</i> pour le panneau 2 : intégration des données par méthodes géostatistiques.....	99
Figure 5.7	Aspect général de l’interface <i>Datae 2D map</i> pour le panneau 3 : intégration des données par apprentissage supervisé.....	100
Figure 5.8	Vue générale de la pile auscultée sous la passerelle Adrien Pouillot (Ville de Québec).....	101
Figure 5.9	Exemple d’exploitation des données acquises sur une pile de la passerelle Adrien Pouillot dans l’interface <i>Datae 2D map</i> . Les cartographies superposées en transparence sur la photographie sont présentées individuellement sous celle-ci.....	101
Figure 5.10	Gains de temps obtenus pour l’acquisition (gauche) et la représentation (droite) des données de CND à grand rendement sur plusieurs plans d’une structure entre l’approche conventionnelle (en gris) et l’utilisation de <i>Datae 2D map</i> (en vert).....	102
Figure 5.11	Comparaison du nombre de points d’acquisition (gauche) et des coûts de réalisation associés (droite) entre une approche conventionnelle et l’utilisation des méthodes d’intégration de données utilisées dans <i>Datae 2D map</i>	104

Figure 5.12	Aspect général de l'interface <i>Datae 3D map</i>	105
Figure 5.13	Vue générale de la jetée d'embeckage du port de St Malo (France).....	106
Figure 5.14	Modèle de la jetée d'embeckage du port de St Malo, représenté dans l'interface <i>Datae 3D map</i> ..	107
Figure 5.15	Représentation des données d'investigation sur site de la jetée d'embeckage du port de St Malo dans l'interface <i>Datae 3D map</i>	108
Figure 5.16	Exemple de synthèse des résultats pour un carottage réalisé sur la jetée d'embeckage du port de St Malo.	108
Figure 5.17	Aspect général de l'interface <i>Datae Courburemétrie</i>	110
Figure 5.18	Exemple d'exploitation de données de courburemétrie dans l'interface <i>Datae Courburemétrie</i>	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Principaux moyens de caractérisation sur site des ouvrages en béton armé.	25
Tableau 2.2	Principaux moyens de caractérisation en laboratoire des ouvrages en béton armé.	35
Tableau 2.3	Synthèse des principaux outils logiciels pour la représentation des ouvrages.....	39
Tableau 2.4	Synthèse des principaux outils de représentation et d'analyse de données en génie civil	40
Tableau 2.5	Solutions logicielles disponibles confrontées aux objectifs visés par le projet (en rouge : discordance franche, en vert clair : concordance potentielle, en vert foncé : concordance franche).....	41
Tableau 4.1	Classification des données de CND indexées	67
Tableau 4.2	Coefficient de corrélation entre les valeurs de CND à grand rendement et de V_{cor}	79
Tableau 4.3	Synthèse des principales caractéristiques des mesures réalisées sur l'ouvrage	80
Tableau 4.4	Synthèse de la fusion de CND par rapport à la taille de la zone d'étude	82
Tableau 4.5	Synthèse des principales caractéristiques des techniques d'intégration de données utilisées.	88
Tableau 5.1	Synthèse des principales caractéristiques des données d'entrées supportées par <i>Datae</i>	94
Tableau 5.2	Exemple de gain financier direct entre une approche conventionnelle et en utilisant <i>Datae 2D map</i> dans le cadre d'une auscultation par CND réalisée sur 4 plans consécutifs	103
Tableau 5.3	Exemple de gain financier direct entre la réalisation d'une cartographie de données primaires obtenue par une approche conventionnelle et par les méthodes d'intégration de données utilisées dans <i>Datae 2D map</i>	104
Tableau 5.4	Synthèse des apports techniques, des gains directs et indirects générés par l'utilisation du système d'exploitation <i>Datae</i>	113

LISTE DES ALGORITHMES

Algorithme 3.1	Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « <i>map2pic</i> ».....	48
Algorithme 3.2	Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « <i>Obj2matRGB</i> ».....	52
Algorithme 3.3	Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « <i>click2cloud</i> ».....	60
Algorithme 3.4	Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « <i>map2cloud</i> ».....	64

1 INTRODUCTION

« Plus on fait de progrès dans l'expérience, plus on approche de l'impénétrable ; plus on apprend à utiliser l'expérience, plus on voit que l'impénétrable n'a aucune utilité pratique. »

Johann Wolfgang Von Goethe ; Les maximes et réflexions (1749-1832)

1.1 Préambule

Les travaux présentés dans cette thèse ont été motivés par l'accumulation, au fil des ans, de constats simples issus de retours d'expérience dans différentes compagnies œuvrant dans le secteur du diagnostic et de la maintenance des ouvrages du génie civil. Ces constats sont les suivants :

- Constat N°1 : Les évolutions technologiques et la révolution des objets connectés donnent accès à des volumes de données de plus en plus importants et de plus en plus diversifiés.
- Constat N°2 : Les tâches confiées aux ingénieurs d'étude sont inégalement réparties entre la phase d'exploitation, de traitement et de mise en forme des données et la phase d'analyse et d'interprétation des résultats.
- Constat N°3 : Les données acquises sont éparses, partielles et sont parfois difficilement corrélables.
- Constat N°4 : Les gestionnaires d'ouvrages sont les propriétaires des données acquises et ont, à ce titre, un droit de regard sur celles-ci.
- Constat N°5 : Les rapports d'étude sont trop longs, difficilement réutilisables dans le temps, pas assez synthétiques et pas assez intelligibles pour les gestionnaires d'ouvrages.

Dans un contexte de production et bien qu'étant identifiés, ces différents constats sont omis ou pour le mieux approchés de façon parcellaire.

Ce projet vise à apporter une forte valeur ajoutée aux études conventionnelles par le développement d'une solution concrète et opérationnelle réalisée à mi-chemin entre le milieu académique et le monde industriel.

1.2 Mise en contexte

L'optimisation de la maintenance des ouvrages de génie civil est, de nos jours et pour de nombreuses années, une préoccupation majeure pour les maîtres d'ouvrages et les exploitants. Parmi le patrimoine d'ouvrages, celui des structures en béton armé est le plus vaste en nombre et en typologies, puisqu'il recouvre entre autres des ouvrages aussi divers que des tuyaux de réseaux d'assainissement, des pylônes, des silos, des bâtiments, des ponts, des viaducs, etc. La corrosion des armatures représente 80 % des pathologies observées pour les structures de génie civil en béton armé. Selon la WCO (World Corrosion Organization, 2018), les coûts engendrés par les problèmes de corrosion représentent 3 à 4 % du PIB des pays industrialisés. La maîtrise du vieillissement de ces ouvrages est donc un enjeu économique majeur (Ollivier & Vichot, 2008) au moment où leur âge moyen va imposer de faire des choix importants concernant leur maintenance, le prolongement de leur durée de vie ou leur remplacement.

Au-delà de la dimension économique, le vieillissement des ouvrages peut également entraîner des risques pour les usagers, comme en témoignent les tristes exemples de l'effondrement du viaduc de la Concorde à Laval (banlieue de Montréal), qui a causé cinq décès, ou plus récemment celui du viaduc de Gênes qui a causé plus de quarante décès.

En raison de l'utilisation des sels déglaçant en hiver, le Canada est particulièrement affecté par ces problèmes de corrosion, qui ont des conséquences importantes, voire désastreuses, sur la durée de vie des ouvrages. Les coûts de réparation et de remplacement engendrés par la corrosion sont estimés à 10 milliards de dollars. Au Québec, on estimait en 1998 que 25% des 4000 ouvrages en béton armé gérés par le Ministère des Transports se trouvaient dans un état de détérioration avancé (Ollivier & Vichot, 2008). Même si dans certains cas, les conséquences ne sont pas structurelles, elles peuvent affecter l'esthétique de l'ouvrage et donc déprécier son image auprès des utilisateurs (habitants d'immeubles par exemple).

Les structures en béton armé requièrent une inspection répétées dans le temps car les coûts de réparation explosent plus la dégradation est avancée (Koch *et al.*, 2001). De surcroit, plus les réparations sont importantes, plus elles sont susceptibles d'entraîner des nuisances pour les usagers comme, par exemple, la fermeture d'un pont pendant les travaux de réparation ayant un impact non négligeable sur les retards de déplacements, et donc un coût pour les entreprises. Cette indisponibilité de l'ouvrage s'accompagnera également de pertes d'exploitation pour le gestionnaire d'ouvrage. À titre d'exemple, un jour d'arrêt d'un réacteur nucléaire entraîne un manque à gagner d'un million de dollars. Le coût de réfection partielle d'un aéroréfrigérant est de l'ordre de 4 à 12 M\$.

La problématique liée au phénomène de corrosion des ouvrages en béton armé représente donc un fardeau financier colossal bien supérieur au seul budget de maintenance.

Il apparaît ainsi nécessaire de favoriser la gestion préventive au dépend de la maintenance curative pour atteindre ou rallonger la durée de vie des ouvrages et réduire les coûts associés. Une des clés, pour atteindre cet objectif, est la surveillance des phénomènes de vieillissement prévisibles et/ou pathologiques (Frangopol & Tsompanakis, 2014) si possible de manière non destructive. Cette surveillance doit être adaptée en fonction de l'âge de l'ouvrage, allant des études amont à la maîtrise d'œuvre en passant par le diagnostic visuel, le diagnostic mesures et les études. La Figure 1.1 présente le segment de positionnement du présent projet dans le cycle de vie d'un ouvrage.

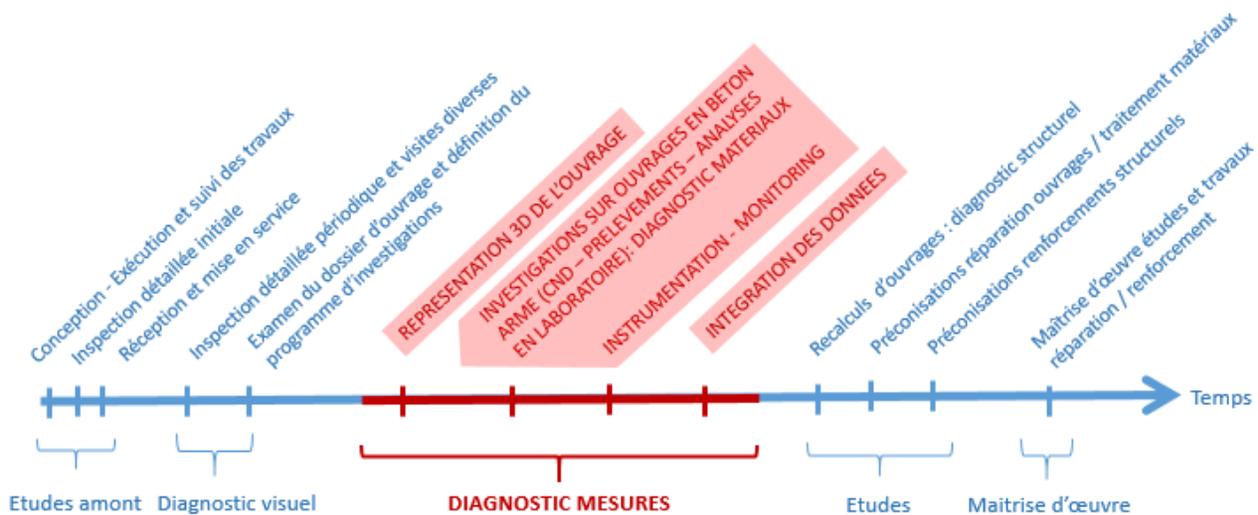


Figure 1.1 Étapes du cycle de vie d'un ouvrage et segment de positionnement du projet (en rouge).

Cette figure indique que le diagnostic mesures est au cœur du cycle de vie des structures et qu'il représente une étape indispensable dans la gestion et la surveillance d'un ouvrage, une phase d'anticipation cruciale permettant de limiter les coûts de maintenance et de réparation, les pertes d'exploitation, les pertes matérielles, et plus rarement et fort heureusement, les pertes humaines.

Le diagnostic mesures peut se décomposer en trois principaux volets. Le premier volet concerne la représentation 3D de l'ouvrage considéré, étape préalable permettant de restituer la géométrie de la structure dans son environnement direct. Le second volet concerne les différents types d'investigations pouvant être réalisés sur l'ouvrage, parmi lesquelles les contrôles non destructifs (CND), les prélèvements pour analyses en laboratoire, les mesures de suivi temporel (*monitoring*) et d'instrumentation. Le troisième volet concerne l'intégration des différentes mesures acquises de manière à fournir un diagnostic précis de l'état de l'ouvrage.

1.3 Enjeux, objectifs et problématique

L'enjeu de ce projet de recherche et développement est à la fois technique et économique.

L'enjeu technique est lié à la gestion et l'utilisation de l'important volumes de données multi-échelles, multi-paramètres, multi formats et temporelles générés par les différents volets du diagnostic mesures (cf. Figure 1.1). Ces données peuvent provenir de plusieurs instruments mesurant des propriétés physiques différentes à la surface de structures aux géométries complexes. Il apparaît ainsi nécessaire de hiérarchiser, de corrélérer et d'intégrer ces données pour favoriser leur intelligibilité et leur exploitation.

L'enjeu économique est lié aux différents constats énoncés en préambule (cf. 1.1) qui ont mis en évidence la nécessité, pour les gestionnaires d'ouvrages, d'optimiser les coûts de maintenance tout en disposant d'un diagnostic précis et le plus exhaustif possible. Pour les ingénieurs en charge des diagnostics, l'optimisation des coûts passe par une réorganisation du temps alloué aux différentes phases d'une étude de manière à limiter les durées d'acquisition, de traitement et de mise en forme des données, pour se consacrer plus spécifiquement et/ou plus longuement à leur analyse et à leur exploitation.

La Figure 1.2 schématise les enjeux du projet en termes de pourcentage de temps globalement alloué à chacune des phases d'une étude de diagnostic mesures, soit l'acquisition des données, le traitement et la mise en forme, l'analyse et la rédaction du rapport d'étude.

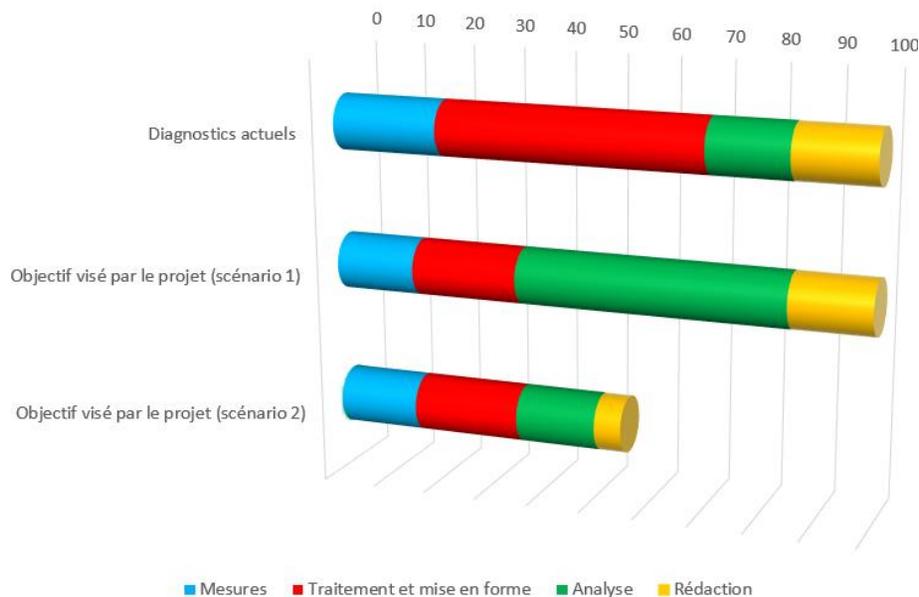


Figure 1.2 Schéma de principe du temps alloué aux différentes phases d'une étude de diagnostic mesures (Crédit SETEC).

Cette figure met en évidence la répartition actuelle des différentes phases d'une étude ainsi que les deux scénarios visés par le projet.

La répartition actuelle (diagramme du haut) indique une prépondérance du temps alloué au traitement et à la mise en forme des données, comparativement au reste des tâches.

Le premier scénario (diagramme du milieu), vise à accroître considérablement la proportion du temps alloué à l'analyse des données au détriment du temps alloué à leur traitement et de leur mise en forme, en conservant une durée totale d'étude similaire aux durées actuelles. Ce scénario est envisagé dans le cadre de diagnostic globaux complexes nécessitant phase d'analyse importante.

Le second scénario (diagramme du bas), vise principalement à raccourcir la durée totale des études en limitant le traitement et la mise en forme des données. Ce scénario est envisagé dans le cas de diagnostic mesures relativement simples et limités à des zones circonscrites.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de créer une solution logicielle permettant la visualisation, l'intégration et l'exploitation des données disponibles et pertinentes dans le cadre d'un diagnostic d'ouvrage en tenant compte des enjeux technique et économique précédemment mentionnés. Ceci dans le but d'offrir aux ingénieurs et aux gestionnaires un outil d'aide à la prise de décisions dans le cadre du diagnostic et de la maintenance des ouvrages du génie civil.

Pour atteindre cet objectif, trois problématiques complémentaires sont abordées dans cette thèse.

La première problématique concerne la mise à disposition et la restitution des supports de représentation des données en fonction du contexte et des objectifs visés par le diagnostic réalisé. Le support de représentation devant être alimenté par les données acquises, ceci pose également le problème de l'interaction données/support. Ces supports de représentation pourront en effet être différents selon les données à exploiter, l'ampleur de la zone d'étude et la typologie de l'ouvrage concerné.

La seconde problématique concerne le développement, la validation et la mise à disposition d'outils d'analyse et d'intégration des données multi-échelles et multivariées en utilisant des méthodes d'assimilation de données novatrices dans le secteur du génie civil.

La troisième problématique concerne la création du système d'exploitation, permettant de centraliser sur une plateforme unique, les supports de représentation et les outils d'analyse et d'intégration de données de manière accessible et ergonomique.

1.4 Contributions originales

Cette thèse présente trois principales contributions originales.

La première contribution originale concerne différents développements algorithmiques permettant d'améliorer la représentativité des mesures acquises et leurs interactions avec les supports de représentation.

Une seconde contribution concerne l'apport des méthodes d'intégrations de données utilisées et leur application dans le cadre de l'aide au diagnostic des ouvrages du génie civil. Cette contribution originale fait l'objet d'un article soumis à la revue *Journal of Building Engineering* :

- Anterrieu, O., Giroux, B., Gloaguen, E., & Carde, C. (2018) *Non-destructive data assimilation as a powerful tool to diagnose corrosion rate in reinforced concrete structures*. Soumis à *Journal of Building Engineering* en date du 05 Octobre 2018.

La troisième contribution originale est le développement du système d'exploitation et des interfaces graphiques centralisant les informations utiles au diagnostic sur une plateforme unique. Ceci permettant à la fois d'interagir avec le support de représentation (1D à 3D), de l'alimenter au fil du temps avec de nouvelles données et de les assimiler à l'aide d'outils d'intégration innovants.

2 ETAT DES CONNAISSANCES

L'état de dégradation d'un ouvrage du génie civil en béton armé est intimement lié à ses modes de conception et de construction, aux conditions d'exploitation et aux agressions environnementales auxquels il est soumis. Dans ce contexte, différentes pathologies peuvent se développer en surface ou au sein du béton, pouvant affecter à plus ou moins long terme l'intégrité de la structure, jusqu'à conduire à sa démolition ou à son effondrement. Pour éviter d'atteindre de telles extrêmes et mieux appréhender les phénomènes à l'origine des désordres, il existe différents moyens de caractérisation de l'état de développement des pathologies et des dégradations associées.

Ce chapitre s'intéresse dans un premier temps aux pathologies pouvant affecter les ouvrages en béton armé et s'inspire des informations disponibles dans le livre de (Ollivier & Vichot, 2008). Par la suite, ce chapitre décrit les moyens de caractérisation de ces pathologies, sur site comme en laboratoire. Les principaux outils de représentation de l'état des ouvrages et les solutions logicielles actuelles d'aide à la maintenance sont ensuite présentés.

2.1 Principales pathologies des ouvrages en béton armé

La fiabilité et l'utilisation à bon escient des diagnostics passent par la maîtrise et la compréhension des interactions physico-chimiques au sein et entre les matériaux. Le béton est un matériau « vivant » qui peut, sous certaines conditions, développer des pathologies physico-chimiques en relation avec l'environnement auquel il est exposé et/ou la nature et les caractéristiques de ses constituants. Ces pathologies conduisent généralement à un affaiblissement des structures dans le temps, principalement lié à une altération du béton et/ou des armatures. Il est important de souligner que lorsqu'un béton est affecté par une pathologie physico-chimique, des pathologies secondaires peuvent être induites : un ouvrage fissuré sous l'effet d'un phénomène d'alcali-réaction pourra par exemple développer une corrosion précoce des armatures par diffusion de composés agressifs au travers des fissures.

Le diagnostic des ouvrages étant fréquemment motivé par le développement potentiel de pathologies, ce paragraphe inventorie les principaux phénomènes physico-chimiques à l'origine des pathologies des ouvrages en béton armé, en mettant une emphase particulière sur la pathologie la plus répandue : la corrosion des armatures.

2.1.1 Corrosion des armatures

En raison de sa basicité (pH ~ 13), le béton sain est un milieu naturellement protecteur pour les armatures autour desquelles se forme un film passif (solution solide $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3$) qui réduit la vitesse de corrosion à une valeur négligeable.

Dans certaines conditions, comme la carbonatation du béton d'enrobage ou une teneur critique en chlorures au droit des armatures, cet équilibre peut être rompu en entraînant une dépassivation de l'acier et l'amorçage d'un phénomène de corrosion.

Dans les deux cas, la destruction du film passif et la dégradation du métal mettent en jeu un mécanisme de piles électrochimiques avec des zones anodiques, des zones cathodiques et un milieu électrolytique constitué par la solution interstitielle du béton.

La Figure 2.1 schématise le phénomène de corrosion dû à la carbonatation et à la pénétration des chlorures. Au niveau de l'anode, le métal est dissous avec production d'électrons qui sont consommés au niveau de la cathode, par réduction de l'oxygène, cette réaction entraînant la libération d'ions hydroxyle OH^- .

Ces derniers réagissent ensuite avec les ions ferreux produits au niveau de l'anode pour former, en présence d'oxygène, des oxydes et hydroxydes de fer gonflants.

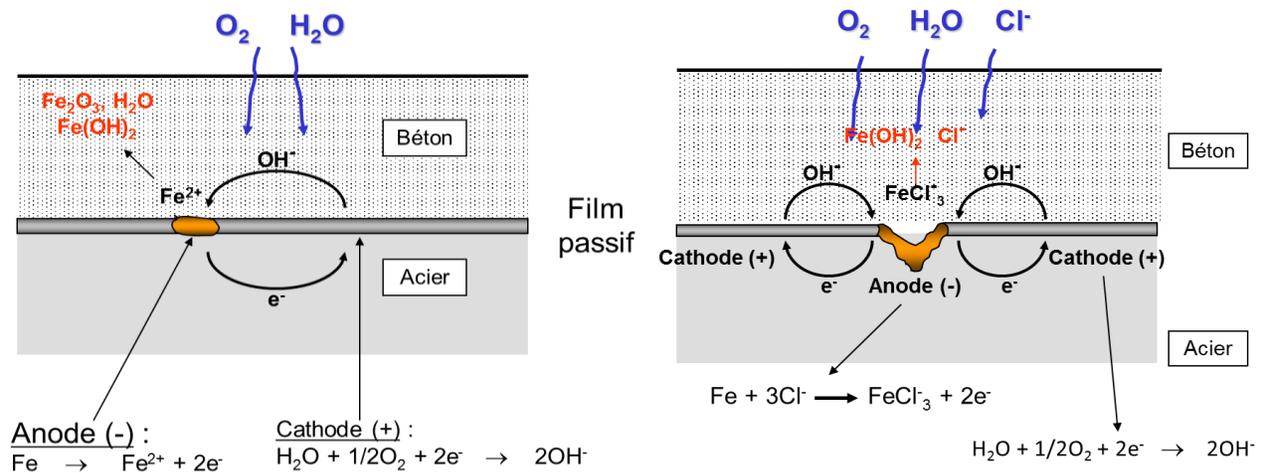


Figure 2.1 Principe de la réaction chimique à l'origine de la corrosion par carbonatation (à gauche) et par pénétration des ions chlorures (à droite) (Crédit SETEC).

Dans tous les cas, la corrosion ne peut se développer qu'en présence d'oxygène, ce qui explique, entre autres, que les cinétiques de corrosion dans les structures immergées en béton sont très faibles.

Dans les bétons, la corrosion des armatures peut être initiée par deux facteurs distincts :

- La carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO_2 atmosphérique ;
- La pénétration des ions chlorure depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieux industriels particuliers).

Dans le cas de la carbonatation, les armatures sont dépassivées par la diminution du pH aux environs de 9, occasionnée par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique. La dépassivation intervient ainsi lorsque le front de carbonatation atteint les armatures.

Dans le cas des chlorures, la dépassivation est initiée lorsqu'une teneur critique en chlorures arrive au niveau des armatures.

Il est admis que ce seuil critique correspond à un rapport de concentration Cl^-/OH^- compris entre 0,6 et 1, soit de manière plus pratique en fonction de l'alcalinité du béton, une teneur en chlorures de 0,4 %, exprimée par rapport à la masse de ciment.

C'est cette valeur qui est retenue dans le cas des bétons armés. Ce seuil est abaissé à 0,1 % dans le cas des bétons précontraints.

Les principales incidences de la corrosion des armatures sont le développement d'une fissuration le long des armatures corrodées, l'apparition d'épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) et une diminution de la section d'acier dans les sections mécaniquement sollicitées. La Figure 2.2 illustre les conséquences du phénomène de corrosion en environnement marin.



Figure 2.2 Illustration des conséquences du phénomène de corrosion des armatures en environnement marin (Crédit SETEC).

2.1.2 Alkali-réaction

L'alkali-réaction ou réaction alcali-granulat (RAG), correspond à une réaction de gonflement se produisant, en présence d'humidité, entre certaines phases minérales mal cristallisées contenues dans certains types de granulats et les alcalins présents dans la solution interstitielle du béton, fortement basique. Les produits de réactions, essentiellement présents sous forme de gels, peuvent développer un gonflement conduisant à d'importants phénomènes de faïençage, de fissuration ou d'éclatement du béton généralement associés à des phénomènes d'exsudations des gels au travers des fissures. La Figure 2.3 illustre les conséquences du phénomène d'alkali-réaction.

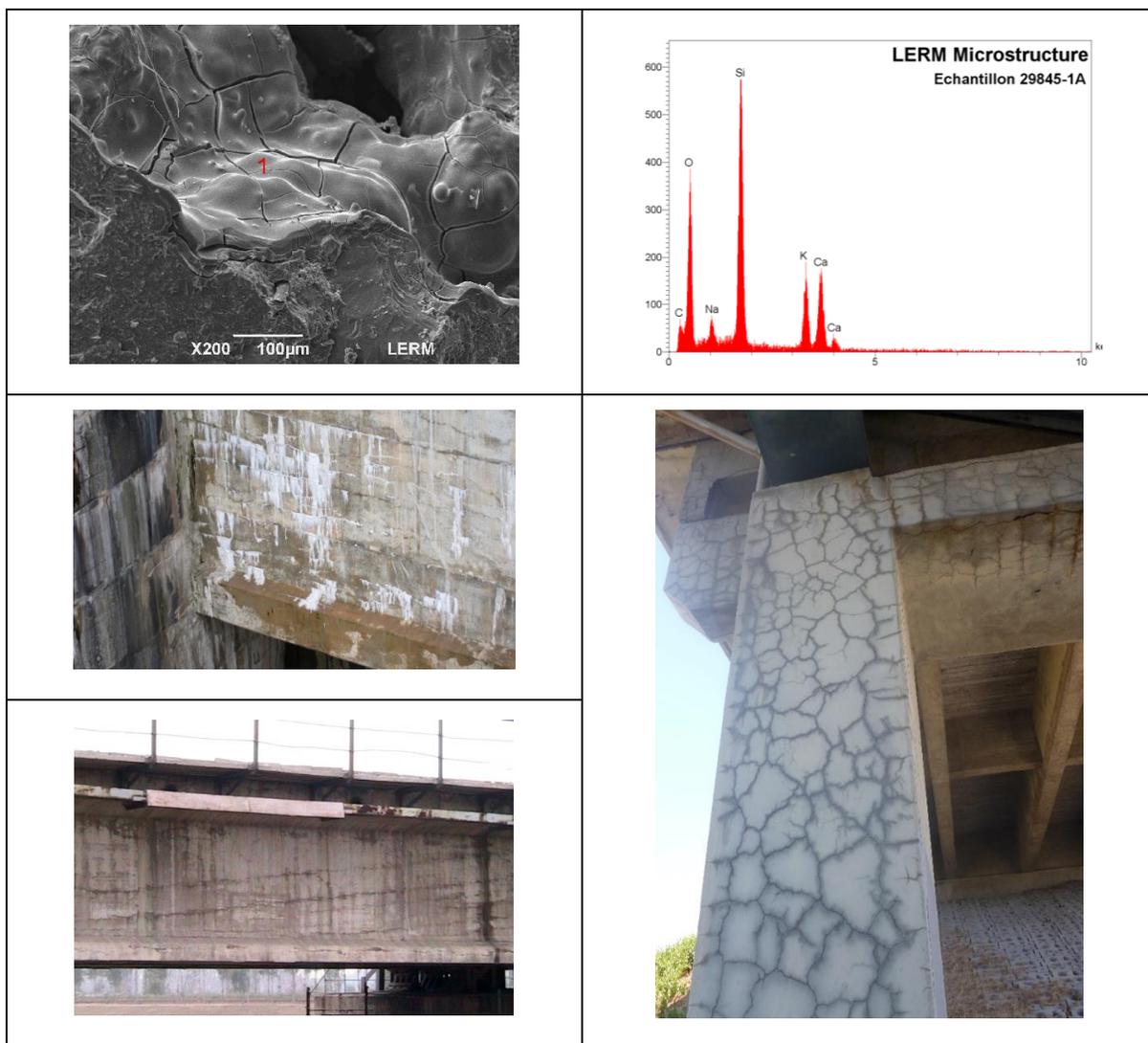


Figure 2.3 Gel d'alkali-réaction observé au microscope électronique à balayage (en haut) et illustration des conséquences du phénomène d'alkali-réaction sur les structures (Crédit SETEC).

2.1.3 Gel-dégel

Un béton soumis à des températures négatives voit une partie de l'eau contenue dans sa porosité geler. Le passage de l'eau contenue dans les pores de l'état liquide à l'état solide tend à augmenter le volume du béton lorsqu'il est soumis au gel. Lors de ce phénomène, l'eau des pores restée à l'état liquide est également soumise à des pressions hydrauliques.

La répétition de cycles de gel/dégel et les mécanismes liés à la transformation de l'eau en glace et aux pressions hydrauliques qui en découlent peuvent produire une (micro)fissuration dans la masse du béton et/ou un écaillage de la surface du béton.

La perte d'enrobage lié à l'écaillage et l'utilisation des sels de déverglaçage combinée à la présence de fissures, peuvent favoriser la migration des chlorures au sein du béton et contribuer au développement de la corrosion des armatures tel qu'illustré sur la Figure 2.4.



Figure 2.4 Illustration des conséquences de cycles répétés de gel-dégel (Crédit SETEC).

2.1.4 Gonflement – Réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) est consécutive à la formation d'ettringite dans la masse du béton durci. L'ettringite (trisulfo-aluminate de calcium hydraté) est un hydrate qui se forme dans les premiers instants de l'hydratation des ciments. Dans certaines conditions, notamment liées à un fort échauffement du béton au moment de la prise (pièces massives, bétons étuvés), l'ettringite ne peut pas se former au moment de l'hydratation car elle n'est stable que jusqu'à des températures inférieures à 80 °C. Les sulfates restant en solution dans le béton, l'ettringite peut alors se former de façon différée, en présence d'humidité. Elle développe alors des pressions de cristallisation supérieures à la résistance en traction de la pâte de ciment qui conduisent, à l'échelle des ouvrages, à des phénomènes de faïençage et de fissuration analogues à ceux qui peuvent être observés dans le cas des phénomènes d'alcali-réaction (cf. Figure 2.3). La Figure 2.5 illustre les conséquences du phénomène de réaction sulfatique interne.

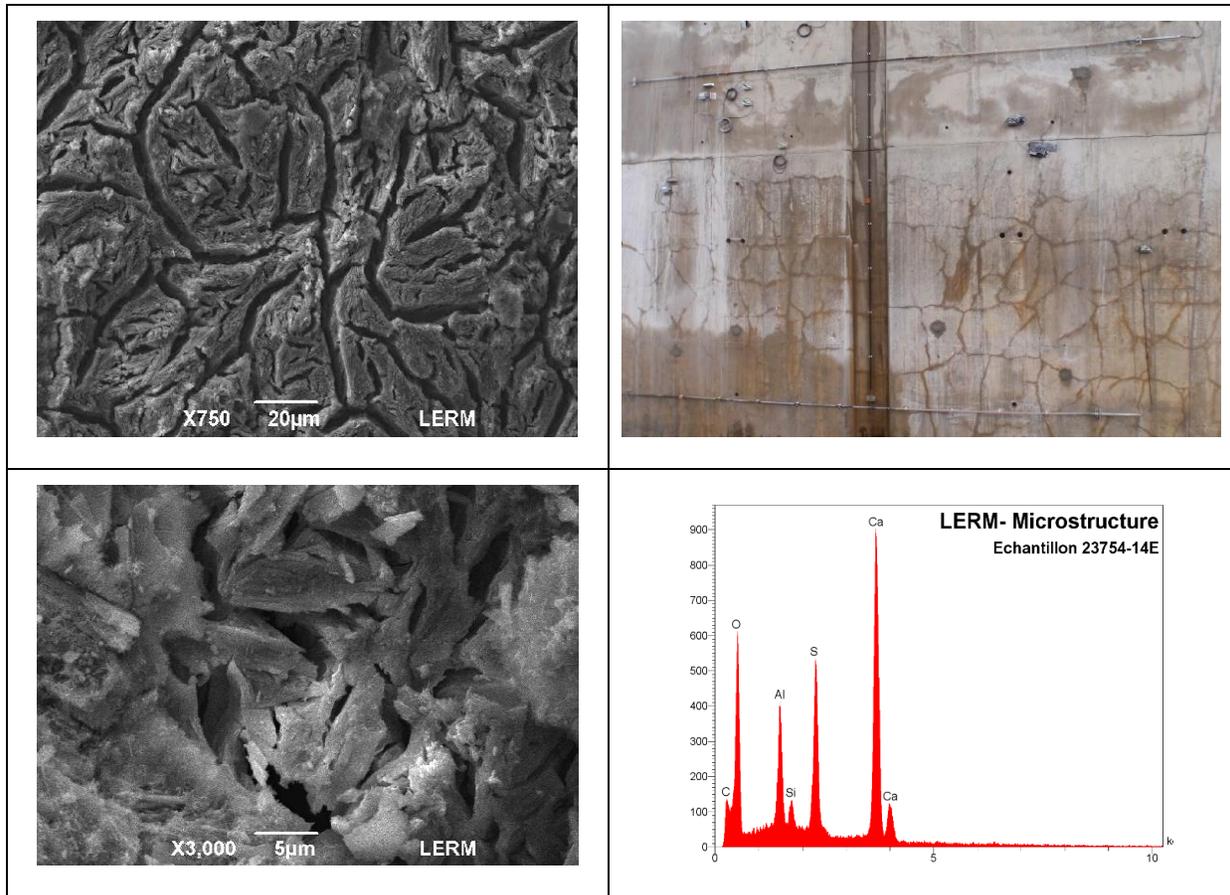


Figure 2.5 Ettringite massive observée au microscope électronique à balayage (à gauche) et illustration des conséquences du phénomène de gonflement (à droite) (Crédit SETEC).

2.2 Principaux moyens de caractérisation sur site

La caractérisation des pathologies des ouvrages et l'évaluation de leur état peut être réalisée sur site à l'aide de plusieurs méthodes.

D'une part, les outils de contrôles non destructifs (CND) permettent d'ausculter les ouvrages de manière non intrusive (sans les « détériorer ») et de mesurer différents paramètres physiques intrinsèques à la structure donnant des informations indirectes sur son état.

Il existe également des méthodes d'évaluation mécanique des ouvrages permettant de déterminer leurs performances structurelles résiduelles sous sollicitations contrôlées.

Par ailleurs, des instruments de *monitoring* permettent d'assurer le suivi temporel de certains paramètres utiles dans la caractérisation des structures. Ce paragraphe présente ces différents outils de caractérisation des ouvrages, à la fois complémentaires et indissociables des moyens d'investigations destructifs conventionnels, également indispensables pour l'analyse des matériaux en laboratoire.

2.2.1 Les contrôles non destructifs

Différentes techniques de CND permettent d'inspecter les ouvrages en béton armé en fonction de la problématique (IFSTTAR & CEREMA, 2015), des pathologies supposées ou avérées, de la connaissance du dossier d'ouvrage et des inspections visuelles préalablement réalisées. Dans le cadre de cette thèse, plusieurs méthodes ont été identifiées pour leurs pertinences dans l'apport au diagnostic des ouvrages et/ou pour la possibilité de travailler à grand rendement (plusieurs centaines de m² / jour). Ce paragraphe présente succinctement le principe et l'intérêt des méthodes choisies.

2.2.1.1 Réflectométrie radar

La réflectométrie radar est une méthode géophysique à grand rendement, basée sur l'analyse du temps de trajet et de l'amplitude d'ondes électromagnétiques de haute fréquence (~800 MHz à 3 GHz) respectivement générées et enregistrées par une antenne émettrice et une antenne réceptrice. Le temps de trajet et l'amplitude des signaux enregistrés (traces) sont liés aux contrastes de permittivité électrique des différents matériaux traversés. L'enregistrement de la juxtaposition des traces, obtenu en déplaçant les antennes d'un pas constant à la surface du parement en béton, permet de représenter une coupe temps/profondeur à l'aplomb du profil de mesure, appelé radargramme. Un exemple de radargramme est présenté à la Figure 2.6.

Cette méthode permet notamment de détecter, de positionner et de dénombrer avec précision les armatures d'une structure, de mesurer leur enrobage, de reconstituer le plan de ferrailage d'éléments structurels (poutres, poteaux, dalles, etc.), de mesurer des épaisseurs, de détecter des vides ou d'évaluer, par exemple, le taux d'humidité du matériau (Dérobert *et al.*, 2008; Hugenschmidt, 2010).

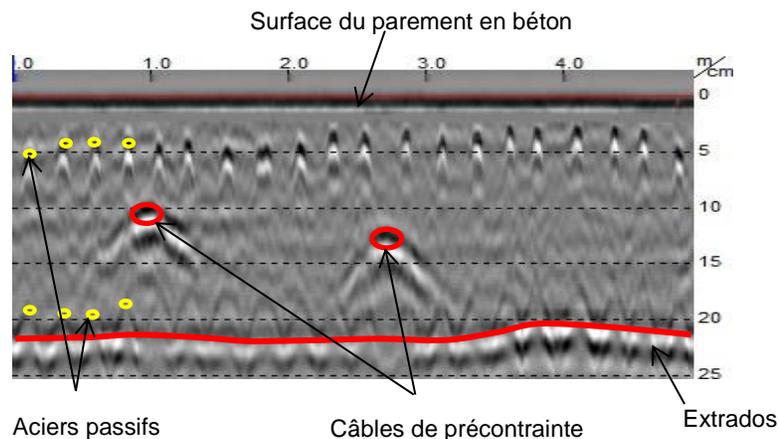


Figure 2.6 Exemple de radargramme interprété (Coupe profondeur sur une poutre en béton précontraint auscultée avec une antenne 3GHz (Crédit SETEC).

2.2.1.2 Potentiel de corrosion

La mesure de potentiel d'électrodes permet d'évaluer de façon qualitative la probabilité de corrosion active des armatures des structures en béton armé. C'est une méthode électrochimique basée sur la mesure de la différence de potentiel électrique (en mV) générée entre une armature enrobée de béton et une électrode impolarisable (dite électrode de référence - $Cu/CuSO_4$) déplacée sur le parement en béton (Elsener *et al.*, 2003). Sur certains dispositifs, l'électrode de référence est montée sur une roue permettant de réaliser les mesures de potentiel à grand rendement.

En mesurant la différence de potentiel selon une maille prédéfinie, cette technique permet de réaliser une cartographie du potentiel de corrosion active des armatures telle que présentée sur la Figure 2.7.

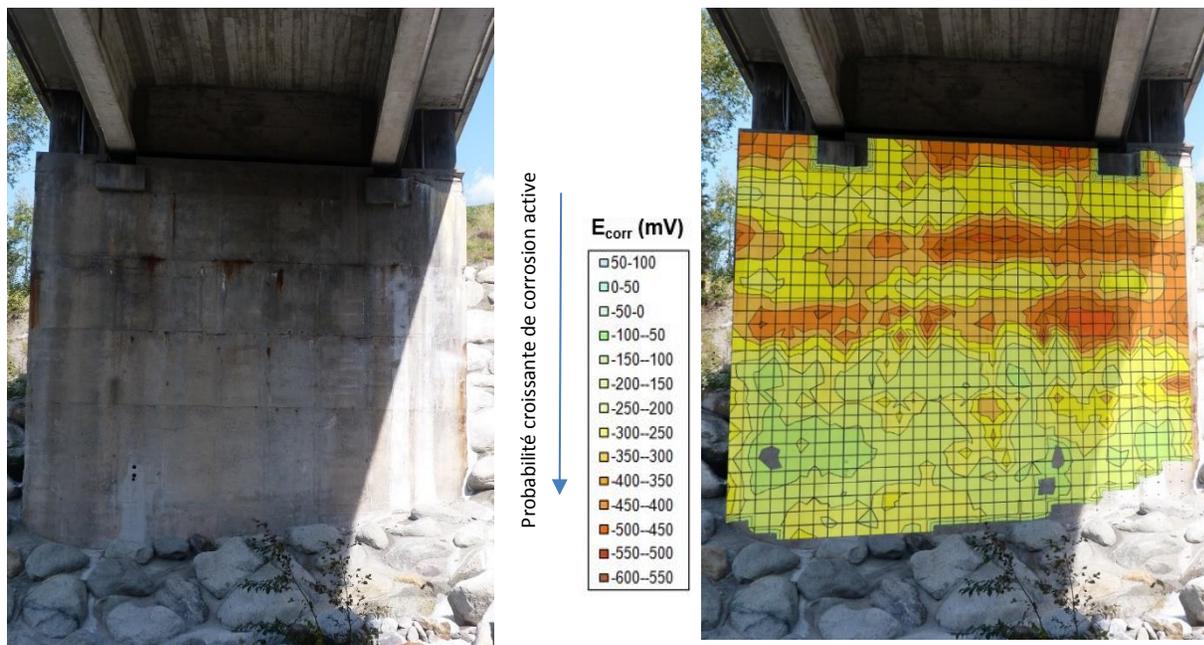


Figure 2.7 Aspect général d'une culée de pont (gauche) et cartographie du potentiel de corrosion (droite) (Crédit SETEC).

2.2.1.3 Capacimétrie électrique

La mesure par capacimétrie électrique permet de localiser des zones humides au sein des parements en béton (Dérobert *et al.*, 2008). Cette méthode est basée sur la mesure indirecte de la constante diélectrique relative du béton, propriété difficilement mesurable mais faisant varier la capacité électrique (valeur caractéristique d'un condensateur en électronique). Sachant que la

constante diélectrique d'un matériau varie essentiellement en fonction de sa teneur en eau, il est ainsi possible de déterminer, de manière qualitative, les variations spatiales et/ou temporelles d'humidité au sein du béton, comme le montre la Figure 2.8.

Cette mesure d'humidité relative à la surface du béton permet de déceler un environnement propice à l'initiation et au développement du phénomène de corrosion. Le capteur capacimétrique peut être monté sur une roue permettant de réaliser les mesures à grand rendement.



Figure 2.8 Aspect général d'un mur de soutènement (en haut) et distribution spatiale de l'humidité superficielle relative du béton obtenu par capacimétrie électrique (en bas) (Crédit SETEC).

2.2.1.4 Vitesse de corrosion

Cette méthode électrochimique est basée sur l'analyse de la réponse électrique d'une armature soumise à un champ électrique contrôlé et confiné (Andrade & Alonso, 2001; Andrade & Alonso, 2004). En appliquant un courant constant (I_{app}) au niveau de l'armature, un saut de potentiel instantané est observé (chute ohmique, correspondant d'abord à la résistance électrique du béton d'enrobage (R_{enrob}) puis à la polarisation progressive de l'armature). L'étude de la courbe de polarisation telle que présentée sur la Figure 2.9, permet de déterminer la résistance de polarisation (R_p) de l'armature.

La résistance de polarisation, exprimée en $\Omega.cm^2$, représente la capacité de l'armature à se charger électriquement sous l'influence d'impulsions électriques sur une surface polarisée connue.

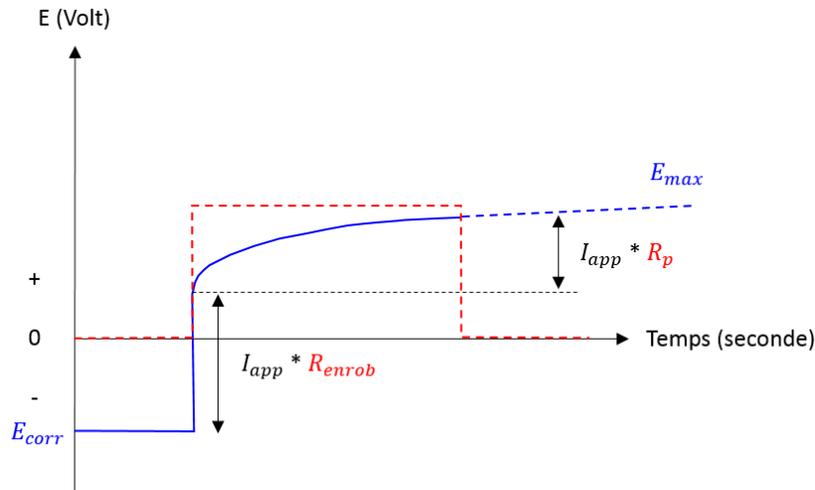


Figure 2.9 Schéma de la courbe de polarisation d'une armature soumise à un courant constant d'intensité I_{app} (Crédit SETEC).

Connaissant R_p , il est alors possible d'estimer la densité du courant de corrosion i_{corr} , exprimée en $\mu A/cm^2$, qui est obtenue à partir de l'équation de Stern-Geary (Stern & Geary, 1957) en divisant une constante B par R_p tel que :

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

Par convention, la valeur de B retenue est de ~ 26 mV pour les armatures en cours de corrosion active. La vitesse de corrosion (V_{corr}) est déduite de la densité du courant de corrosion et de la densité de l'acier via les lois de Faraday, et s'exprime comme suit (Andrade & Alonso, 2004) :

$$V_{corr} \sim 11.6 i_{corr}$$

La mesure de la vitesse de corrosion, exprimée en $\mu m/an$, permet d'estimer la perte de section des armatures en fonction du temps. Cette propriété est particulièrement pertinente dans une optique de durabilité des ouvrages car elle permet d'appréhender la cinétique d'évolution de la corrosion des armatures.

2.2.1.5 Résistivité électrique

La résistivité est un indicateur d'environnement favorable à l'initiation et au développement de la corrosion. Ce paramètre exprime la capacité de transport des charges électriques dans le fluide interstitiel et dépend notamment de la qualité et de l'humidité du béton, donc de sa porosité, et de la concentration en sels contaminants (chlorures notamment)

Le principe de la méthode consiste à mesurer, au moyen de deux électrodes (dites électrodes de potentiel), la différence de potentiel électrique (V) généré par l'injection d'un courant électrique (I) entre deux autres électrodes (dites électrodes de courant) (Lataste *et al.*, 2003; Polder, 2001). La résistivité est déduite du rapport V/I et de la géométrie du dispositif, généralement quadripolaire (Wenner : 4 électrodes alignées, dispositif carré, etc.). Les zones de faible résistivité (ou conductrice) présentent une forte humidité et/ou une forte teneur en sels dissous (chlorures) et sont donc des zones où le risque de corrosion active des armatures est important.

2.2.1.6 Vitesse du son

La mesure de la vitesse de propagation des ondes (ultra)soniques permet d'évaluer les paramètres élastiques du béton et d'en déduire l'homogénéité d'une structure (Saint-Pierre *et al.*, 2016).

Cette méthode est basée sur la mesure du temps de propagation des ondes de compression soniques et ultrasoniques (10 à 200 KHz) depuis une source (impact marteau) jusqu'à un récepteur (transducteur piézoélectrique). Une diminution anormale de la vitesse de propagation et/ou de l'amplitude des ondes longitudinales indique généralement la présence d'un défaut (fissure, matériau peu cohérent, etc.).

2.2.1.7 Vidéo-endoscopie

Certains ouvrages, comme les ouvrages en béton précontraint, présentent de nombreuses zones inaccessibles dès la construction (cachetage aux abouts de poutre, intérieur des gaines de précontrainte, etc.). D'autres ouvrages comme les barrages, les quais ou les tunnels peuvent parfois être assujettis à l'apparition d'importants désordres (délaminations, zones décomprimées, vides francs, etc.) liés aux infiltrations d'eau météorique, d'eau de surface ou d'eau de mer (zone de marnage, ressac).

La vidéo-endoscopie permet d'examiner ces désordres par le biais de l'introduction d'un flexible ombilical orientable équipé de fibres optiques dans un sondage préalablement réalisé. La Figure 2.10 présente une photographie extraite d'une acquisition par vidéo-endoscopie dans une gaine de précontrainte.

Cette méthode est un excellent complément à la méthode radar et la mesure de la vitesse du son car elle permet une observation directe des désordres internes d'un ouvrage. Il est ainsi possible d'évaluer de manière qualitative (typologie) et quantitative (cubature) l'ampleur des désordres mis en évidence par les méthodes non destructives.



Figure 2.10 Photographie extraite d'une acquisition par vidéo-endoscopie réalisée à l'intérieur d'une gaine de précontrainte (Crédit SETEC).

2.2.1.8 Autres contrôles non destructifs

Les méthodes de CND précédemment mentionnées sont les plus fréquemment mises en œuvre et les plus éprouvées dans le cadre de diagnostics d'ouvrages. Ce sont également celles dont la mise en œuvre a été privilégiée dans le cadre de ce projet.

En complément des techniques précédemment mentionnées, il existe néanmoins de nombreuses autres méthodes de CND disponibles pouvant être utilisées pour des besoins spécifiques (Maierhofer *et al.*, 2010). Il est notamment possible de citer :

- La thermographie infrarouge qui permet de cartographier rapidement les variations de température de l'enveloppe d'un ouvrage. Ces variations de température peuvent, dans certains cas, être corrélées à la présence de désordres au sein du béton tel que des décollements, des cavités, des zones d'infiltrations d'eau. Cette technique est également utilisée pour vérifier la bonne mise en œuvre de renforcement par matériaux composites collés.

- L'impact écho qui permet notamment de détecter des délaminations au sein du béton par l'analyse, dans le domaine fréquentiel, de la propagation d'ondes générées par un choc mécanique.
- La gammagraphie qui permet d'imager l'intérieur d'une structure dans son épaisseur par le biais de l'émission et de l'enregistrement des rayons gamma se propageant au travers de la structure. Cette méthode est délicate à mettre en œuvre car elle nécessite la manipulation d'une source radioactive et des habilitations spécifiques.
- Le scléromètre qui permet d'évaluer la dureté superficielle du béton par mesure de la vitesse du rebond d'une bille métallique projetée à la surface du parement.

2.2.2 Évaluation mécanique des ouvrages précontraints

L'évaluation des ouvrages en béton précontraint est essentielle car, contrairement aux ouvrages en béton armé qui montrent généralement des signes de fatigue structurelle permettant d'alerter les maîtres d'ouvrages, les ouvrages en béton précontraint révèlent peu de désordres avant rupture comme l'illustre l'effondrement récent du Pont Morandi à Gènes en Italie.

2.2.2.1 Courburemétrie

La courburemétrie est une méthode d'évaluation du comportement des ouvrages en béton précontraints, plus particulièrement des ouvrages d'art (ponts à poutres isostatique, ponts caissons, ponts dalle, ponts cadre ...), qui peut être utilisée sous circulation (solicitation dynamique) ou sous chargement maîtrisé (solicitation statique). En France, elle est encadrée par la méthode LPC n° 82 de l'IFSTTAR (Tonnoir *et al.*, 2014).

Le principe est basé sur le fait qu'une poutre en flexion sous l'effet des charges verticales prend en tous points de sa portée une « courbure » C , grandeur inverse du « rayon de courbure » local R issu du « centre de courbure » O situé (très loin) au-dessus de la poutre. La courbure est proportionnelle au moment sollicitant par la rigidité EI de la section : $C = M/EI$.

Grâce à cette relation, les principales applications de cette technique sont les suivantes :

- La détermination de l'inertie disponible de certaines sections critiques.
- La détermination des moments de décompression.
- L'évaluation rapide de la respiration de joints sous circulation à forte cadence d'acquisition.
- La détermination de la position de l'axe neutre en fonction de la position du chargement.
- La surveillance à long terme des ouvrages.

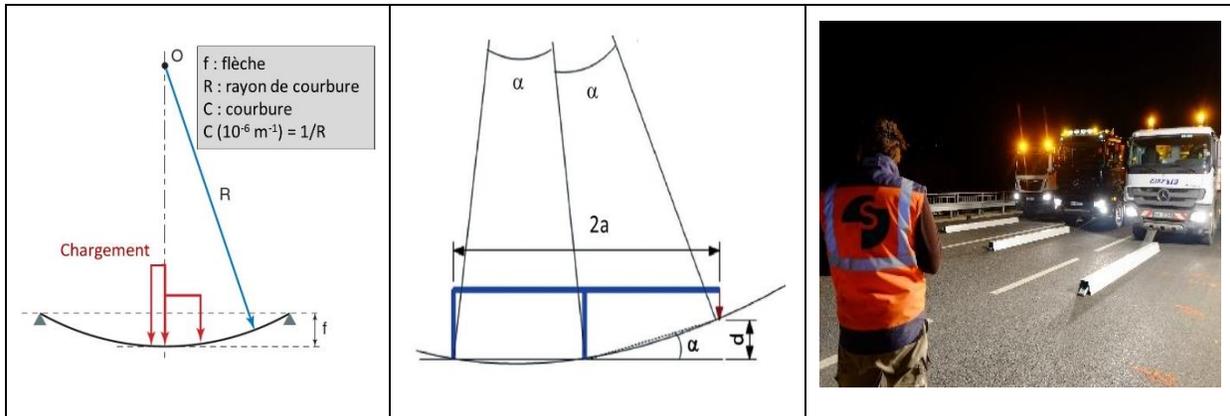


Figure 2.11 Schémas de principe de la courburemétrie (gauche et milieu) et exemple de réalisation d'un essai sous chargement contrôlé (droite) (Crédit SETEC).

2.2.2.2 Arbalète

L'arbalète est une technique qui permet de mesurer la tension résiduelle des armatures de précontrainte mises en œuvre aussi bien par post-tension que par pré-tension. Cette technique est encadrée par un guide technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Tonnoir, 2009).

Le principe de base du fonctionnement de l'arbalète est fondé sur le fait que plus une armature est tendue, plus l'effort F nécessaire à la dévier de son tracé d'une flèche f sera important. L'arbalète est munie d'un capteur de déplacement et d'un capteur de force tel que présenté sur la Figure 2.12. Elle s'appuie sur l'armature testée par deux roulettes et exerce l'effort de déviation par l'intermédiaire d'une fourchette qui saisit l'armature à mi-empattement. En pratique, l'essai est réalisé jusqu'à une déviation limitée à 3 mm afin de rester dans le domaine élastique.

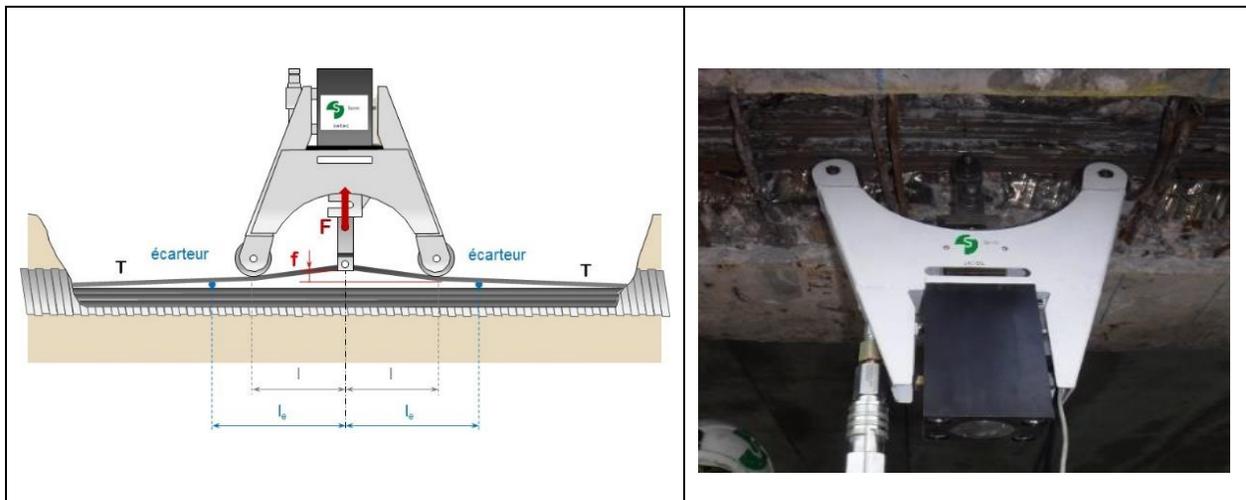


Figure 2.12 Schémas de principe de l'Arbalète (gauche) et exemple de réalisation d'un essai sous une poutre précontrainte d'un ouvrage isostatique (droite) (Crédit SETEC).

La réalisation d'un essai à l'arbalète nécessite d'accéder aux gaines de précontrainte par l'ouverture de fenêtres dont la dimension est fonction de la nature des unités de précontrainte testées. Ces fenêtres sont ouvertes par burinage puis refermées, après l'essai, à l'aide d'un mortier fibré prêt à l'emploi de haute performance mécanique (Figure 2.13).



Figure 2.13 Illustrations de l'ouverture et de la fermeture d'une fenêtre (Crédit SETEC).

En parallèle de la mesure de la tension, l'état de conservation de la précontrainte ainsi que la qualité de remplissage par le coulis d'injection sont directement observés. Cet essai nécessite une calibration en laboratoire de chaque unité de précontrainte susceptible d'être testée sur un ouvrage. Cette calibration est effectuée sur une presse de traction étalonnée.

2.2.3 Instrumentation et investigations destructives

Les méthodes de CND mentionnées dans le paragraphe précédent permettent d'ausculter les ouvrages de manière non destructive. Elles permettent également de cibler, ponctuellement, des zones d'anomalies nécessitant la réalisation d'investigations complémentaires.

À contrario des méthodes de CND, les investigations ponctuelles donnent un accès direct aux propriétés du matériau ausculté et peuvent ainsi servir de « données de calibration », indispensables pour étalonner, valider et extrapoler les résultats des essais non destructifs. Ces investigations présentent un caractère destructif dans le sens où il est généralement nécessaire d'effectuer un ou plusieurs percements au sein du matériau.

Les outils d'investigation ponctuels retenus dans le cadre du présent projet ont été définis pour la pertinence de leur complémentarité avec les essais non destructifs et pour leur disponibilité.

2.2.3.1 Suivi temporel (*Monitoring*)

Le suivi temporel de l'évolution d'un phénomène pathologique ou du comportement mécanique d'une structure est une information primordiale à prendre en considération dans le cadre du diagnostic d'un ouvrage. Le *monitoring* offre la possibilité de suivre l'évolution temporelle de l'état

d'un ouvrage par la mise en œuvre de divers instruments (Karbhari & Ansari, 2009). Ce suivi est traditionnellement réalisé ponctuellement, pour évaluer la cinétique d'ouverture d'une fissure par exemple.

L'outil de *monitoring* le plus rudimentaire est le témoin de plâtre (ou de chaux) qui constitue un moyen très simple de surveiller l'ouverture d'une fissure ou d'un joint. Un plot de plâtre est scellé sur l'élément à surveiller et la date de pose, faisant office d'état initial, est mentionnée sur le plot. Si le mouvement s'accroît, le plâtre se fissure (Figure 2.14-a). Du fait du manque de précision inhérent à cette méthode et aux problèmes de mise en œuvre (détachement du plot avant fissuration), cet outil a été remplacé par des jauges robustes permettant d'assurer un suivi précis (1/10^e de mm). Les plus couramment utilisées sont les jauges Saugnac® qui permettent, entre autres, d'évaluer l'ouverture (Figure 2.14-b), le désaffleurement (Figure 2.14-c) ou les mouvements tridimensionnels d'une fissure (Figure 2.14-d).

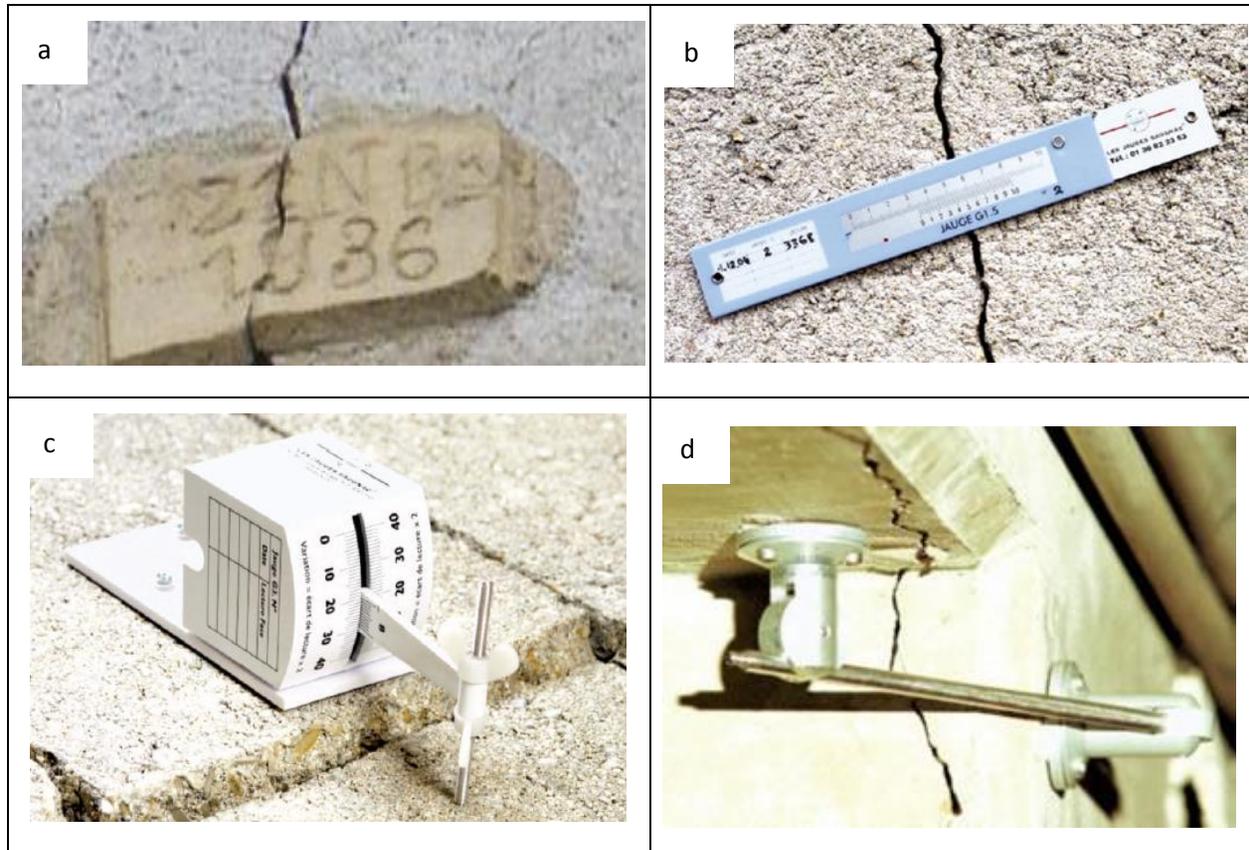


Figure 2.14 Exemples de techniques traditionnelles de *monitoring* d'une fissure (a – témoin de plâtre, b- mesure de l'ouverture, c- mesures du désaffleurement, d- mesure du mouvement tridimensionnel) (Saugnac 2016).

Les avancés techniques permettent aujourd'hui de réaliser des suivis plus complexes basés sur l'évaluation des comportements mécaniques à l'échelle d'une structure par le biais de plusieurs

capteurs, avec ou sans fil, placés en réseaux sur l'ouvrage étudié (Advitam, 2018; Civionics, 2018; Kim *et al.*, 2010).

Un autre intérêt du *monitoring* réside dans la possibilité d'établir des liens entre les conditions environnementales et le comportement structural de l'ouvrage (Zhang *et al.*, 2016). Pour cela, des capteurs multi paramètres ont été développés. À titre d'exemple, le système d'acquisition sans fil Captae® développée par SETEC (Figure 2.15), permet de suivre simultanément la cinétique de nombreux paramètres de l'ouvrage (fissuromètre, inclinomètre, etc.) et de son environnement direct (température, humidité, piézométrie, etc.).



Figure 2.15 Capteur de *monitoring* multi-paramètres CAPTAE® implanté sur un ouvrage en béton armé (Crédit SETEC).

2.2.3.2 Carottage, prélèvement, percement et ouverture

L'échantillonnage ponctuel par carottage et/ou par prélèvement est indispensable dans la réalisation d'un diagnostic de qualité. Outre le fait de fournir un accès direct aux propriétés des matériaux par le biais d'analyses en laboratoire, cela permet d'étalonner et de corrélérer les mesures indirectes issues des investigations géophysiques.

Les carottages (Figure 2.16) sont dédiés à la réalisation d'essai physique (résistance à la compression, porosité, etc.), chimique (dosage en ciment, en Cl-, en alcalin) et à la détermination de la microstructure. Ils peuvent également servir de point d'entrée pour les observations vidéo-endoscopiques.

Les prélèvements sont généralement orientés par le diagnostic visuel. Ils sont réalisés manuellement en surface de parement (éclats, cassures franches, efflorescences, lichens, etc.) ou à faible profondeur à l'aide d'un perforateur (prélèvement de poudres à différentes profondeurs).

Ces prélèvements servent généralement à la réalisation d'analyses chimiques sur la peau et les premiers centimètres du béton (dosage en chlorures, en alcalins, etc.). Ils peuvent également permettre la réalisation d'essai de traction sur les aciers prélevés à la disqueuse.

Les percements au perforateur sont des sondages destructifs permettant de contrôler rapidement la présence et la nature d'une anomalie détectée par méthode géophysique et de préparer la mise en œuvre de la vidéo-endoscopie.

Les ouvertures, généralement réalisées à l'aide d'un burineur, permettent de dégager des armatures de leur enrobage de béton de manière à avoir un accès visuel direct à l'état de l'acier (ou de la gaine de précontrainte). Ceci peut notamment permettre de corrélérer les résultats des mesures électrochimiques (potentiel, vitesse de corrosion) à l'éventuel enrouillement des armatures.



Figure 2.16 Carottage réalisé en sous-face d'un tablier de pont (à gauche) et carotte de béton associée (à droite) (Crédit SETEC).

2.2.4 Synthèse

Le Tableau 4.1 synthétise les principales spécificités des moyens de caractérisation sur site. Ces outils ont été identifiés et utilisés dans le cadre de ce projet.

Tableau 2.1 Principaux moyens de caractérisation sur site des ouvrages en béton armé.

	Méthode de caractérisation sur site	Paramètre	Sensible à	Utile pour détecter	Échantillonnage	Caractère destructif	Coût relatif de mise en œuvre
CND	Réflectométrie radar	Vitesse et amplitude des ondes EM	Contrastes de permittivité diélectrique	Armatures, enrobage, défauts structurels (vides, zones décomprimées, etc.)	Surfacique (> 100 m ² /jour)	Non	\$\$
	Potentiel de corrosion	Différence de potentiel électrique	Ions en solution	Corrosion active	Surfacique (> 100 m ² /jour)	Percement pour branchement sur une armature	\$\$
	Capacimétrie	Capacité électrique	Humidité de surface	Environnement favorable au développement de la corrosion	Surfacique (> 100 m ² /jour)	Non	\$\$
	Vitesse de corrosion	Résistance de polarisation et résistivité du béton d'enrobage	Humidité, ions en solution	Corrosion active et perte de section des armatures	Ponctuel (quelques m ² /jour)	Percement pour branchement sur une armature	\$\$\$
	Résistivité	Résistivité électrique du béton d'enrobage	Humidité	Environnement favorable au développement de la corrosion	Ponctuel (quelques m ² /jour)	Non	\$\$\$
	Vitesse du son	Vitesse et amplitude des ondes P	Présence de vide	Défauts structurels (délamination, décollements, fissures)	Ponctuel (quelques m ² /jour)	Non	\$\$\$
	Vidéo-endoscopie	Film	Luminosité	Nature et volume des vides, venues d'eau	Plusieurs films/jour	Nécessite un percement	\$

	Méthode de caractérisation sur site	Paramètre	Sensible à	Utile pour détecter	Échantillonnage	Caractère destructif	Coût relatif de mise en œuvre
Évaluation mécanique	Courburemétrie	Déformations	Sollicitations mécaniques	État de fatigue	Ponctuel (plusieurs cycles de mesures/jour)	Non	\$\$\$
	Arbalète	Tension résiduelle des câbles de précontrainte	Sollicitations mécaniques	État de fatigue	Ponctuel (plusieurs tirs/jour)	Décapage jusqu'à la gaine	\$\$\$
Instrumentation	Monitoring	Ouverture de fissure, T°C, hygrométrie, basculement, roulis, etc.	Mouvements structurels et conditions météorologiques	Cinétique d'évolution de paramètres structurels et environnementaux	Ponctuel avec pas temporel ajustable (plusieurs mesures /jour)	Percement pour fixation	\$\$
Contrôles destructifs	Carottage	Carotte de béton	Armatures /gaines de précontrainte	Paramètres physiques, chimiques et microstructure du béton	Ponctuel	Oui	\$
	Prélèvement	Fragment de béton	Armatures /gaines de précontrainte	Propriétés chimiques et microstructure du béton	Ponctuel	Oui	\$
	Percement	Poudre	Armatures /gaines de précontrainte	État d'une zone (visualisation indirecte), propriétés chimiques	Ponctuel	Oui	\$
	Ouverture	-	Armatures /gaines de précontrainte	État d'une zone (visualisation directe)	Ponctuel	Oui	\$

2.3 Principaux moyens de caractérisation en laboratoire

Dans le cadre de diagnostic d'ouvrages existants, il est important d'associer aux moyens de caractérisations sur site décrits dans les paragraphes précédents, des essais et des analyses en laboratoire sur les matériaux prélevés sur l'ouvrage. Ces essais et analyses peuvent globalement se subdiviser en deux catégories :

- Les caractéristiques intrinsèques propres au béton, qui permettent de définir ses performances mécaniques, ses paramètres de formulations et ses paramètres de transfert par les agents agressifs potentiels du milieu environnant.
- Les caractéristiques liées au vieillissement du béton, qui permettent de quantifier l'interaction du béton avec l'environnement dans lequel il est placé.

2.3.1 Caractéristiques intrinsèques des bétons

2.3.1.1 Essais mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques généralement nécessaires dans le cadre du diagnostic d'un ouvrage en béton armé sont la résistance à la compression et le module d'élasticité statique du béton, ainsi que la nuance des aciers d'armature mis en œuvre. Ces données sont utilisées par les bureaux d'études lorsqu'ils réalisent le recalcul d'un ouvrage.

- Résistance à la compression

La résistance à la compression consiste à solliciter un échantillon sous une presse jusqu'à la rupture. Dans le cadre du diagnostic d'un ouvrage existant, l'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique imposée par le mode de prélèvement par carottage diamanté sous eau. Préalablement à la sollicitation, les faces supérieure et inférieure doivent être rendues parallèles par rectification ou surfacage. La contrainte de compression, exprimée en MPa, correspond à la force de rupture divisée par la section sollicitée.

- Module d'élasticité

Le module d'élasticité caractérise la capacité de déformation du béton sous charge : un module faible traduit une déformabilité élevée dans le domaine élastique, alors qu'à l'inverse, un module élevé traduit une faible déformabilité. Le module d'élasticité est proportionnel à la résistance à la compression. Il est généralement exprimé en GPa.

En laboratoire, le module est mesuré en sollicitant sous presse de compression, une éprouvette munie d'un système de mesure des déformations longitudinales (extensomètres, jauges de déformation). Le module d'élasticité statique, ou module de Young, correspond à la pente de la courbe effort/déformation entre 0 et 30 % de la contrainte de rupture.

- Nuance des aciers d'armatures

La nuance des aciers d'armatures est déterminée à l'aide d'un essai de traction réalisé sur une éprouvette généralement ré-usinée en laboratoire. Cet essai permet de déterminer plusieurs caractéristiques : résistance à la traction, limite élastique, allongement. La valeur de la limite élastique permet de déterminer la nuance de l'acier.



Figure 2.17 Vue d'une presse de compression (gauche) et d'un système de mesure des déformations pour la détermination du module d'élasticité (droite) (Crédit SETEC).

2.3.1.2 Paramètres de formulation

La détermination des paramètres de formulation du béton durci est intéressante dans le cadre d'un diagnostic afin de vérifier si le béton mis en œuvre est compatible avec la classe d'exposition auquel il est soumis. La connaissance de ces paramètres permet par ailleurs d'apprécier de façon plus fiable la durabilité potentielle du béton, en particulier dans le cadre des problématiques liées à la corrosion des armatures.

Le dosage en ciment peut être déterminé de façon relativement précise ($\pm 10\%$) à partir de la réalisation de deux méthodes complémentaires :

- La méthode de la silice soluble qui consiste à solubiliser la silice contenue dans le liant par une attaque acide ménagée,
- La méthode des inerts qui consiste, à l'inverse, à éliminer de l'échantillon l'ensemble des constituants autres que le ciment (eau, granulats etc.).

Dans les deux cas, une mesure des masses volumiques apparente et réelle (voir § 2.3.1.3) ainsi qu'une identification de la nature du ciment sont nécessaires. La meilleure façon d'identifier la nature du ciment est la microscopie optique sur section polie. En parallèle, la mesure de l'eau liée aux hydrates permet d'estimer la quantité d'eau de gâchage. Cette mesure complémentaire est généralement réalisée par analyse thermogravimétrique.

2.3.1.3 Indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité des bétons, et plus largement des structures, vis-à-vis des processus de dégradation considérés comme par exemple la corrosion des armatures. Ces paramètres sont mesurés à partir d'essais en laboratoire pratiqués sur des éprouvettes ou des prélèvements, selon des modes opératoires bien définis.

Il existe deux types d'indicateurs de durabilité :

- Les indicateurs généraux qui sont valables pour les différentes dégradations envisagées.
- Les indicateurs spécifiques qui sont liés à un processus de dégradation donné.

Il n'est abordé ici que les principaux indicateurs de durabilité généraux liés à la durabilité des bétons soumis à des risques de corrosion des armatures : porosité accessible à l'eau, diffusion des chlorures, perméabilité à l'oxygène, qui permettent d'évaluer les propriétés de transfert dans le béton.

- Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre facilement mesurable qui caractérise le volume de vides du béton au travers duquel les agents agressifs sont susceptibles de pénétrer dans le matériau. Ce paramètre est intimement lié aux caractéristiques mécaniques du béton : un béton de classe de résistance élevée présente une porosité faible, et inversement.

La porosité accessible à l'eau, déterminée par imbibition sous vide et pesée hydrostatique, est donnée par la relation suivante :

$$P_{eau} = 100 \cdot \frac{m_i - m_s}{m_i - m_e} \quad (\text{Exprimé en \%})$$

avec : m_i = masse dans l'air de l'échantillon imbibé (g),

m_s = masse dans l'air de l'échantillon sec (g),

m_e = masse dans l'eau de l'échantillon imbibé (g).

Ce paramètre, facilement mesurable par la plupart des laboratoires, reste toutefois un paramètre global qui ne donne pas de renseignements sur la dimension et la distribution des différents pores : il n'est par conséquent pas toujours discriminant.

- Coefficient de diffusion des chlorures

Le coefficient de diffusion des chlorures caractérise la capacité du matériau à être pénétré par les chlorures présent dans l'environnement (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage). En conditions saturées, lorsque la concentration en chlorures est plus élevée à l'extérieur que dans le béton, le gradient de concentration entraîne une pénétration des ions dans le matériau. Les ions chlorures pénètrent dans la phase liquide interstitielle du béton par diffusion. Le paramètre principal qui détermine la capacité des ions chlorures à pénétrer dans un béton est le coefficient de diffusion. En fonction des procédés de mesures utilisés (diffusion naturelle ou migration) et en tenant compte ou pas des interactions chimiques, deux types de coefficient de diffusion peuvent être distingués : le coefficient de diffusion effectif (qui ne tient pas compte des interactions chimiques) et le coefficient de diffusion apparent (qui tient compte des interactions chimiques).

- Coefficient de diffusion effectif

Le coefficient de diffusion effectif est mesuré en régime stationnaire, soit en diffusion naturelle soit en accélérant le processus par l'application d'un champ électrique. Dans les deux cas, le principe de l'essai consiste à placer un échantillon entre deux compartiments de concentrations différentes en chlorures : compartiment amont enrichi en chlorures et compartiment aval exempt de chlorures. Ce gradient de concentration est maintenu constant en renouvelant régulièrement les solutions dans les compartiments. Le flux de chlorures est mesuré en dosant régulièrement les chlorures dans le compartiment aval.

- Coefficient de diffusion apparent

Le coefficient de diffusion apparent est mesuré en régime transitoire, soit en diffusion naturelle soit en accélérant le processus par l'application d'un champ électrique. Dans le cas de la diffusion naturelle, le principe de l'essai consiste à immerger l'échantillon une trentaine de jours dans une solution à forte concentration en chlorures et à mesurer, non pas le flux de chlorures, mais le profil de concentration en chlorures par dosage chimique. Dans le cas de l'essai de migration (application d'un champ électrique), qui dure deux ou trois jours, l'échantillon est placé entre deux compartiments selon le même principe que l'essai en régime stationnaire tel que présenté sur la Figure 2.18. Il est rompu à la fin de l'essai, et le front de pénétration des chlorures (x_d) est mesuré par pulvérisation d'une solution de nitrate d'argent. À noter que ce coefficient de diffusion apparent

par essai de migration est relié au coefficient de diffusion effectif D_e par la simple porosité en faisant l'hypothèse que les isothermes d'interaction des chlorures avec la pâte de ciment ne sont pas prises en compte, et en négligeant les effets de tortuosité et de constrictivité.

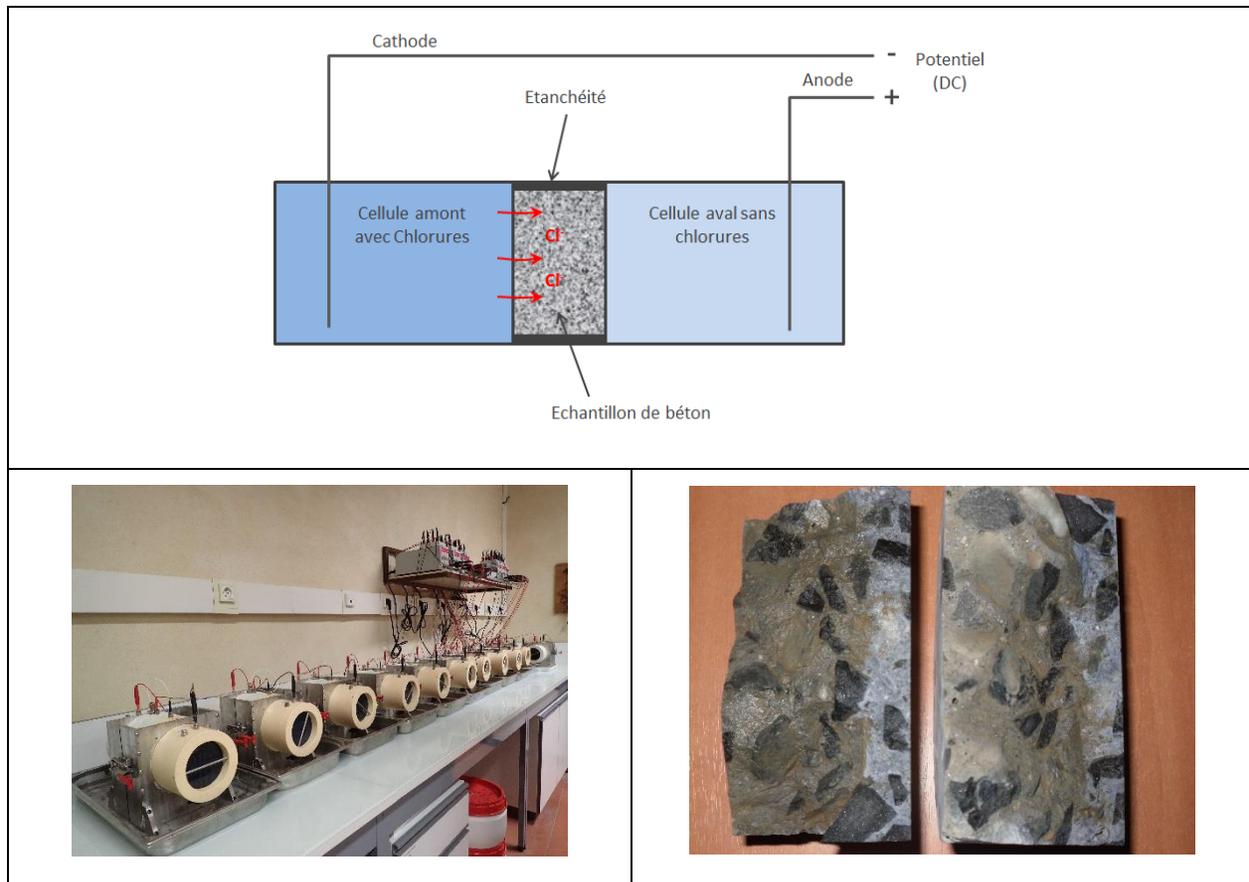


Figure 2.18 Principe de l'essai de migration sous champ électrique (haut), vue de cellules pour essai de migration (bas gauche) et vue du front de pénétration des chlorures par aspersion d'une solution de nitrate d'argent (bas droite) (Crédit SETEC).

- Perméabilité à l'oxygène

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de béton à un gradient de pression constant de gaz (ici l'oxygène). La perméabilité est déterminée à partir de la mesure du flux de gaz traversant l'éprouvette en régime permanent en appliquant la loi de Darcy.

L'essai est réalisé pour différents séchages des échantillons, et par conséquent pour différents taux de saturation permettant de déterminer 3 perméabilités :

- Séchage de 7 jours à 80 °C,
- Séchage de 28 jours à 80 °C,
- Séchage à masse constante à 105 °C.



Figure 2.19 Appareillage permettant de mesurer la perméabilité aux gaz (Crédit SETEC).

2.3.2 Caractéristiques de vieillissement des bétons

Le béton est un matériau vivant qui interagit avec l'environnement dans lequel il est placé. Les interactions mettent essentiellement en jeu des phénomènes physico-chimiques qui, pour la plupart, conduisent à terme à des pathologies. C'est notamment le cas pour la corrosion des armatures qui peut être initiée soit par la carbonatation du béton d'enrobage, soit par la pénétration de chlorures (environnement marin, utilisation de sels de déverglçage, milieux industriels). Dans le cadre de cette thèse, seuls les moyens permettant d'apprécier le vieillissement des bétons vis-à-vis de la corrosion des armatures sont présentés.

2.3.2.1 Profondeur de carbonatation

Le pH de la solution interstitielle du béton non carbonatée est de l'ordre de 13. Le phénomène de carbonatation, qui est une réaction entre la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique, s'accompagne d'une diminution de pH jusqu'à environ 9, soit le pH auquel les armatures sont dépassivées et susceptibles de se corroder.

La mesure de la profondeur de carbonatation est un essai simple qui consiste donc à vaporiser, sur une fracture fraîche de béton, une solution alcoolique indicatrice de pH dont le virage correspond globalement à celui du phénomène de carbonatation. La solution généralement utilisée est la phénolphtaléine qui permet de différencier la zone carbonatée qui reste incolore, de la zone non carbonatée qui est colorée en rose (Figure 2.20).



Figure 2.20 Mesure de la profondeur de carbonatation sur site (à gauche) et en laboratoire (à droite). La zone carbonatée est incolore, la zone non carbonatée colorée en rose (Crédit SETEC).

2.3.2.2 Dosage des chlorures

Lorsque des chlorures pénètrent dans un béton, une partie est fixée par les aluminates de calcium de la pâte de ciment (chlorures liés) et une partie reste en solution dans le réseau poreux (chlorures libres). Les chlorures totaux correspondent à la somme des chlorures liés et des chlorures libres.

Les chlorures totaux sont dosés par potentiométrie après attaque acide ménagée, alors que les chlorures libres sont dosés par mise en solution dans de l'eau déminéralisée. Il est important de souligner que, généralement, seuls les chlorures libres peuvent migrer jusqu'aux armatures pour initier leur corrosion : ce sont donc préférentiellement ces chlorures qui sont dosés dans le cadre d'un diagnostic. Le dosage complémentaire des chlorures totaux est réalisé pour apprécier la capacité de fixation du ciment utilisé, ou pour effectuer une modélisation prédictive intégrant la fixation d'une partie des chlorures.

Afin d'évaluer la profondeur de pénétration des chlorures, des dosages sont effectués à différentes profondeurs (Figure 2.21) à partir d'échantillons cylindriques prélevés par carottage diamanté sous eau ou à partir de poudres de béton. Dans ce dernier cas, il est important de souligner que, par soucis de représentativité du volume prélevé, un dosage complémentaire de la silice soluble est généralement effectué afin de ramener les chlorures dosés à une même teneur en pâte de ciment.

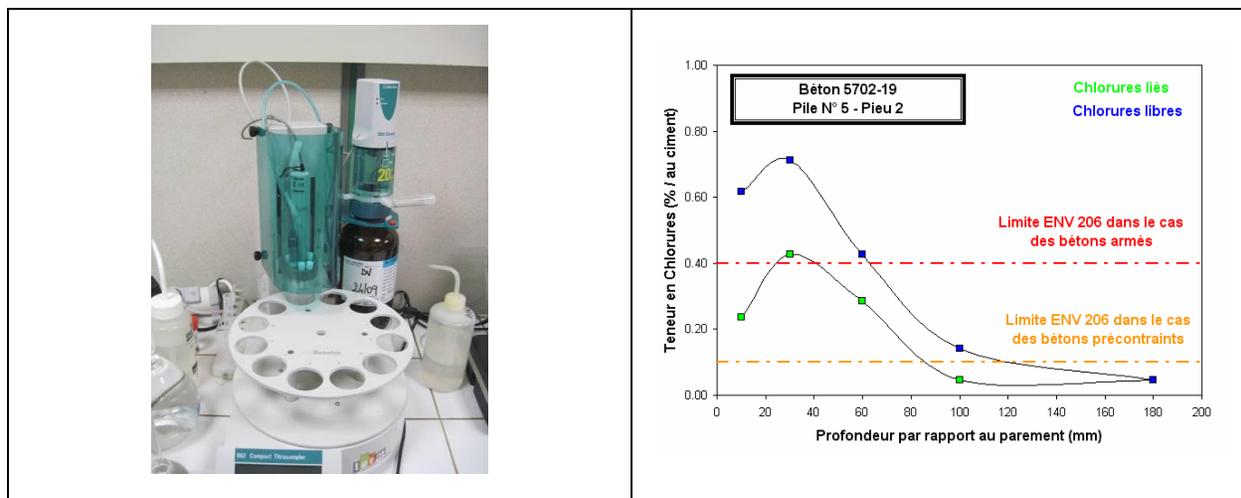


Figure 2.21 Exemple d'un appareillage potentiométrique pour le dosage des chlorures (à gauche) et de résultats obtenus (à droite) (Crédit SETEC).

2.3.2.3 Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une méthode d'observation des matériaux à des forts grossissements permettant la visualisation de la microstructure et la mise en évidence de pathologies d'origine physico-chimique, notamment liées à la formation de produits néoformés à caractère expansif tels que les gels d'alcali-réaction ou l'ettringite secondaire ou de formation différée par exemple.

Les observations au MEB sont généralement réalisées sur des fractures fraîches de béton dont la surface est rendue conductrice par une fine métallisation au carbone ou à l'or. Elles sont couplées à un spectromètre X à dispersion d'énergie afin de pouvoir réaliser une analyse élémentaire des phases minérales (Figure 2.22). Les critères permettant de mettre en évidence des pathologies physico-chimiques sont essentiellement la nature, la composition et la morphologie des minéraux observés.

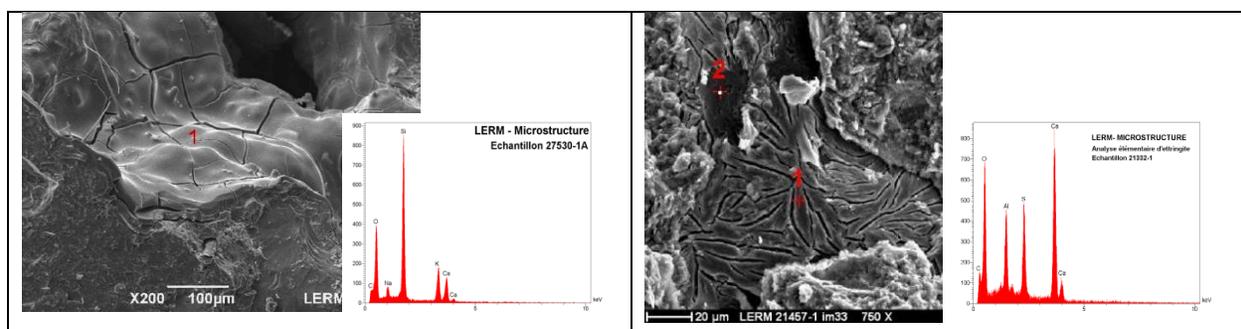


Figure 2.22 Exemple de bétons au microscope électronique à balayage : gel d'alcali-réaction avec analyse élémentaire (à gauche) et ettringite expansive avec analyse élémentaire (à droite). (Crédit SETEC).

2.3.3 Synthèse

Le Tableau 2.2 synthétise les principales spécificités des différents moyens de caractérisation et d'analyse des bétons en laboratoire.

Tableau 2.2 Principaux moyens de caractérisation en laboratoire des ouvrages en béton armé.

Propriétés recherchées	Caractérisation des bétons en laboratoire	Paramètre	Utile pour	Échantillon	Coût relatif de mise en œuvre
Propriétés intrinsèques	Essais mécaniques	Résistance à la compression	Fournir des données d'entrée à un bureau d'études dans le cadre d'un recalcul	Éprouvette ou carotte	\$
		Module d'élasticité		Éprouvette ou carotte	\$
		Résistance des aciers à la traction		Éprouvette	\$
	Formulation	Dosage en ciment	Apprécier les caractéristiques d'une formulation par rapport à sa classe d'exposition	Éprouvette ou carotte	\$\$
		Rapport Eau/Ciment		Éprouvette ou carotte	\$\$
	Indicateurs de durabilité	Diffusion des chlorures	Estimer la durabilité potentielle d'un béton vis-à-vis d'une pathologie donnée	Éprouvette ou carotte	\$\$
		Porosité accessible à l'eau		Éprouvette ou carotte	\$
		Perméabilité à l'oxygène		Éprouvette ou carotte	\$\$
	Interaction avec l'environnement	Témoins de durée de vie	Profondeur de carbonatation	Vérifier le niveau de pollution d'un béton et les risques pathologiques associés	Carotte ou fragment
Dosage des chlorures			Éprouvette, carotte ou poudre		\$
Microscopie électronique à balayage			Éprouvette, carotte ou fragment		\$\$

2.4 Principaux moyens de représentation des ouvrages

Les différents moyens de caractérisation sur site et en laboratoire présentés dans les paragraphes précédents génèrent d'importants volumes de données qu'il est nécessaire de représenter, de traiter et de hiérarchiser afin d'optimiser l'interprétation.

Pour cela, il existe différentes approches utilisées dans l'optique d'aider les gestionnaires d'ouvrages dans la maintenance de leur patrimoine, tant du point de vue de la représentation des structures que de l'analyse des données collectées sur celles-ci.

2.4.1 Moyens de représentation des ouvrages

2.4.1.1 Relevés topographiques conventionnels

Les relevés topographiques conventionnels réalisés à l'aide d'un tachéomètre ou d'un GPS sont couramment utilisés pour restituer la géométrie 3D d'un ouvrage. Ces relevés sont généralement réalisés au niveau des points singuliers de la structure considérée (angles, arêtes). Le fait que ces mesures soient réalisées en point par point accroît le risque d'erreurs (lacunes dans les données acquises). De plus, le relevé est d'autant plus précis que le nombre de points de mesure est élevé, ce qui rend l'acquisition longue et fastidieuse. Les données acquises permettent néanmoins une restitution tridimensionnelle de l'ouvrage par le biais de logiciels de conception et de dessin assisté par ordinateur (CAO et DAO). La Figure 2.23 présente l'exemple d'un relevé topographique conventionnel réalisé sur un pont et la maquette numérique 3D correspondante.

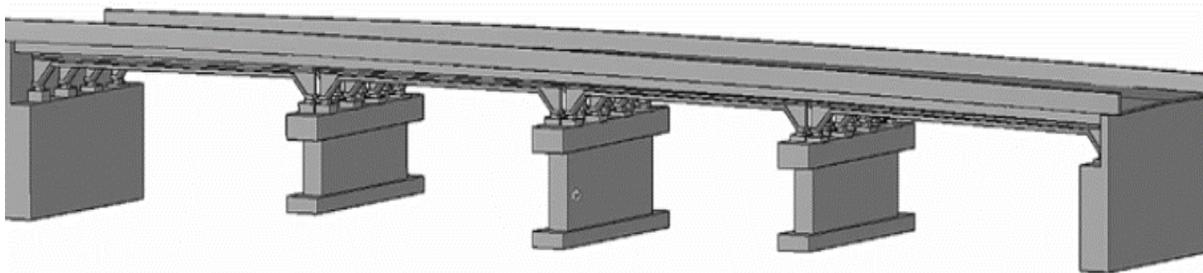


Figure 2.23 Exemple de représentation de la maquette 3D d'un pont à partir d'un relevé topographique conventionnel.

2.4.1.2 Scanner (nuage de points 3D)

Le principe du scanner 3D repose sur la mesure du temps de propagation aller/retour d'un faisceau laser émis par l'instrument et réfléchi au niveau d'un point visé. Connaissant la vitesse de la lumière, il est ainsi possible de déterminer la distance entre l'instrument et le point considéré.

Chaque point de mesure est référencé dans un système de coordonnées relatif dont l'origine correspond à la position du scanner 3D. Un balayage systématique et automatique de la structure considérée permet d'obtenir un nuage de points tridimensionnel tel que schématisé sur la Figure 2.24.

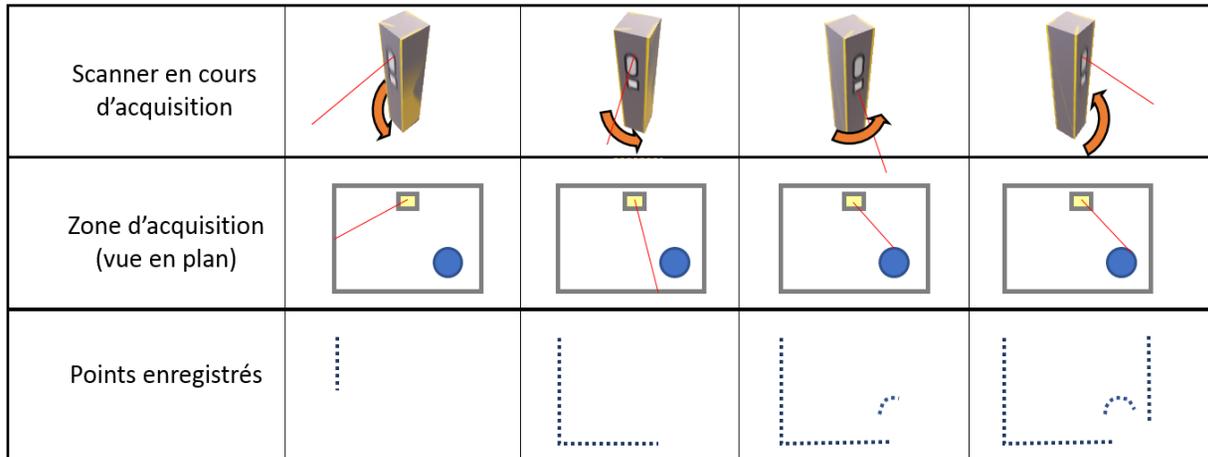


Figure 2.24 Principe de l'acquisition de données par scanner 3D.

La Figure 2.25 présente l'exemple de la restitution numérique d'un ouvrage en maçonnerie et en béton armé avec un scanner 3D.



Figure 2.25 Restitution numérique d'un ouvrage en maçonnerie et d'un mur en béton armé (gauche : vue de face - droite : vue de dessus) (Crédit SETEC).

2.4.1.3 Photogrammétrie numérique multi-images (enveloppe texturée 3D)

La photogrammétrie numérique sur ouvrage (ou SfM pour *Structure from Motion*) consiste à reconstituer l'enveloppe 3D texturée d'une structure à partir d'une série de clichés photographiques (2D). Le principe consiste à acquérir différentes prises de vues de la structure

en suivant un protocole d'acquisition permettant d'avoir un recouvrement entre les photographies réalisées consécutivement. Des points de similitude peuvent ainsi être déterminés entre les différentes photographies. L'analyse de ces points de similitude rend possible la reconstitution du modèle 3D de la structure. Le principe de la méthode est présenté en annexe et de plus amples renseignements sur le formalisme mathématique sont disponibles dans la littérature (Lanzi, 2009; Lowe, 2004; Snavely, 2006; Strum, 2015).

La Figure 2.26 présente un exemple de représentation des résultats obtenus par analyse photogrammétrique sur les piles d'un pont.



Figure 2.26 Exemple de restitution photogrammétrique des piles d'un pont (Crédit SETEC).

2.4.2 Solutions logicielles de représentation des ouvrages

Concernant la représentation des ouvrages, il existe plusieurs outils de modélisation dont les plus couramment utilisés sont les logiciels développés et commercialisés par la compagnie américaine *Autodesk*[®].

Parmi ceux-ci, le logiciel de conception et de dessin assisté par ordinateur (CAO et DAO) le plus répandu est *Autocad*[®] est développé depuis le début des années 1980. Ce logiciel permet de représenter et de produire des plans et des maquettes numériques 3D des ouvrages, notamment via ses différents modules « *Architecture* » ou « *Civil 3D* ». Un outil sensiblement similaire de CAO et DAO est *MicroStation*[®], développé par la compagnie américaine *Bentley System Inc*[®].

La plateforme Revit, également développé par Autodesk®, est un logiciel de modélisation des données des bâtiments (ou BIM en anglais pour *Building Information Modeling*), privilégié dans le cadre de la gestion intégrée d'un ouvrage de sa conception à sa démolition. Le BIM est une technologie en plein essor (Azhar *et al.*, 2015) qui permet de créer une maquette numérique 3D « intelligente » et structuré de l'ouvrage et de synthétiser sur celle-ci une série de paramètres reliés entre eux de façon logique et hiérarchisée (nature des matériaux, aspect structurels, consommation énergétique, alarmes, localisation des équipements, etc.). L'utilisation du BIM permet de centraliser les informations propres à un bâtiment et d'en faciliter sa gestion opérationnelle et financière pour les différents intervenants impliqués dans la construction et la gestion de l'ouvrage.

Dans une optique de représentation des ouvrages existants, Autodesk propose par ailleurs le logiciel *Recap*® qui permet la gestion et la visualisation réaliste de semis de points tridimensionnels provenant de données acquises lors de relevés topographiques à grand rendement comme le scanner 3D. Le module *Recap Photo*® de *Recap*® permet aussi de représenter les structures par le biais de l'analyse photogrammétrique (cf. Figure 2.26 et Annexe 1). D'autres logiciels d'analyse photogrammétrique peuvent aussi être mentionnés comme Pix4DMapper® développé par la compagnie Suisse Pix4D ou PhotoScan® développé par la compagnie russe AgiSoft. Le Tableau 2.3 synthétise les principales caractéristiques des différentes solutions logicielles existantes pour la représentation des ouvrages.

Tableau 2.3 Synthèse des principaux outils logiciels pour la représentation des ouvrages.

	Support de représentation des ouvrages		
Solutions logicielles actuelles	CAO/DAO (Autocad®, MicroStation®, etc.)	BIM (Revit®, archiCAD®, etc.)	Représentation de l'existant (Recap®, Recap Photo®, etc.)
Concept / Finalité	Conception et dessin assisté par ordinateur	Planification et aide à la gestion de projets	Restitution fidèle de l'existant
Moyens de restitution privilégié	Relevés topographiques conventionnels (GPS, théodolite, tachéomètre)	Relevés topographiques conventionnels (GPS, théodolite, tachéomètre)	Scanner 3D, photogrammétrie
Données d'entrée	Semis de points	Semis de points	Semis de points dense, Photographies
Livrable	Plans et dessins 2D ou 3D	Maquette numérique 3D	Enveloppe texturée 3D

2.5 Principales solutions logicielles d'aide à la maintenance des ouvrages

Concernant l'analyse de données spécifiques aux ouvrages du génie civil, il n'existe sur le marché que quelques systèmes d'aide à la gestion des ouvrages parmi lesquels le progiciel ScanPrint IMS (développé par la société Advitam, filiale de Freyssinet, groupe Vinci) et le logiciel STADIUM développé par la compagnie canadienne SIMCO Technologies Inc.

Le progiciel ScanPrint[®] IMS couplé au système EverSense[®] (Advitam, 2018), est un outil permettant d'assurer la surveillance d'un parc d'ouvrages composé d'infrastructures ponctuelles (ponts, murs de soutènement, etc.), linéaires (tracés autoroutiers, voiries, réseaux ferrés, etc.) ou exceptionnelles (stades, aéroports, etc.). Il permet d'homogénéiser les systèmes et les méthodes de gestion ainsi que la réglementation relative aux infrastructures variées considérées. Cet outil permet notamment d'intégrer et d'analyser les données issues d'inspections visuelles et de *monitoring* de structures câblées et en béton précontraint et fournit des indicateurs et des tableaux de bords pour aider à la maintenance du parc d'ouvrages.

Le logiciel STADIUM[®] développé par la compagnie canadienne SIMCO Technologie Inc. (SIMCO Technologies, 2018), vise à prédire la durée de vie des ouvrages en se basant sur la modélisation de l'évolution temporelle des propriétés physico-chimiques du béton dans son environnement. Les simulations nécessitent la réalisation préalable d'analyses physiques, chimiques et microstructurales en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site. Les données d'entrée sont également issues de bases de données internes à STADIUM[®], recensant différentes formulations de bétons (« concrete mixture »), différents environnements d'exposition (« exposure conditions ») et des géométries prédéfinies (« structure »). Le Tableau 2.4 synthétise les principales caractéristiques de ces outils d'analyse de données.

Tableau 2.4 Synthèse des principaux outils de représentation et d'analyse de données en génie civil.

	Analyse des données	
Solutions logicielles actuelles	ScanPrint [®] & EverSense [®]	Stadium [®]
Concept / Finalité	Surveillance et gestion d'un parc d'ouvrages (ponts, tracés linéaires, stades, aéroports, etc.)	Prédiction de durée de vie et évaluation de la durabilité des ouvrages
Données d'entrée	Données d'instrumentation	Analyses en laboratoire
Livrable	Tableaux de bord et indicateurs	Simulations sous forme de graphiques

2.6 Conclusions et constats

Le présent chapitre a permis de répertorier les principales pathologies des ouvrages et les moyens de caractérisation associés, tant sur site qu'en laboratoire. Les outils disponibles d'aide à la représentation des données et à la prise de décision ont également été présentés. Chacun des outils actuellement disponibles permet de répondre à des problématiques ciblées. Cependant, il n'existe pas de système d'exploitation qui permette de centraliser sur un support unique, toutes les données acquises à partir des différents moyens de caractérisation.

Le Tableau 2.5 confronte les solutions logicielles actuelles aux objectifs du projet et met en évidence une lacune dans les solutions disponibles. Ce tableau indique les points de discordance franche avec le projet (en rouge), les point de concordance potentiel (en vert clair) et les points de concordance franche (en vert foncé).

Tableau 2.5 Solutions logicielles disponibles confrontées aux objectifs visés par le projet (en rouge : discordance franche, en vert clair : concordance potentielle, en vert foncé : concordance franche).

Solutions logicielles actuelles / Objectifs visés par le projet	Support de représentation des ouvrages			Analyse des données	
	CAO/DAO	BIM	Représentation de l'existant	ScanPrint® & EverSense®	Stadium®
Modélisation de l'ouvrage	Vert clair	Vert clair	Vert foncé	Rouge	Rouge
Représentation des données CND	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
Représentation des données d'instrumentation	Rouge	Rouge	Rouge	Vert foncé	Rouge
Représentation des données de laboratoire	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Vert foncé
Intégration des données	Rouge	Vert clair	Rouge	Rouge	Vert clair
Aide à la surveillance	Rouge	Vert clair	Vert clair	Vert foncé	Rouge
Durabilité	Rouge	Vert clair	Rouge	Rouge	Vert foncé
Aide à la maintenance	Rouge	Vert clair	Rouge	Rouge	Vert foncé
Aide à la gestion	Rouge	Vert clair	Rouge	Vert clair	Vert foncé

La modélisation des ouvrages est un sujet largement éprouvé, mais les interactions avec un support de représentation réaliste sont inexistantes. Certains outils logiciels permettent d'intégrer des données mais pas conjointement celles de CND, d'analyses en laboratoire et de *monitoring*. C'est la raison pour laquelle un système d'exploitation spécifique de représentation et d'intégration des données doit être développé afin d'aider au diagnostic des ouvrages.

Dans les chapitres suivants, la question des supports de représentation des données (Chapitre 3) et celle de l'intégration des données (Chapitre 4) seront respectivement abordées. Les développements spécifiques du système d'exploitation développé dans le cadre de ce doctorat seront ensuite présentés (Chapitre 5).

3 CONTRIBUTION À LA REPRESENTATION DES RÉSULTATS

3.1 Introduction

La représentation numérique des ouvrages sert de support à l'analyse des résultats pour l'ingénieur civil ou le gestionnaire de l'ouvrage. Elle doit permettre une bonne appréciation de l'état général de la structure et de sa géométrie avec une résolution suffisante pour permettre, par exemple, de réaliser un relevé de désordres.

En fonction des dimensions de l'ouvrage et du degré de précision souhaité, plusieurs moyens de représentation sont disponibles. Il va de soi que les coûts engendrés pour la restitution d'un ouvrage seront d'autant plus importants que celui-ci sera imposant, que sa géométrie sera complexe et que le niveau de précision requis sera élevé.

Compte tenu des dimensions souvent importantes des ouvrages à diagnostiquer, les investigations sur site sont généralement réalisées dans des zones ciblées par le biais d'inspections visuelles préalablement menées par les inspecteurs d'ouvrages. Celles-ci peuvent être définies suite à l'apparition de désordres externes ou à la suspicion de dégradations internes. La prise en considération des résultats dans ces zones circonscrites sert ensuite de base au diagnostic général de la structure considérée. Dans ce cas, le support de représentation peut être un simple cliché photographique de chacune des zones investiguées.

Lorsque la géométrie est plus complexe ou que les zones d'investigations sont plus vastes, il devient pertinent de représenter l'ouvrage ou certains de ces éléments constitutifs en 3D, de façon à avoir une vue d'ensemble de la structure considérée. À ce sujet, des développements récents ont montré l'intérêt de la visualisation 3D combinée de données issues d'auscultations non destructives multivariées pour faciliter le diagnostic (Fauchard *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2016).

Ce chapitre présente les principaux développements algorithmiques réalisés pour permettre ou favoriser la représentativité des résultats provenant des données de *monitoring* (1D avec le suivi temporel d'un capteur fixe) et la représentation des données de contrôle non destructif (CND) sur support photographique (2D) et sur modèle 3D.

3.2 Contribution à la représentation des données de *monitoring*

3.2.1 Défi lié à l'influence des variations thermiques

Le principal défi lié à la représentation des données de *monitoring* consiste à prendre en considération l'effet des variations thermiques qui ont une influence prépondérante sur la dilatation et la rétraction des bétons. Le rayonnement solaire, l'ombre, les précipitations et le vent sont autant de facteurs qui influence grandement la température à la surface du béton. En fonction de l'exposition des zones d'un ouvrage à ces différents facteurs, des fluctuations locales de températures peuvent provoquer des déformations différentielles importantes, de l'ordre de plusieurs dizaines, voire de centaines de micromètres (Diruy, 1975). Ceci est notamment lié au coefficient de dilatation thermique du béton, dont la valeur moyenne est généralement de l'ordre de $1.10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Lorsque le suivi de l'évolution de l'ouverture d'une fissure est réalisé par *monitoring*, il apparaît donc indispensable de corriger l'influence des variations thermiques sur les mesures enregistrées afin qu'elles soient représentatives d'éventuelles déformations structurelles.

3.2.2 Méthode utilisé et exemple de représentation du suivi d'ouverture d'une fissure

Pour que le suivi de l'ouverture d'une fissure soit représentatif d'une éventuelle déformation structurelle, il convient de corriger les données d'ouverture de la fissure (mesure en micromètre ou en millimètre) de l'effet des variations de la température qui occasionnent des dilations et des rétractions du béton. La méthode de correction utilisée ici est inspirée de la procédure mise en place par le LCPC (Godart, 2009). Elle se formule comme suit :

$$\Delta\varepsilon_T = l \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

avec : $\Delta\varepsilon_T$: variation de déformation due à la variation de température du béton,

l : base de mesure (considéré à 1),

α : coefficient de dilatation thermique linéaire du béton ($1.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$),

ΔT : variation de température enregistrée entre deux mesures ($T_2 - T_1$).

La variation de déformation entre les deux mesures d'ouverture de fissure M_1 et M_2 , corrigée de l'effet thermique s'écrit :

$$\Delta\varepsilon = M_2 - M_1 \pm \Delta\varepsilon_T.$$

L'ajout ou la soustraction de $\Delta\varepsilon_T$ est due au fait que quand la température augmente, le béton a tendance à se dilater et qu'à contrario, quand la température diminue, le béton a tendance à se rétracter.

La Figure 3.1 présente un exemple de correction thermique réalisée sur des mesures acquises à l'aide d'un système de *monitoring* multi capteurs, mesurant conjointement la température et l'évolution de l'ouverture d'une fissure à l'aide d'un extensomètre. Ces données ont été acquises durant une année sur un ouvrage situé à Bayonne (France). Les valeurs de température sont représentées en rouge. Les valeurs brutes d'ouverture de la fissure sont représentées en bleu et les valeurs corrigées de l'influence de la température sont représentées par les points verts cerclés de noir. Sur cet exemple, les données corrigées de l'effet thermique indiquent clairement l'importance de cette correction. Il apparait en effet que l'évolution de l'ouverture de la fissure est pseudo-linéaire contrairement à ce que traduisent les données brutes.



Figure 3.1 Évolution de l'ouverture d'une fissure avant (en bleu) et après (en noir) correction de l'influence de la température (en rouge).

3.3 Contribution à la représentation des données sur support photographique

3.3.1 Défi lié au support photographique

Les photographies numériques sont des supports 2D intéressants car très peu coûteux et extrêmement faciles d'accès, notamment depuis l'émergence des appareils photos numériques et des téléphones cellulaires. La représentation de données sur support photographique pose néanmoins un problème du fait des perspectives que celles-ci occasionnent. En effet, l'espace dans lequel la photographie est réalisée est tridimensionnel et la prise de vue obtenue est une projection en plan. Le passage d'une scène du monde réel à sa représentation en 2D induit la

notion de perspective. Les cartographies de CND acquises sur le terrain sont réalisées en 2D. Quand les mesures sont acquises en continu sur plusieurs plans consécutifs, la cartographie obtenue correspond à une vue développée de la surface de l'ouvrage ausculté. Pour représenter les résultats sur une photographie, il faut donc réaliser différentes transformations de la cartographie plane en cartographie déformée permettant d'épouser la géométrie des zones auscultées en tenant compte des perspectives de la prise de vue.

Pour réaliser ces transformations, deux repères distincts doivent être considérés, le repère de la cartographie (repère xy) d'une part et le repère de la photographie (repère uv) d'autre part. Pour passer du repère xy au repère uv , une transformation projective doit être réalisée. Cette transformation est de la forme :

$$[u \ v \ 1] = [x \ y \ 1] * T$$

avec : u : abscisse d'un pixel dans le repère uv (photographie),

v : ordonnée d'un pixel dans le repère uv (photographie),

x : abscisse d'un pixel dans le repère xy (cartographie),

y : ordonnée d'un pixel dans le repère xy (cartographie),

$$T = \begin{bmatrix} A & D & G \\ B & E & H \\ C & F & I \end{bmatrix}, \text{ matrice de passage entre le repère } xy \text{ et le repère } uv.$$

En définissant quatre (4) points de contrôles sur la photographie (PC1 à PC4), correspondant aux quatre (4) coins de la cartographie (CC1 à CC4), et connaissant les dimensions de celle-ci (exprimée en nombre de pixels), il est ainsi possible de déterminer les neuf (9) coefficients de la matrice de passage T .

Connaissant les coefficients de T , il est finalement possible de déterminer les coordonnées de tous les pixels de la cartographie dans le périmètre défini sur la photographie par les coordonnées des quatre points de contrôle. La Figure 3.2 schématise le principe de la transformation projective pour un plan de projection.

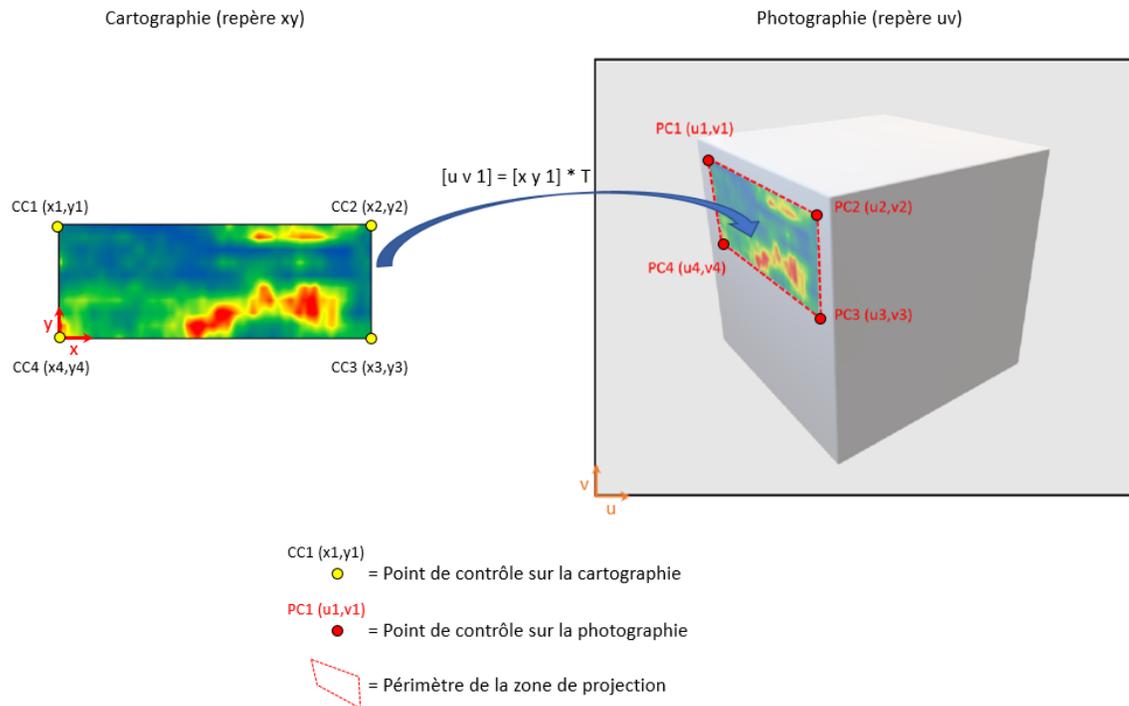


Figure 3.2 Principe de la transformation projective sur un plan (cartographie vers photographie).

3.3.2 Algorithme développé et exemple de représentation

L'algorithme, implémenté en langage Matlab® et nommé *map2pic*, concerne la représentation des cartographies de CND par transformation projective multiples permettant de déformer simultanément une cartographie sur plusieurs plans en sélectionnant les contours de la zone d'investigation directement sur la photographie. L'objectif est d'obtenir une meilleure représentativité des données acquises et un gain de temps substantiel en évitant de scinder manuellement les cartographies pour les projeter successivement sur chacun des plans auscultés. Cet algorithme nécessite de connaître les dimensions de la cartographie (longueur développée et hauteur développée) et la position relative des arêtes (horizontales ou verticales) définissant les différents plans de la zone d'étude par rapport à l'origine de la grille de mesure. Ces deux informations sont obtenues directement sur le terrain par l'opérateur en charge de la réalisation des investigations, à l'aide d'une roue codeuse montée sur les instruments de CND et assurant le déclenchement et le positionnement des mesures. Renseigner la position d'une arête revient à projeter la cartographie selon deux plans et donc à calculer deux matrices de passage distinctes. Par extension, en renseignant la position de N arêtes, la cartographie sera subdivisée en N+1 éléments, correspondant à N+1 plans sur le support photographique. Il conviendra donc de calculer N+1 matrices de passage T_1 à T_{N+1} . La séquence de traitement utilisée par l'algorithme *map2pic* est synthétisée dans l'Algorithme 3.1.

Algorithme « map2pic »

1. Sélection du support de représentation photographique (format image);
2. Sélection des points de contrôle sur la photographie
(6 pts=2plans, 8pts=3 plans, 10pt=4 plans, etc.)
3. Sélection de la cartographie (format image);
4. Renseigner les dimensions de la cartographies (en mètre);
5. Renseigner la position des N arêtes situées dans la zone / origine de la grille de mesures (en mètre);
6. Subdivision de la cartographie en N+1 éléments;
7. Boucle sur le calcul de la matrice de passage T pour les N+1 éléments;
8. Transformation projective des coordonnées des pixels de chaque élément de la cartographie dans le repère de la photographie;
9. Affichage de la cartographie projetée sur la photographie;
10. Masque transparent sur les pixels hors zone, transparence variable dans la zone.

Algorithme 3.1 **Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « map2pic ».**

Un exemple de rendu est présenté sur la Figure 3.3 où une cartographie de potentiel de corrosion a été projetée sur la sous-face d'un ouvrage de type passage inférieur (PI). Les arêtes [ad] et [bc] représentées sur le support photographique (en haut) délimitent trois plans formés par la jonction entre les goussets et la travée principale. Les positions des arêtes [a'd'] et [b'c'] par rapport à l'origine du repère de la cartographie (au milieu) correspondent respectivement aux longueurs d1' et (d1'+d2') mesurées par l'opérateur lors de l'acquisition des données. La longueur développée (noté L) de la cartographie correspond à la somme d1'+d2'+d3', h étant par ailleurs la hauteur de la zone auscultée. La projection de la cartographie de potentiel de corrosion sur les trois plans de la zone considérée sur la photographie est représentée en transparence en partie basse de cette figure.

La séquence de traitement présentée dans l'Algorithme 3.1 peut également être utilisée pour estimer, de façon semi-automatique, la superficie de zones d'intérêt telles que des zones de désordres ou des anomalies détectées par contrôles non destructifs. Le calcul des surfaces d'intérêt peut être réalisé sur le même principe que celui présenté dans l'Algorithme 3.1 en définissant directement le périmètre de la zone d'intérêt sur la cartographie projetée sur la photographie. Connaissant la matrice de passage T, la dimension de la photographie et de la cartographie (en nombre de pixels) et les dimensions réelles de la cartographie (L et h en mètre), il est ainsi possible d'estimer les superficies.

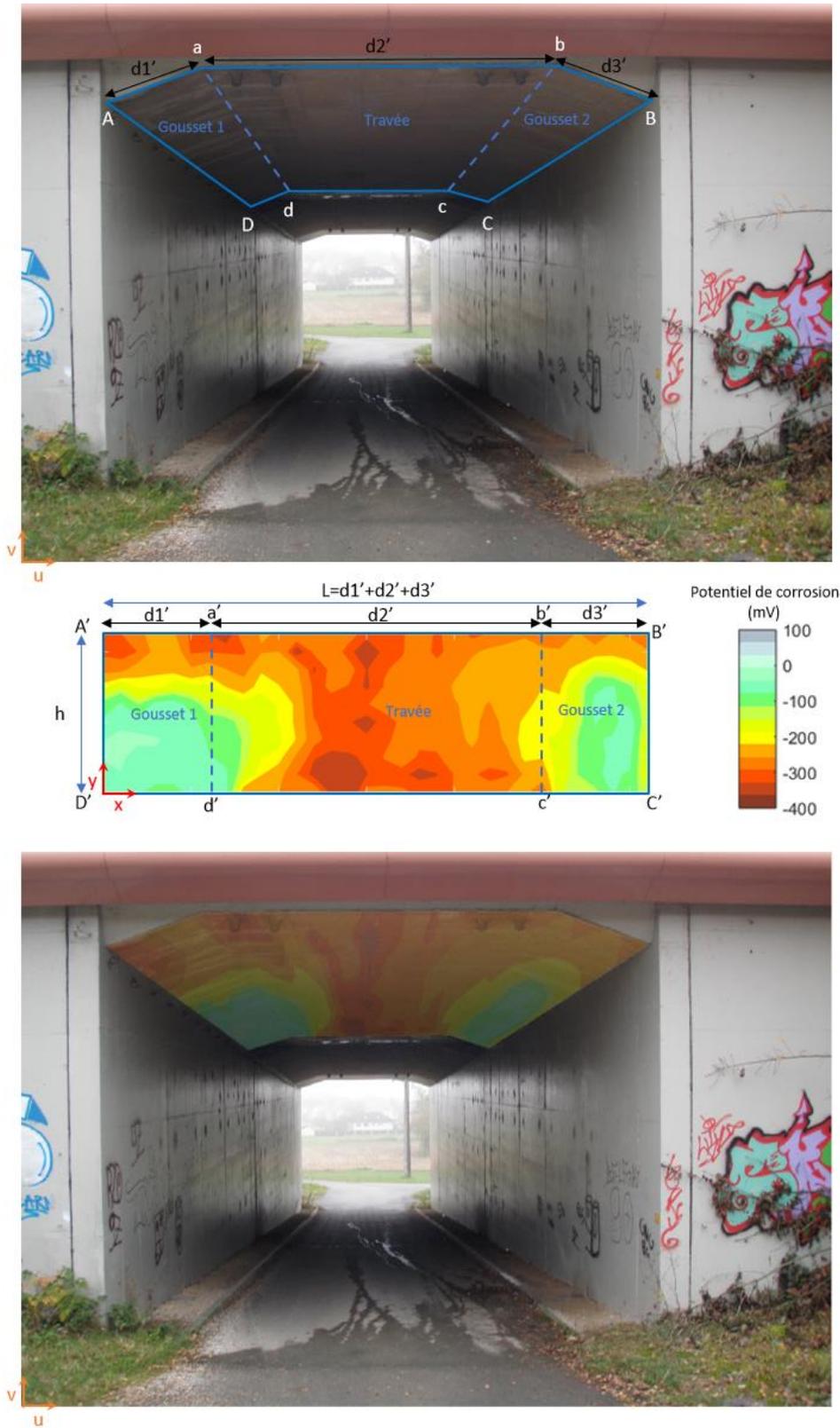


Figure 3.3 Exemple de projection selon trois plans (gousset 1, travée, gousset 2 – haut) d'une cartographie de potentiel de corrosion (milieu) avec l'algorithme « *map2pic* » en sous-face d'un ouvrage de type passage inférieur (bas).

3.4 Contribution à la représentation des résultats sur modèle 3D

3.4.1 Défis

Les plateformes de restitution des structures existantes comme ReCap® (cf. Chapitre 2.4) permettent de visualiser des nuages de points obtenus par scanner 3D ou des maillages triangulaires 3D texturés générés par l'analyse photogrammétrique. Cependant, les données d'investigation (*monitoring*, CND, analyses en laboratoire) ne peuvent pas être incluses directement sur les modèles 3D étant donné que ces plateformes ne sont pas spécifiquement dédiées au diagnostic des ouvrages du génie civil (cf. Chapitre 2.4). Les modèles générés par photogrammétrie peuvent néanmoins être exportés selon différents formats pour une exploitation ultérieure sur d'autres plateformes. Les formats les plus couramment rencontrés sont les formats *.obj (*Wavefront Technologies*), *.ply (Bourke, 2018), ou *.stl (*3D Systems*) qui décrivent, selon des syntaxes différentes, la position et l'organisation des points du maillage dans un fichier texte principal et la texture associée dans des fichiers images.

Un premier défi réside dans la restitution de l'enveloppe 3D texturée de la structure considérée sur la base des fichiers disponibles à l'export.

Un second défi concerne l'interaction de l'utilisateur avec le modèle 3D restitué. Les zones d'investigation ne couvrant quasiment jamais l'intégralité de la structure modélisée, il est nécessaire de pouvoir définir rapidement et intuitivement les limites des zones auscultées par CND ou la localisation des données acquises ponctuellement (*monitoring*, prélèvements) afin d'y reporter les résultats obtenus.

Pour relever ces défis, deux algorithmes ont été spécifiquement développés dans le cadre de cette thèse. Ils concernent le format *.obj.

3.4.2 Algorithme de restitution 3D au format *.obj et exemple de restitution

Les maillages permettant de représenter les structures en 3D sont généralement composés de faces triangulaires dont chaque sommet, ou vertex, est défini par ses coordonnées xyz. Une couleur peut également être associée à chaque vertex sous la forme d'un triplet d'indices RGB (Red Green Blue), dont les valeurs varient entre 0 (noir) et 255 (blanc).

Dans le cas du format *.obj, le fichier principal est structuré en deux parties distinctes. Pour chaque vertex, la première partie contient les informations suivantes :

- v : coordonnées du vertex.
- vn : coordonnées de la normale du vertex.
- vt : coordonnées normalisées (valeurs comprises entre 0 et 1) des vertex dans le repère du fichier image contenant la texture.

Les fichiers images sont obtenus par segmentation (Lévy *et al.*, 2002) et sont liés au fichier principal. À noter que plus la structure à modéliser est imposante et présente une géométrie complexe, plus le nombre d'images de texture segmentée sera important. Il est donc fréquent que le fichier principal fasse référence à plusieurs fichiers de texture.

La seconde partie du fichier principal contient, pour chaque face (noté f), des ensembles d'indices correspondant à des pointeurs faisant conjointement référence aux positions des vertex, des normales et des textures dans le fichier principal. Chaque ensemble d'indices représente une face triangulaire orientée dans l'espace et les couleurs RGB de chacun des vertex. La Figure 3.4 présente un schéma représentatif de la structure du format *.obj.

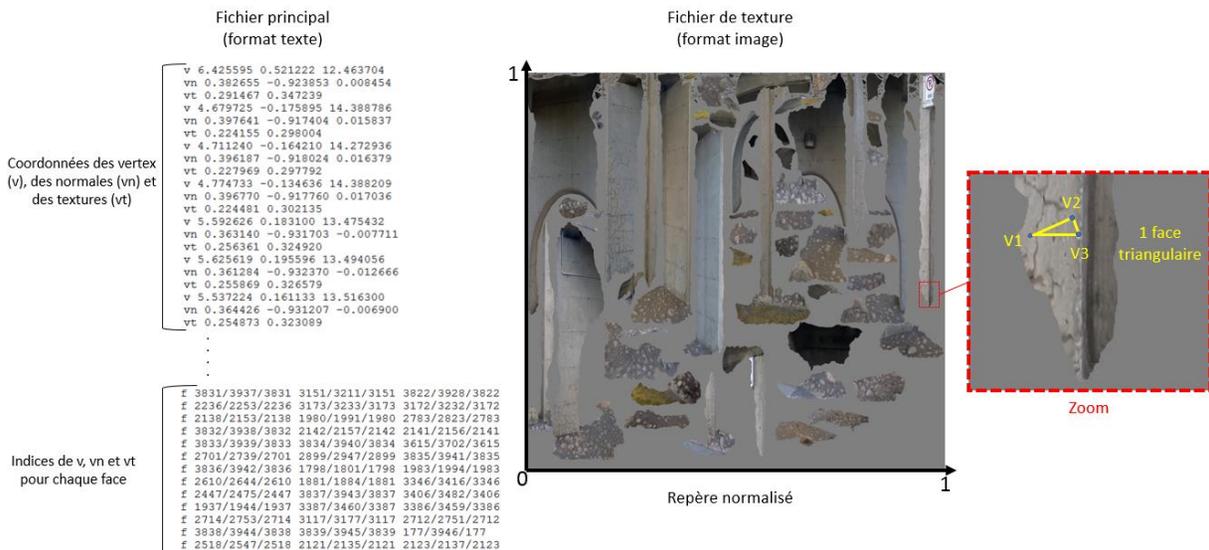
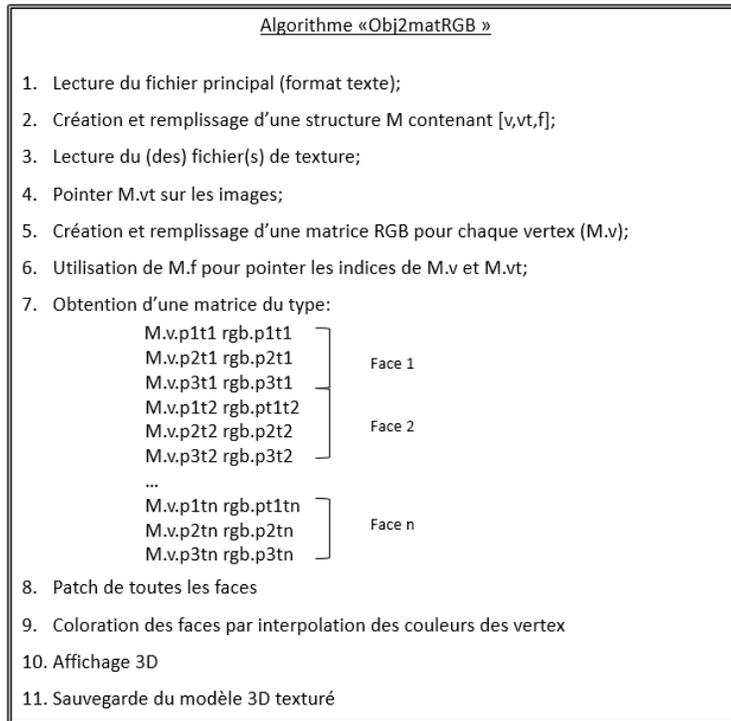


Figure 3.4 Illustration du format de fichier .obj et d'un fichier image de texture segmentée auquel le fichier principal fait référence.

Un algorithme, nommé « Obj2matRGB » a été développé de manière à restituer automatiquement le modèle 3D texturé défini, dans le format *.obj, par le fichier principal et les fichiers images de texture segmentées auxquels il fait référence. La séquence de traitement utilisée par l'algorithme Obj2matRGB est synthétisée dans l'Algorithme 3.2.



Algorithme 3.2 **Séquence de traitement utilisée par l'algorithme « Obj2matRGB ».**

La Figure 3.5 présente un exemple de représentation 3D obtenue à l'aide de l'algorithme *obj2matRGB* sur une pile de pont. Le modèle 3D au format *.obj utilisé pour cette représentation a été généré par le logiciel de photogrammétrie *Recap Photo*®.

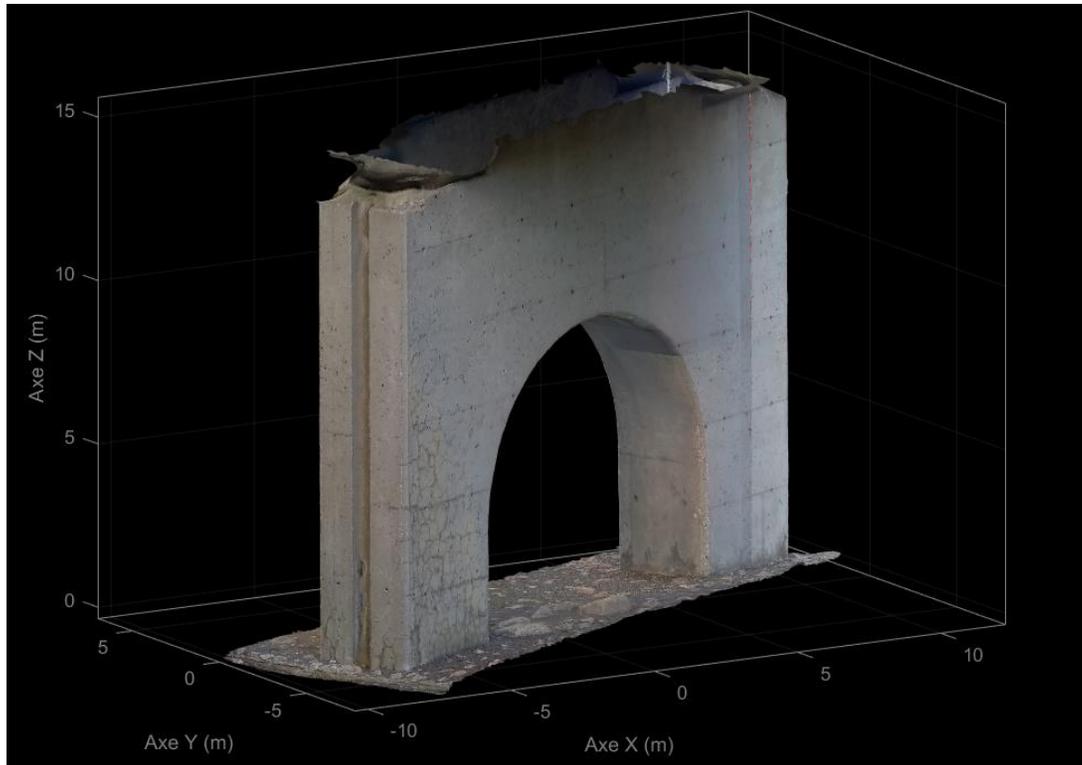


Figure 3.5 Exemple de restitution d'une pile de pont avec l'algorithme « *Obj2matRGB* » à partir d'un modèle 3D (format *.obj) généré par le logiciel *Recap Photo*®.

3.4.3 Algorithme d'interaction avec le modèle 3D et exemple de représentation

Une fois le modèle 3D texturé restitué, l'objectif est de pouvoir représenter les données acquises sur celui-ci pour faciliter la lecture et l'interprétation des résultats.

Pour cela, il est nécessaire de pouvoir définir l'implantation des mesures en interagissant avec le modèle 3D. Le fait que les mesures soient repérées sur le terrain à l'aide de marqueurs (craie, bombe de peinture), permet de localiser directement les zones d'implantation sur le modèle 3D. Dans le cas du report des données de CND, ceci implique de sélectionner les quatre coins d'une cartographie sur le modèle 3D et de la projeter sur celui-ci. Pour les données acquises ponctuellement (*monitoring*, prélèvements), un seul point doit être défini.

La Figure 3.6 présente un schéma de la configuration dans laquelle se trouve un utilisateur lors de la sélection d'un point sur une enveloppe texturée. Le point de vue et le point ciblé sur le modèle 3D affiché à l'écran (la cible), définissent l'axe optique. La cible peut être défini dans le repère orthonormé du modèle 3D (XYZ) et dans un second repère orthonormé ($X_cY_cZ_c$) tel que Z_c pointe en direction du point de vue le long de l'axe optique.

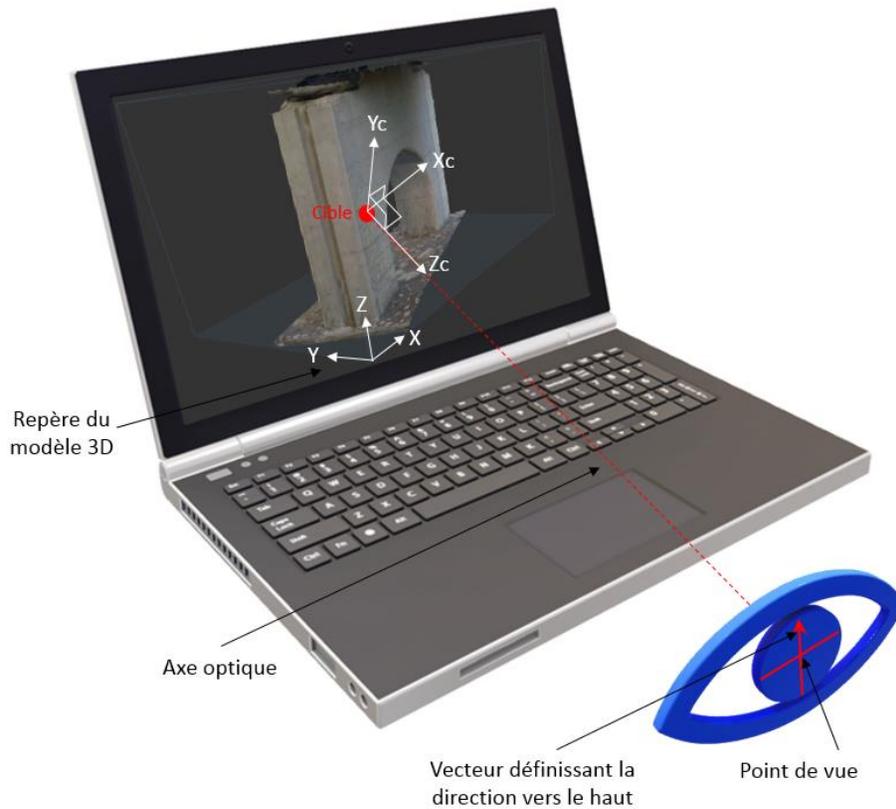


Figure 3.6 Schéma de principe de la sélection d'un point sur un modèle 3D affiché à l'écran.

Les logiciels de visualisation 3D offre des fonctionnalités permettant de déterminer automatiquement les composantes du vecteur Z_c (z_1, z_2, z_3) et du vecteur pointant vers le haut (vecteur « up ») correspondant à Y_c (y_1, y_2, y_3). Il faut donc calculer X_c .

Soit les vecteur Z_c et Y_c , tel que :

$$Z_c = z_1\hat{i} + z_2\hat{j} + z_3\hat{k}$$

$$Y_c = y_1\hat{i} + y_2\hat{j} + y_3\hat{k}$$

Le vecteur X_c , conjointement orthogonal à Z_c et à Y_c , se détermine en effectuant le produit vectoriel de Z_c et Y_c , tel que :

$$X_c = (z_2y_3 - z_3y_2)\hat{i} + (z_3y_1 - z_1y_3)\hat{j} + (z_1y_2 - z_2y_1)\hat{k}$$

avec :

$$x_1 = (z_2y_3 - z_3y_2)$$

$$x_2 = (z_3y_1 - z_1y_3)$$

$$x_3 = (z_1y_2 - z_2y_1)$$

Les composantes de X_c, Y_c et Z_c constituent la matrice de rotation R permettant de passer du repère du modèle 3D (XYZ) au repère de la cible ($X_c Y_c Z_c$), tel que :

$$R = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 \\ y1 & y2 & y3 \\ z1 & z2 & z3 \end{bmatrix}$$

Pour représenter la cible sur le modèle 3D, il convient d'abord de représenter l'axe optique initial orienté le long du vecteur Z_c et passant par la cible et le point de vue.

Par souci de clarté de représentation, la Figure 3.7 présente uniquement les vertex du modèle 3D texturé proposé sur la Figure 3.5 ainsi que l'axe optique (pointillé rouge).

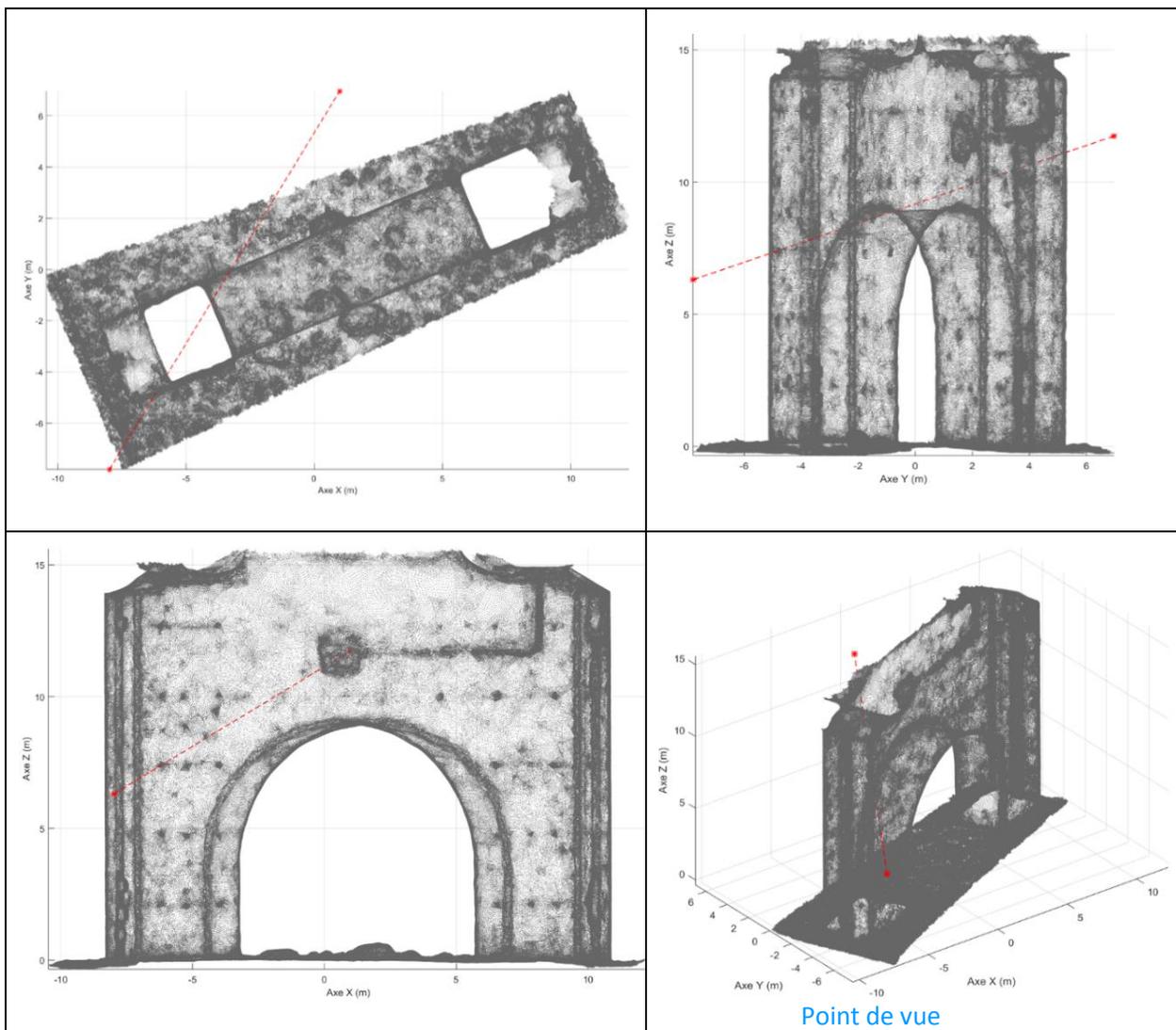


Figure 3.7 Représentation des vertex (en gris) du modèle 3D présentée sur la Figure 3.5 et de l'axe optique (pointillés rouges) matérialisant la direction entre le point de vue et un point cible (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).

La rotation du modèle 3D initial (noté M_i) depuis le repère (XYZ) vers le repère $(X_cY_cZ_c)$ est effectuée comme suit :

$$M_r = R * M_i$$

avec : M_r : matrice $[n \times 3]$ contenant les coordonnées des vertex après la rotation,

R : matrice de rotation,

M_i : matrice $[n \times 3]$ contenant les coordonnées des vertex avant la rotation.

L'axe optique et le modèle 3D orientés dans le repère $(X_cY_cZ_c)$ après la rotation sont respectivement notés AO_r et M_r . La Figure 3.8 présente le modèle 3D initial (vertex en gris) superposé au modèle 3D obtenu après rotation (vertex en kaki) ainsi que l'axe optique avant (pointillés rouge) et après rotation (trait vert).

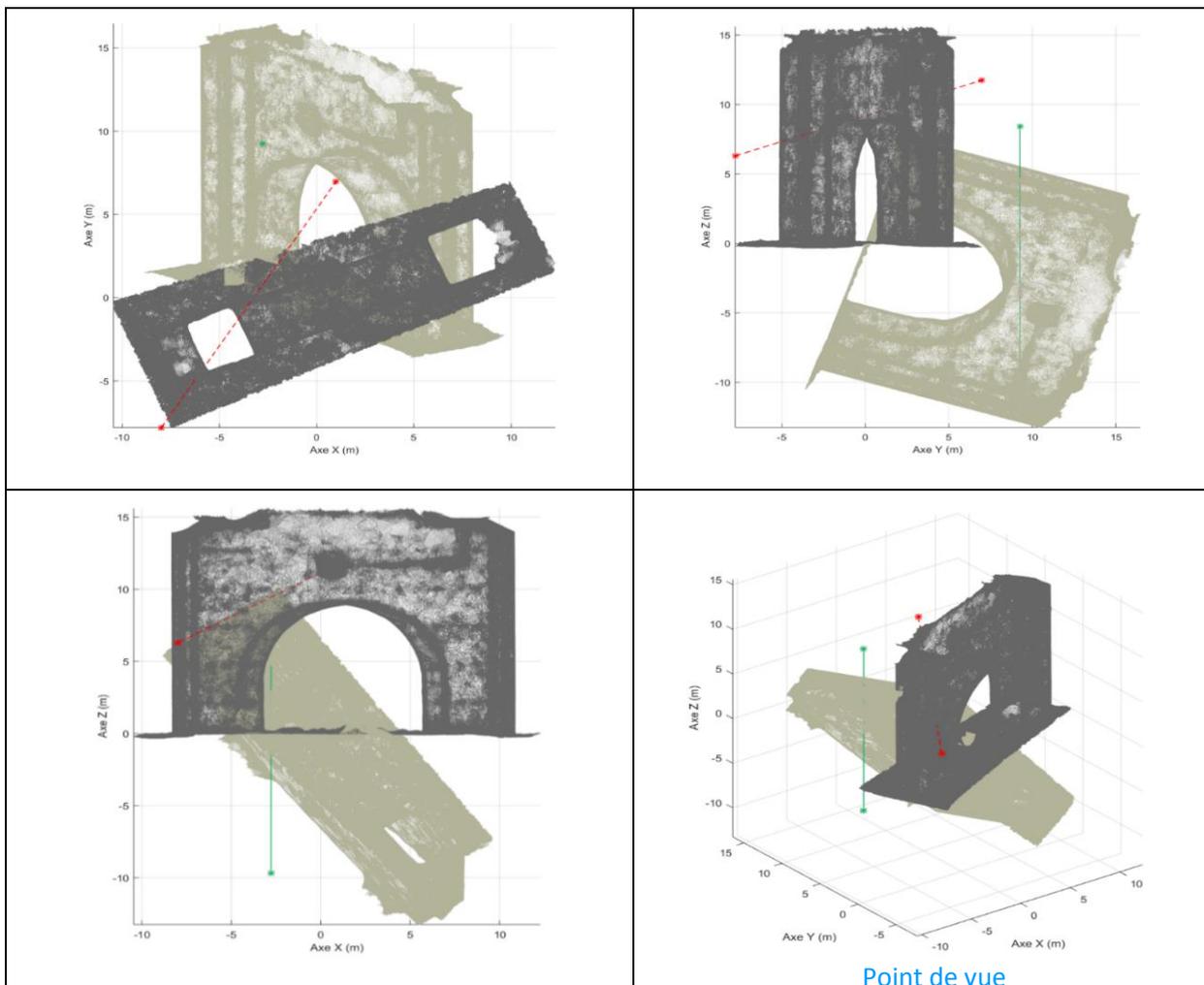


Figure 3.8 Représentation des vertex du modèle 3D après rotation (M_r – en kaki) reportés sur les différentes vues présentées sur la Figure 3.7. L'axe optique après rotation (AO_r , trait vert) est orthogonal au plan XY (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).

Par cette rotation, l'axe optique AO_r devient ainsi colinéaire à une des directions principales du repère du M_i (cf. Figure 3.8). Dans le plan orthogonal à l' AO_r , un faisceau de détection centré sur l' AO_r peut ensuite être défini. L'approche présentée utilise un faisceau de détection parallélépipédique de section carré et centré sur l' AO_r . L'ouverture de ce faisceau permet de sélectionner un ensemble de vertex du M_r situés en périphérie de l' AO_r . Plus l'ouverture du faisceau est grande, plus le nombre de vertex présélectionnés est important.

Comme les enveloppes texturées sont généralement des structures fermées, plusieurs ensembles de vertex peuvent être détectés dans le faisceau de détection, aussi bien sur la face visible depuis le point de vue que sur la face opposée de la structure, tel que présenté sur la Figure 3.9.

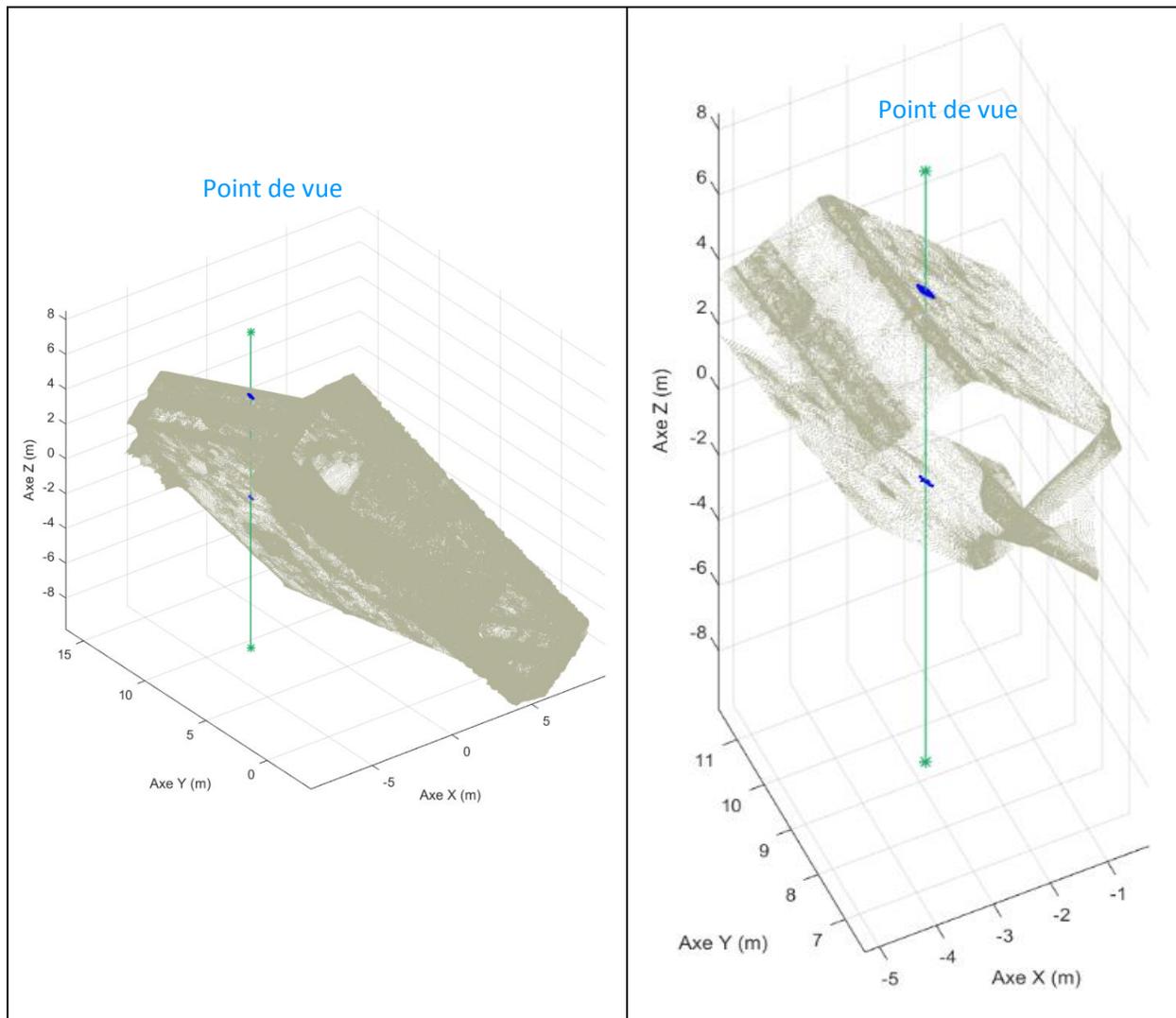


Figure 3.9 Détection des vertex (en bleu) situés dans un faisceau centré sur l' AO_r . À gauche - vue 3D générale. À droite - zoom et mise en évidence de deux ensembles de vertex situés sur deux faces opposées du modèle 3D.

Pour éviter cet écueil, il convient de sélectionner et de ne conserver que les vertex dont la normale pointe en direction du point de vue. Cette sélection est effectuée en utilisant les valeurs de vn dans le fichier principal permettant de représenter le modèle au format *.obj (cf. Figure 3.4). Cette démarche permet d'éviter de pointer une cible située sur la face opposée de la structure (cible « fantôme »), mais néanmoins située le long de l' AO_r .

La distance entre les vertex situés sur la face visible depuis le point de vue et le point cible est ensuite calculée. L'indice du vertex dont la distance à l' AO_r est minimale est sélectionné tel que présenté sur la Figure 3.10.

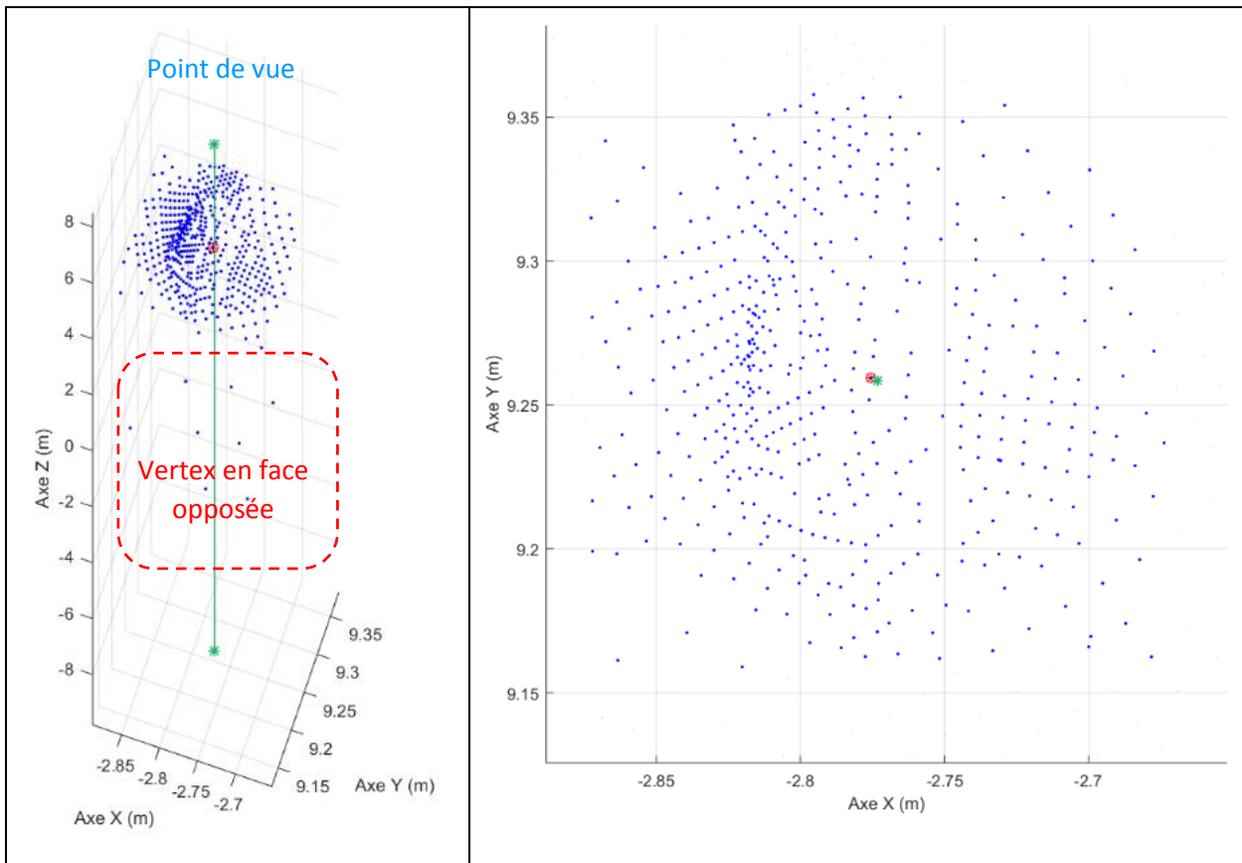


Figure 3.10 Cible sélectionnée (point rouge) parmi les vertex (en bleu) situés à proximité de l' AO_r (en vert). À gauche – vue 3D générale. À droite – vue dans le plan XY incluant uniquement les vertex dont les normales pointent dans la direction du point de vue.

Le vertex correspondant est finalement représenté sur M_i après une rotation inverse depuis M_r tel que présenté sur la Figure 3.11. Cette démarche est répétée pour chaque point ciblé sur le modèle 3D.

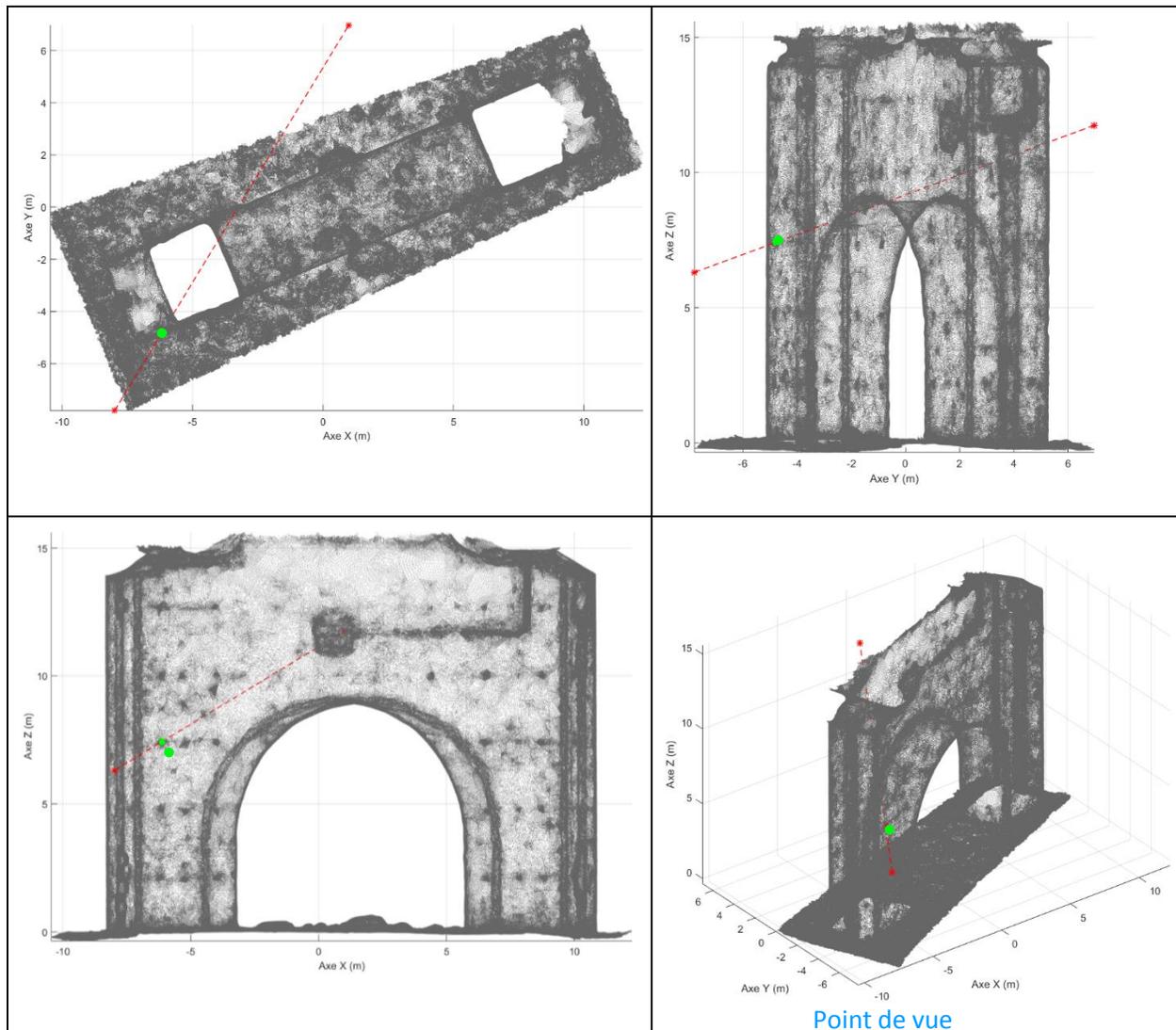


Figure 3.11 Représentation du point cible (en vert) sur le modèle 3D initial (haut gauche – vue en plan XY, haut droite – vue en plan YZ, bas gauche – vue en plan XZ, bas droite – vue 3D).

Un algorithme, nommé « *click2cloud* » a été développé pour réaliser automatiquement ces différentes manipulations. Concrètement, l'utilisateur clique un point sur l'écran et voit instantanément ce point reporté sur la structure. La séquence de traitement de l'algorithme *click2cloud* est synthétisée dans l'Algorithme 3.3.

Algorithme «click2cloud »

1. Click sur le modèle 3D (repère XYZ) pour sélectionner une cible
- % PAS D’AFFICHAGE ECRAN de l’étape 2 à 11
2. Récupération de la position du point de vue (PV), du vecteur représentant l’axe optique (Zc) et du vecteur ‘up’ (Yc)
3. Calcul du produit croisé de Zc et Yc pour obtenir Xc
4. Définition d’un repère orthonormé « cible » noté XcYcZc
5. Calcul de la matrice de rotation R entre le repère XYZ et XcYcZc
6. Rotation de Mi → nouveau modèle 3D noté Mr et axe optique (AOr) colinéaire à une direction principale
7. Définition d’un faisceau de sélection centré sur AOr
8. Détection des vertex situés dans le faisceau
9. Sélection des vertex dont la normale pointe vers le PV
10. Recherche de l’indice du vertex qui minimise la distance avec PV dans Mr
11. Rotation inverse
- % AFFICHAGE ECRAN
12. Affichage du point cible sur Mi
13. Enregistrement des coordonnées de la cible
- % Si un seul point (monitoring ou prélèvement) → Stop
- % Si cartographie de CND → boucle (étape 1 à 13)

Algorithme 3.3 **Séquence de traitement utilisée par l’algorithme « *click2cloud* ».**

Pour la restitution des données de CND, l’algorithme *click2cloud* est appelé quatre fois pour sélectionner les quatre coins (notés P1 à P4) de la cartographie considérée. L’angle entre l’axe des abscisses et le vecteur P1P2 est ensuite déterminé pour effectuer une rotation du modèle afin que P1’P2’ soit parallèle à l’axe X tel que présenté sur la Figure 3.12.

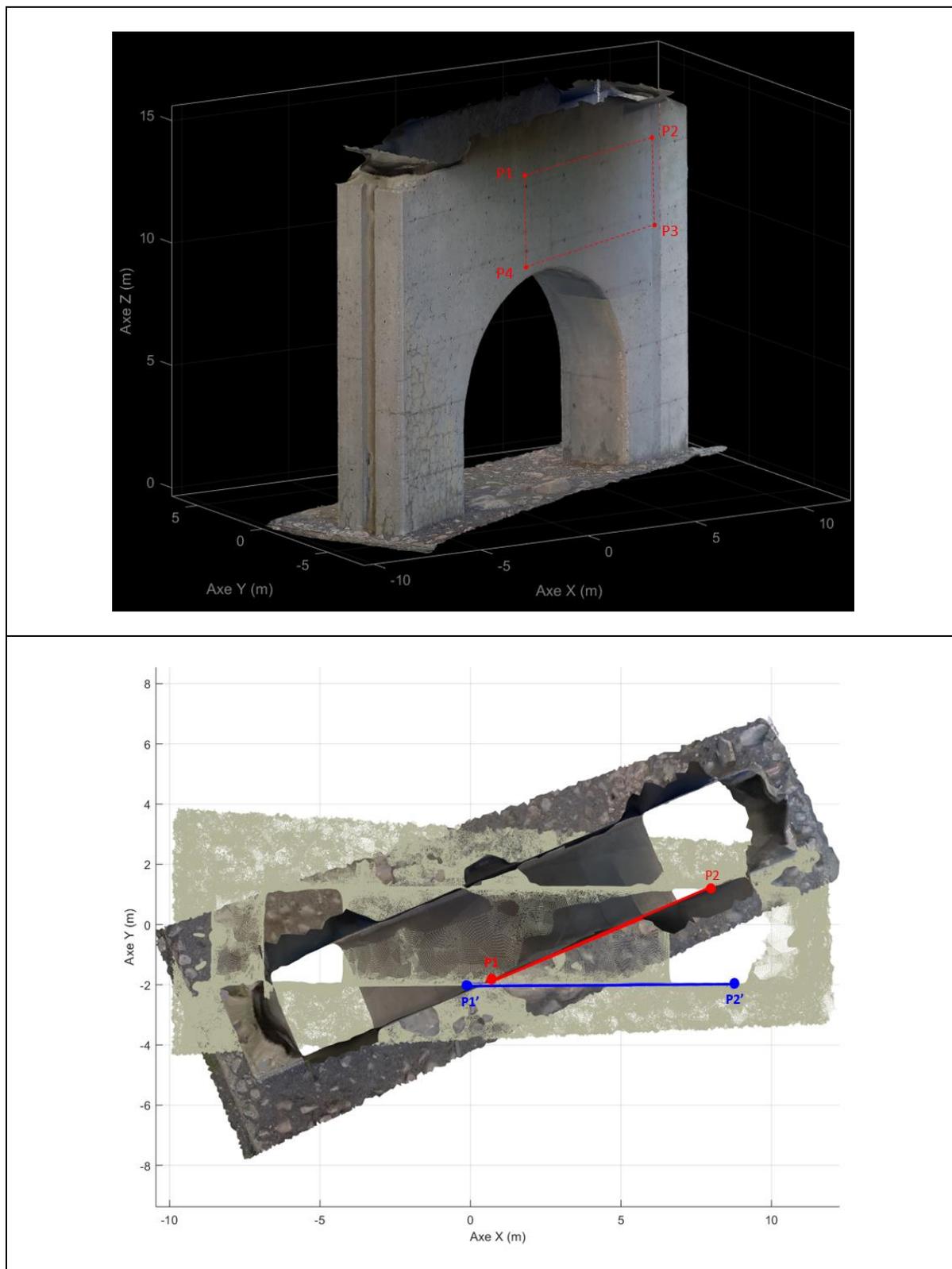


Figure 3.12 Définition des quatre coins (P1 à P4) d'une zone d'étude à l'aide de l'algorithme *clic2cloud*. (Haut) - Vue dans le plan XY du modèle 3D texturé et des vertex du modèle après rotation (en kaki). Le vecteur P1P2 (en rouge) devient P1'P2' (en bleu) après rotation et est parallèle à l'axe des abscisses (Bas).

Dans le plan XZ, les indices et les coordonnées des vertex situés à l'intérieur du polygone P1'P2'P3'P4' (après rotation) sont ensuite déterminés en ne prenant en considération que les vertex dont les normales pointent en direction du point de vue. Cette sélection est effectuée en utilisant les valeurs de vn dans le fichier principal permettant de représenter le modèle au format *.obj (cf. Figure 3.4).

Les coordonnées xz des vertex sélectionnés sont ensuite projetées dans le repère de la cartographie par une transformation projective (cf. Figure 3.2). La matrice de passage (T) entre les deux repères est calculée à l'aide des coordonnées des points P1' à P4' et des coordonnées CC1 à CC4 déterminées à partir du nombre de pixels de la cartographie. Une couleur RGB peut alors être attribuée à chaque vertex tel que présenté sur la Figure 3.13.

À noter que cette séquence de traitement nécessite de créer le maillage le plus fin possible lors de l'export du modèle au format *.obj. En effet, plus le nuage de point sera dense, plus la projection de la cartographie sera fidèle en termes de restitution géométrique et de restitution des couleurs.

Les indices des vertex permettent finalement de déterminer l'agencement des faces colorées à reporter sur le modèle 3D initial, tel que présenté sur la Figure 3.14.

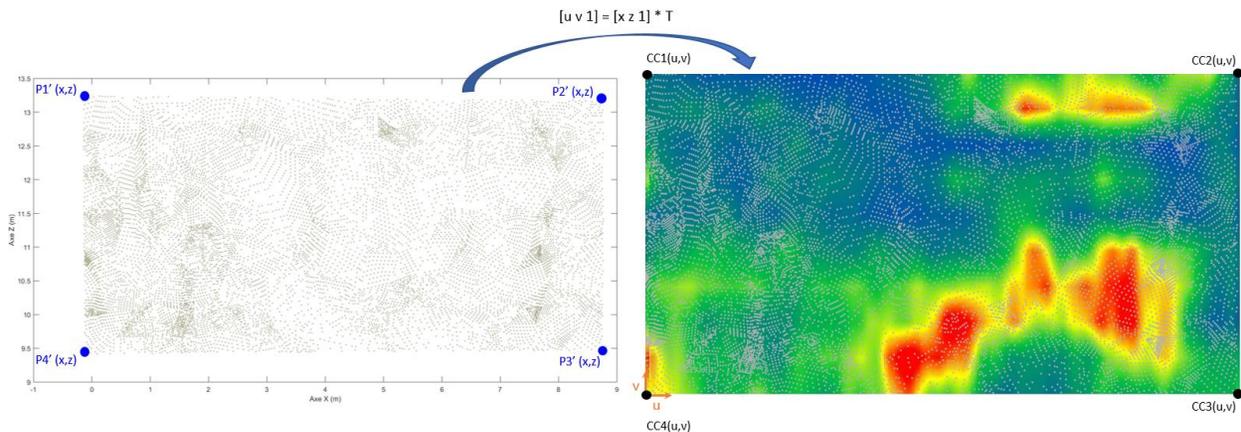


Figure 3.13 Transformation projective permettant d'allouer aux vertex situés à l'intérieur du polygone P1'P2'P3'P4' (à gauche) une couleur RGB dans le repère de la cartographie (à droite).

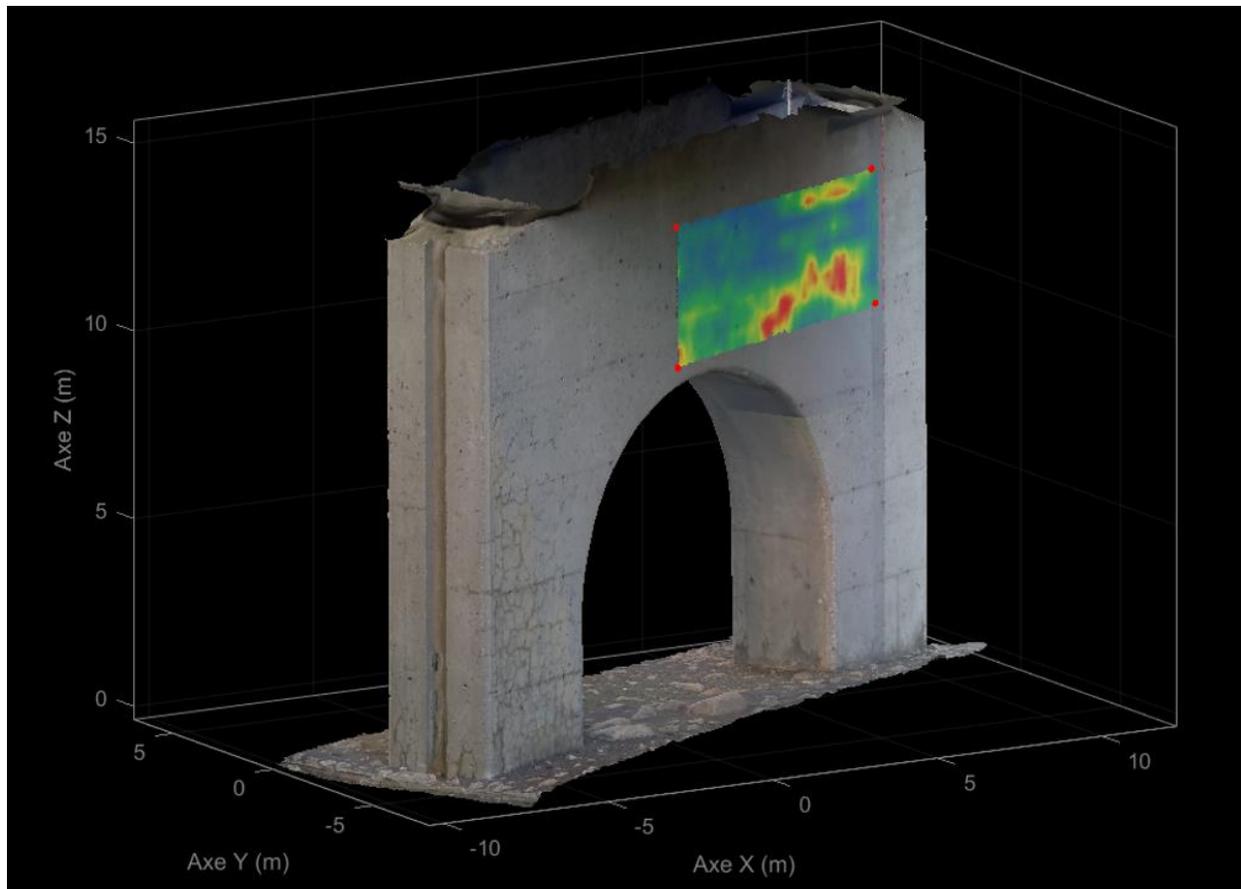


Figure 3.14 Cartographie de CDN projeté sur le modèle 3D.

Un algorithme, nommé « *map2cloud* » a été développé pour réaliser automatiquement ces différentes manipulations. La séquence de traitement de l'algorithme *map2cloud* est synthétisée dans l'Algorithme 3.4.

```
Algorithm « map2cloud »  
  
% PAS D’AFFICHAGE ECRAN de l’étape 1 à 14  
1. Calcul de l’angle P1P2 / axe XY  
2. Rotation du modèle pour que P1’P2’ soit colinéaire à l’axe X  
3. Calcul du plan passant au mieux au travers des 4 points (par moindres carrés)  
4. Calcul de la normale au plan  
5. Sélection du plan de projection (perpendiculaire à composante max de la normale)  
6. Détection des vertex situés dans le rectangle P1’P2’P3’P4’ (après rotation)  
7. Sélection des vertex dont la normale pointe vers le point de vue  
8. Affichage des vertex en « coupe »  
9. Sélection finale semi-automatique  
10. Transformation projective des vertex sélectionnés vers la cartographie  
11. Attribution d’une couleur RGB aux vertex sélectionnés  
12. Récupération des indices des vertex dans le fichier *.obj.  
13. Patch de toutes les faces  
14. Coloration des faces par interpolation des couleurs des vertex  
  
% AFFICHAGE ECRAN  
15. Affichage sur modèle 3D  
16. Sauvegarde de la carte 3D
```

Algorithme 3.4 **Séquence de traitement utilisée par l’algorithme « map2cloud ».**

3.5 Synthèse

Ce chapitre a permis de présenter plusieurs développements méthodologiques et algorithmiques permettant de favoriser la représentation des données.

Concernant les séries temporelles provenant des capteurs de *monitoring*, il a été vu que la température avait un effet important sur la représentativité des données d’ouverture de fissure. Une méthode de correction thermique a été utilisée pour fiabiliser la représentation et l’exploitation des données affectées par les fluctuations thermiques.

Pour les données de CND représentées sur un support photographique, un algorithme a été développé afin de projeter automatiquement une cartographie sur plusieurs plans de la photographie. Ceci permet un gain de représentativité important.

Dans le cas de la représentation en 3D, la restitution des modèles photogrammétriques et des interactions possibles avec ceux-ci a été présenté. Un algorithme de restitution des données de photogrammétrie au format *.obj a notamment été développé afin de pouvoir interagir avec le modèle 3D. Un second algorithme a été développé afin de pouvoir alimenter le modèle 3D avec différents types de données, aussi bien ponctuelles que cartographiques. À noter que ces développements sont également adaptés à la restitution des données sur des modèles 3D générés par scanner 3D.

4 APPORT DES MÉTHODES D'INTÉGRATION DE DONNÉES

4.1 Introduction

Le Chapitre 2 a présenté les différentes pathologies des ouvrages, parmi lesquelles la corrosion des armatures dont l'influence est considérable et prépondérante sur l'intégrité des structures en béton armé. De plus, les moyens de caractérisation par CND ont mis en évidence une disparité dans la restitution des résultats obtenus pour évaluer l'état de développement des pathologies. En fonction de la méthode de CND utilisée, le paramètre d'intérêt peut en effet être mesuré à grand rendement et restitué sous forme de cartographie ou mesuré de façon ponctuelle et restitué sous la forme d'une valeur numérique. Bien que sous-échantillonnées par rapport aux données cartographiques, il n'en demeure pas moins indispensable de prendre en considération les données ponctuelles dans l'objectif d'établir un diagnostic fiable et précis de l'état de d'un ouvrage. Dans une optique de durabilité, l'estimation de la vitesse de corrosion (V_{cor}) est cruciale car elle permet notamment d'appréhender la cinétique du phénomène de corrosion et donc d'aider à affiner la stratégie de maintenance des structures. Différents instruments de mesures permettent de quantifier V_{cor} (Sehgal *et al.*, 1992), mais l'acquisition sur site est chronophage en raison du protocole intrinsèque à sa mesure (polarisation des armatures). Ces données sont donc acquises en point par point. Cette méthode ne peut donc raisonnablement pas être utilisée de façon systématique sur le terrain et doit être combinée à des méthodes surfaciques à grand rendement. Selon les cas, les données de V_{cor} (ponctuelles) et de CND à grand rendement (surfacciques) peuvent être corrélées.

Dans ce chapitre, plusieurs méthodes permettant d'intégrer, d'estimer et de cartographier V_{cor} sont présentées : la fusion de CND, le cokrigeage, la simulation séquentielle bayésienne et une méthode d'apprentissage supervisée par arbre de décision. Ces différentes approches sont testées sur des données acquises sur un ouvrage situé dans les Alpes françaises. Les différents résultats sont ensuite discutés et confrontés.

4.2 Méthodes d'intégrations utilisées

Pour fiabiliser le diagnostic d'un ouvrage, il est non seulement nécessaire de multiplier les moyens à mettre en œuvre (cf. Chapitre 2.2 et Chapitre 2.3), mais également indispensable de corrélérer les informations recueillies. Cependant, les différents paramètres mesurés présentent une importante variabilité en termes de résolution et d'échantillonnage.

Les données ponctuelles cibles, aussi nommées données primaires (V_{cor} , analyses en laboratoire par exemple), sont généralement onéreuses à acquérir soit parce qu'elles ne sont accessibles que par la prise de mesure fastidieuse en plus d'être invasives (V_{cor}) ou la réalisation de sondages. Elles sont cependant indispensables pour offrir un accès direct aux paramètres du matériau à caractériser.

Les données surfaciques, ou données secondaires (enrobage, humidité relative, potentiel de corrosion par exemple), offrent l'avantage d'être accessible rapidement par la mise en œuvre de méthodes de CND et sont physiquement et/ou chimiquement reliées aux données primaires. Rapportées aux surfaces ou aux volumes investigués, elles sont bien plus abordables en termes de coût mais apportent une information indirecte sur les variables primaires et sont souvent moins précises.

Pour exploiter conjointement ces données d'entrée multi-échelles et multivariées, plusieurs approches probabilistes sont décrites dans la littérature (Breysse *et al.*, 2008; Nguyen, 2014; Ploix *et al.*, 2009; Sbartai *et al.*, 2009). Dans les paragraphes suivants, quatre approches différentes d'intégration de données sont présentées : la fusion de CND, le cokrigage, la simulation séquentielle bayésienne et l'utilisation d'arbre de décision (méthode d'apprentissage supervisé).

4.2.1 Fusion de CND et d'analyses en laboratoire (algorithme développé)

Chaque donnée de CND mesurée peut être considérée comme la signature d'un environnement plus ou moins propice au développement de l'activité de corrosion. L'objectif de cette méthode d'intégration est de combiner les données de CND acquises à grand rendement et les données ponctuelles de vitesse de corrosion pour fournir un indicateur de risque relatif à la pénétration des chlorures ou à la carbonatation du béton d'enrobage (cf. Chapitre 2.1). Bien que la propagation des fronts d'infiltration des ions chlorures et de carbonatation soient des phénomènes complexes et hétérogènes (Neville, 2011), l'approche proposée fait l'hypothèse simplificatrice que ces fronts sont uniformes et parallèles à la surface de la structure auscultée.

À partir des recommandations RILEM (RILEM-TC-154-EMC, 2003) et du retour d'expérience acquis sur le terrain, il est possible de classer et d'indexer chaque paramètre mesuré en cinq classes différentes. Pour chaque paramètre, la valeur d'indice 1 correspond à un risque de corrosion négligeable et la valeur d'indice 5 correspond à un risque sévère.

Pour les mesures de potentiel de corrosion et celles d'humidité relative superficielle obtenues par capacimétrie, chaque cartographie peut être indexée directement en utilisant les valeurs proposées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Classification des données de CND indexées.

Indicateur de risque	Potentiel de corrosion (mV)	Humidité relative de surface (indice)	Enrobage (mm) / front de pénétration des ions chlorures	Enrobage (mm) / front de carbonatation	Valeur d'indice
Négligeable	-100 to 200	0-20	16 to 200	16 to 200	1
Faible	-200 to -101	21-40	11 to 15	11 to 15	2
Modéré	-300 to -201	41-60	6 to 10	6 to 10	3
Élevé	-400 to -301	61-80	1 to 5	1 to 5	4
Critique	-600 to -401	81-100	≤ 0	≤ 0	5

Concernant les épaisseurs d'enrobage mesurées par radar haute fréquence (2-3 GHz), les armatures superficielles détectées peuvent être associées à un indice basé sur la profondeur relative de l'armature par rapport au front (carbonatation ou chlorure). Dans ce cas, nous supposons que les fronts sont colinéaires à la surface même si les fronts sont généralement irréguliers. Pour faire face à cette incertitude et éviter de n'avoir que deux classes correspondant au béton affecté (indice 5) ou non affecté (indice 1), trois plages intermédiaires de 5 mm sont introduites à la plage d'indice (indice 2 à indice 4) tel que présenté sur la Figure 4.1.

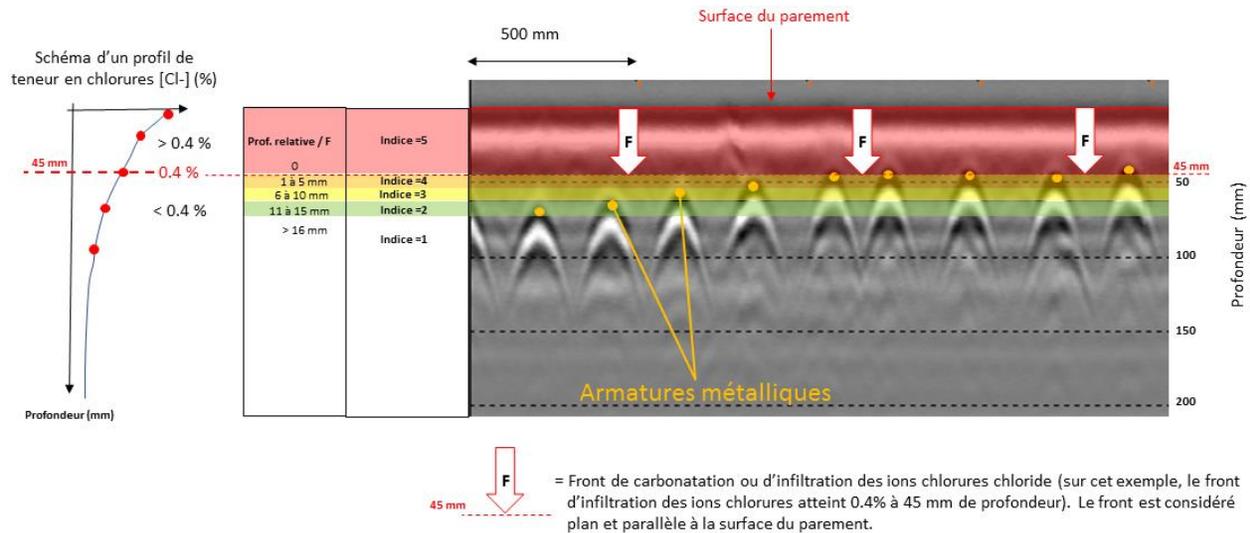


Figure 4.1 Exemple d'indexation des armatures à partir d'un radargramme relativement au front d'infiltration des chlorures.

Chaque carte de CND peut ainsi être convertie en une matrice individuelle d'indices de risque, chaque point de la grille de mesure contenant des valeurs comprises entre 1 et 5.

Il est ensuite possible de pondérer chaque matrice d'indice par le coefficient de corrélation des mesures de V_{cor} colocalisées avec celles des CND. Ceci permet de tenir compte de l'influence de

V_{cor} dans l'intégration des données de CND. Les matrices d'indices pondérés peuvent finalement être sommées afin d'obtenir une cartographie d'indice de risque globale relative à l'influence des chlorures et une cartographie d'indice de risque relative à l'influence de la carbonatation. La Figure 4.2 synthétise la démarche d'intégration par fusion de CND.

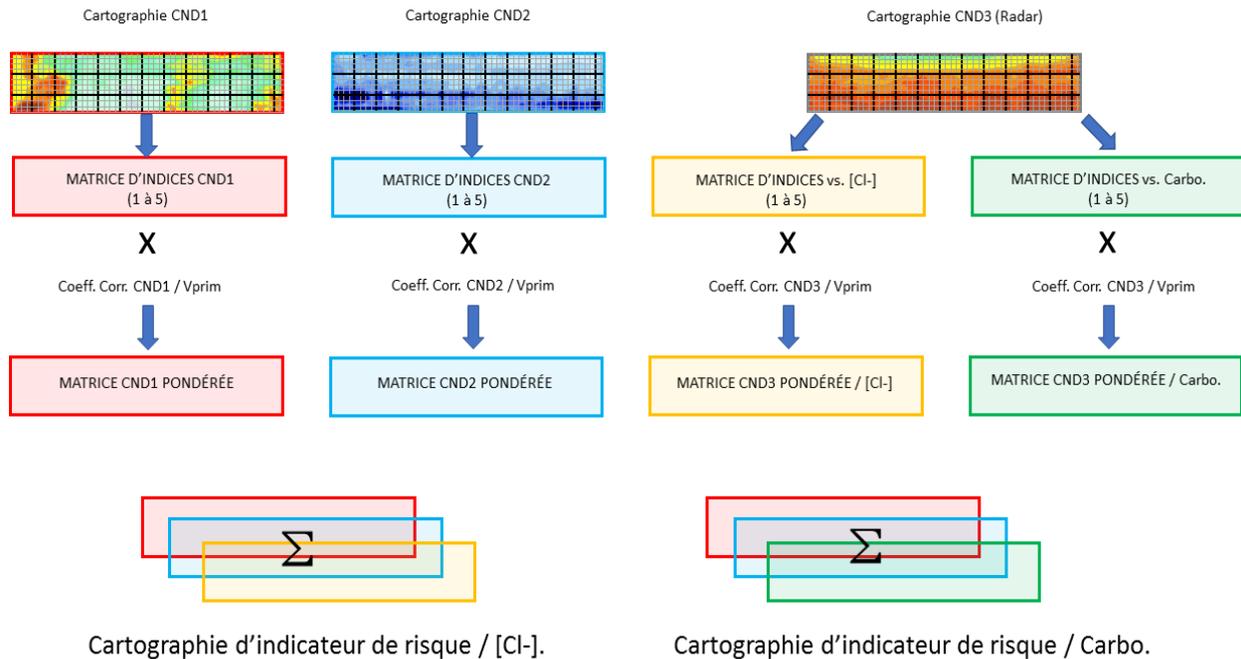


Figure 4.2 Démarche d'intégration de données par fusion de CND.

Bien que l'approche d'intégration de données par fusion de CND permette de combiner les différents résultats d'essais sur site, elle ne permet pas tirer profit de la corrélation spatiale des variables primaires faiblement échantillonnées et des variables secondaires densément échantillonnées. Le lien spatial entre ces données peut néanmoins être pris en considération en utilisant les méthodes d'intégration géostatistiques présentées dans le paragraphe suivant.

4.2.2 Méthodes d'intégrations géostatistiques

Les méthodes d'intégrations géostatistiques introduisent la notion de variables régionalisées. Les données acquises sont donc considérées comme étant reliées spatialement au moins statistiquement. Il est notamment possible de déterminer l'importance du lien spatial entre deux données en calculant leur covariance ou leur variogramme.

La Figure 4.3 présente un exemple de variogramme et les différents paramètres géostatistiques associés à savoir :

- La portée, notée a , représente la distance au-delà de laquelle deux observations ne sont plus corrélées en moyenne,
- Le palier, noté σ^2 , correspond à la variance de la variable aléatoire, soit l'écart quadratique moyen entre deux observations. À noter que la variance totale correspond généralement à la somme de la variance à grande échelle (C) et de la variance à petite échelle (C_0)
- L'effet pépité (C_0), représente les variations à très courte échelle pouvant notamment être liées à des structures ayant une portée plus petite que la distance entre les observations ou à des erreurs de mesure ou de positionnement.

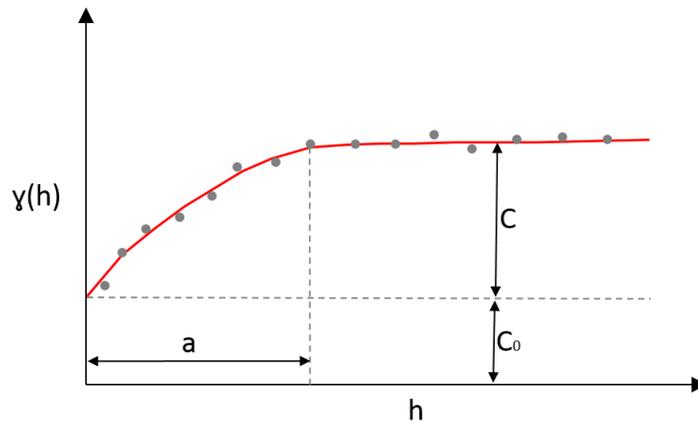


Figure 4.3 Exemple de variogramme expérimental (points gris), modèle ajusté (trait rouge) et paramètres géostatistiques.

Si un lien de corrélation peut être établi entre des données primaires et secondaires colocalisées grâce au variogramme croisé, il devient possible d'estimer la distribution spatiale des données primaires dans le champ des données secondaires. Ceci est particulièrement intéressant pour limiter les investigations primaires et les coûts associés.

4.2.2.1 Cokrigage

Une méthode couramment utilisée est le cokrigage qui permet d'interpoler la variable primaire en tout point du champ d'influence de la variable secondaire (Emery, 2012; Marcotte, 1991). Soit $Z(x)$, la variable primaire contenant n_z observations et $Y(x)$, la variable secondaire contenant n_y observations. La valeur d'un point Z_0^* calculée par cokrigage s'écrit :

$$Z_0^* = m_z + \sum_{i=1}^{n_z} \lambda_i (Z_i - m_z) + \sum_{i=1}^{n_y} \alpha_i (Y_i - m_y)$$

avec : Z_0^* : point estimé par cokrigeage (variable primaire)

m_z : moyenne des n_z observations,

m_y : moyenne des n_y observations,

λ_i : poids de krigeage de la variable primaire,

α_i : poids de krigeage de la variable secondaire.

Les poids de krigeage se déterminent à partir des équations suivantes :

$$\sum_{j=1}^{n_z} \lambda_j Cov(Z_i, Z_j) + \sum_{j=1}^{n_y} \alpha_j Cov(Z_i, Y_j) = Cov(Z_0, Z_i)$$

et

$$\sum_{j=1}^{n_z} \lambda_j Cov(Y_i, Z_j) + \sum_{j=1}^{n_y} \alpha_j Cov(Y_i, Y_j) = Cov(Z_0, Y_i).$$

Cette méthode tient compte de la covariance entre toutes les données colocalisées et a pour intérêt d'être le meilleur estimateur de la moyenne des données interpolées (au sens des moindres-carrés). Le cokrigeage permet de tenir compte de la structure spatiale des données. En revanche, il ne permet pas une estimation quantitative de l'incertitude sur les prédictions et il ne permet de tenir en compte que des variables ayant des relations linéaires (corrélations fortes) avec la variable principale.

4.2.2.2 Simulation séquentielle bayésienne

Pour s'affranchir de cette limite et fournir ainsi des éléments plus objectifs d'aide à la prise de décisions, la méthode de simulation séquentielle bayésienne (SSB) a été introduite à la fin des années 90 (Doyen & Boer, 1996). Cette méthode a été appliquée depuis à différentes problématiques dans les secteurs pétrolier, minier et de l'environnement (Blouin *et al.*, 2017; Claprood *et al.*, 2012; Dubreuil-Boisclair *et al.*, 2012; Perozzi *et al.*, 2012; Ruggeri *et al.*, 2014). Cette approche peut se résumer comme suit.

Pour un point de la grille de la variable secondaire où la variable primaire est inconnue (variable aléatoire), on peut calculer la fonction de densité de probabilité ($p(\text{prim})$) par krigeage simple. Cette fonction est une gaussienne définie par sa moyenne conditionnelle (m_c) et sa variance conditionnelle (Var_c).

Par ailleurs, on peut déterminer un noyau de vraisemblance (*kernel density estimator* en anglais) entre la variable primaire et la variable secondaire (Bowman & Foster, 1993; Silverman, 1986). À l'aide du noyau de vraisemblance, une fonction de vraisemblance ($p(sec|prim)$) peut alors être déterminée au point à simuler (la variable secondaire est connue en ce point) entre la variable primaire et la variable secondaire.

Étant donné la loi de Bayes :

$$p(prim) * p(sec|prim) \propto p((prim), (sec))$$

avec : $p(prim)$: fonction de densité de probabilité,

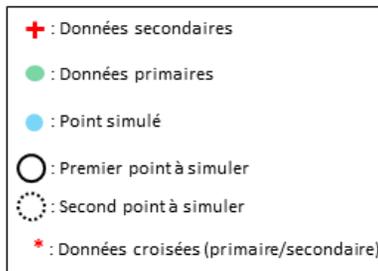
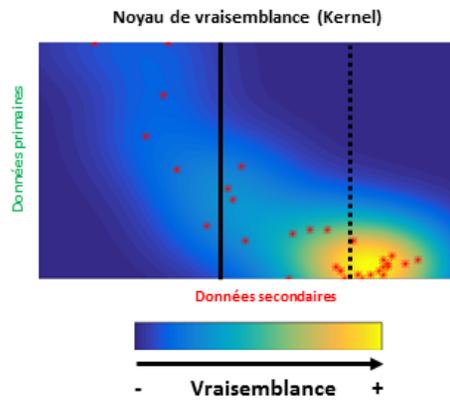
$p(sec|prim)$: fonction de vraisemblance,

$p((prim), (sec))$: fonction de probabilité conjointe des variables primaires et secondaires.

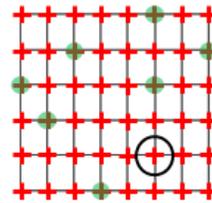
En multipliant la fonction de densité de probabilité $p(prim)$ par la fonction de vraisemblance $p(sec|prim)$, la fonction de probabilité conjointe $p((prim), (sec))$ des variables primaire et secondaire peut être déterminée.

En tirant aléatoirement une valeur dans la fonction de densité cumulative de la fonction de probabilité conjointe, une valeur de la variable primaire peut être simulée. En répétant ce processus en tout point de la grille des données secondaires en suivant un chemin aléatoire, une cartographie de la distribution spatiale de la variable primaire simulée peut être obtenue. Cette démarche correspond à une simulation. Chaque simulation reproduit la moyenne et la variance en tout point. En répétant la démarche pour plusieurs simulations (par exemple 100), on obtient 100 cartographies de la distribution spatiale de la variable primaire, dont la moyenne et la variance sont reproduites en tout point. La Figure 4.4 présente un schéma du principe de la simulation séquentielle bayésienne. À noter que la simulation séquentielle bayésienne requiert de calculer un variogramme, un noyau de vraisemblance et de mesurer la variable primaire pour chaque zone étudiée.

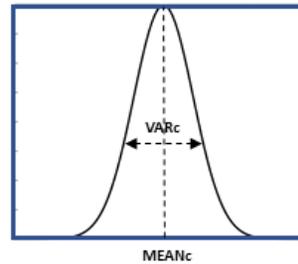
Pour une simulation



Premier point à simuler
(sélection aléatoire)

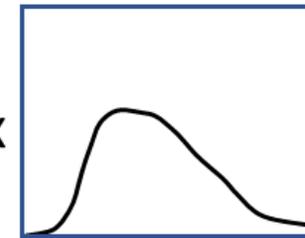


Fonction de densité de probabilité
(pdf) calculée par krigeage simple



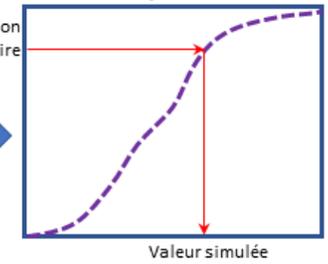
X

Fonction de vraisemblance
prim | sec

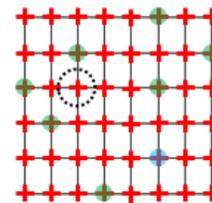


Sélection aléatoire

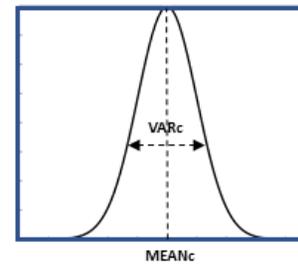
Fonction de densité cumulative
(CDF) de la fonction de probabilité
conjointe



Second point à simuler
(sélection aléatoire)

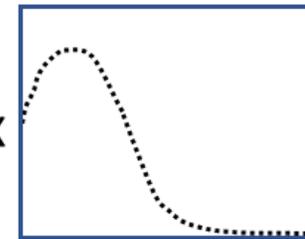


Fonction de densité de probabilité
(pdf) calculée par krigeage simple



X

Fonction de vraisemblance
prim | sec



Sélection aléatoire

Fonction de densité cumulative
(CDF) de la fonction de probabilité
conjointe

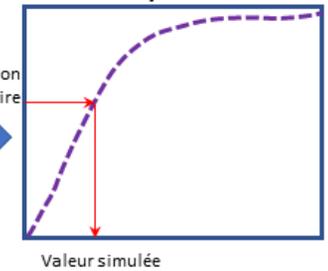


Figure 4.4 Schéma de principe de la simulation séquentielle bayésienne.

4.2.3 Apprentissage automatique

Une famille de techniques d'intégration de données très populaire de nos jours est l'apprentissage automatique ou *machine learning* en anglais. Ces techniques permettent de déterminer des relations statistiques entre une variable primaire et une ou des variables secondaires sans aucune contrainte sur les variables et leurs statistiques, à partir d'un ensemble fini de données représentatives. Les techniques présentées dans ce paragraphe sont tirées des travaux de maîtrise de Schnitzler (2017).

- Méthodes non supervisées

Dans le domaine informatique, l'apprentissage non supervisé construit un modèle qui représente les données collectées (Fischer, 2014). Cette méthode se distingue de l'apprentissage supervisé par le fait qu'il n'y a pas de données colocalisées du paramètre qu'on cherche à retrouver pour permettre à l'algorithme à calibrer ses paramètres. L'analyse se fait donc uniquement à partir des données indirectes. Un groupe hétérogène de données est divisés en sous-groupes, afin que les données considérées comme les plus similaires soient associées à un groupe homogène et qu'au contraire les données considérées comme différentes se retrouvent dans d'autres groupes distincts.

- Méthodes supervisées

L'apprentissage supervisé est une technique d'apprentissage automatique permettant de déterminer une nouvelle sortie à partir d'une entrée (variable) connaissant un ensemble de données indirectes observées et le paramètre à estimer, colocalisé à quelques endroits avec les données indirectes (Fischer, 2014). En d'autres termes, l'objectif de ces méthodes est de produire automatiquement des règles à partir d'une base de données d'apprentissage contenant des « exemples ». Parmi les méthodes supervisées, il est notamment possible de distinguer les machines à vecteurs de support (*Support Vecteur Machine* ou SVM) et les arbres de décision (*decision tree*).

- SVM

Le SVM est une méthode de séparation par hyperplans de nuages de points en maximisant la distance entre l'hyperplan et les échantillons. Cette méthode est robuste et fonctionne très bien dans le cas linéaire. Dans le cas non linéaire, les échantillons sont projetés dans un espace de plus grande dimension dans lequel il existe probablement des hyperplans optimaux. Comme la résolution de ce problème dans un formalisme mathématique strict est très coûteux en temps de

calcul, l'astuce des noyaux a été développée. Cette technique permet de faire le traitement dans l'espace d'origine et permet de faire des transformation complexes. Les inconvénients relatifs à l'utilisation de cette méthode sont la difficulté d'identifier les bonnes valeurs de paramètres, la difficulté de traiter les grandes bases ayant un nombre d'observation élevé et la difficulté d'interpréter le modèle, notamment par manque d'identification de la pertinence des variables.

- Méthode d'ensemble, la forêt aléatoire ou *Random Forest*

L'algorithme des forêts aléatoires (*Random Forest* ou RF) développé par Breiman en 2001 permet d'élaborer un modèle prédictif de données, à partir de l'analyse par arbres décisionnels de nombreuses variables (Breiman, 2001). Cet algorithme fait partie des méthodes supervisées de type arbre de décision et basé sur le concept « d'aléatoire » (« randomisation ») (Heutte *et al.*, 2008). Le RF combine le *bagging* (*bootstrap and aggregating*) et le concept de sous-espaces aléatoires. Bien que souvent associé aux arbres décisionnels, il peut être utilisé dans d'autres types de classificateurs. Essentiellement, cet algorithme découpe l'ensemble d'entraînement en sous ensemble de petites tailles. Un arbre décisionnel est créé et les données sont remises dans l'ensemble initial. L'opération est répétée un grand nombre de fois, et à la dernière étape, les arbres sont combinés afin de déterminer l'arbre optimum. Il offre une grande flexibilité dans le nombre de variables (paramètres mesurés), leur nature et le nombre d'occurrence (échantillons). Cette méthode basée sur l'intelligence artificielle, fonctionne sur le principe d'apprentissage automatique (*machine learning*).

Cette méthode d'ensemble est de plus en plus utilisée dans de nombreux domaines, notamment en exploration minière, afin de traiter de grands ensembles de données (Carranza & Laborte, 2015). N'exigeant pas de grosses ressources informatiques, ni de données ayant des attributs spécifiques, les résultats obtenus sont souvent meilleurs que d'autres techniques d'apprentissages automatiques tels que les « réseaux de neurones » ou les SVM (Rodriguez-Galiano *et al.*, 2015).

Le RF peut être utilisé pour la classification (prévoir une variable dépendante catégorielle) ou la régression (prévoir une variable dépendante continue). L'algorithme fonctionne sur le principe de forêt, constituée d'un ensemble d'arbres de prévision simples, chacun étant capable de produire une réponse lorsqu'on lui présente un sous-ensemble de variables explicatives ou prédictives. Dans le cas d'une classification, la réponse prend la forme d'une classe qui associe un ensemble (classe) de valeurs indépendantes (prédicteur) à une des catégories présente dans la variable dépendante. Pour chaque arbre (dont le nombre est arbitraire), un vote est réalisé pour la classe

la plus populaire. Dans le cas d'une régression, un arbre est une estimation de la variable dépendante en fonction des prédicteurs. Les réponses de chaque arbre sont moyennées afin d'obtenir une estimation de la variable dépendante. En utilisant des ensembles d'arbres, il est possible d'améliorer significativement la prévision, donc avoir une meilleure capacité à prévoir de nouvelles données.

Le nombre d'arbres de décision qu'il faut utiliser pour construire une forêt n'est pas défini, ni documenté. Breiman (2001), puis Latine *et al.* (2001) et Bernard *et al.* (2007) démontrent qu'au-delà d'un certain nombre d'arbres, en ajouter d'autres ne permet pas systématiquement d'améliorer les performances de l'ensemble. De même, le nombre d'arbres ne doit pas nécessairement être le plus grand possible pour produire une prédiction ou un classificateur performant.

La variable à prédire est calculée par un algorithme RF de régression, à partir de deux ensembles de données (1) l'ensemble d'entraînement (*training set*) et (2) l'ensemble de validation (*validation set*). Le premier est un sous-ensemble du jeu de données total, où l'ensemble des variables (mesurées et à prédire) sont connues et utilisés par l'algorithme pour définir le lien statistique entre la variable à prédire et les variables secondaires. La seconde comprend les données sur lesquelles la prédiction est faite afin de valider le pouvoir prédictif du RF entraîné. La procédure de randomisation est importante pour l'efficacité du RF. Elle se traduit par la fonction de « *bootstrap aggregation* ». Chaque arbre de décision traite un sous-ensemble choisi au hasard dans l'ensemble d'entraînement (environ 2/3) et utilise les données restantes (1/3) pour évaluer la précision de la prévision (Breiman, 1996). L'utilisation de cette fonction permet de diminuer la variance des données, améliorant ainsi la prévisibilité de la variable.

Il devient ainsi possible, à partir de nouvelles données de prédiction acquises sur un nouveau site, de déterminer les valeurs de la variable de réponse à partir de l'arbre de décision construit au préalable. La base de données utilisée dans le cadre de cette étude comprend une dizaine de site sur lesquels des mesures de CND, de vitesse de corrosion et de carbonatation ont été réalisées, et constitue un formidable ensemble d'entraînement.

4.3 Exemple d'application des méthodes d'intégration de données

4.3.1 Présentation du site d'étude et des données acquises

Une campagne de mesures par CND a été réalisée sur un ouvrage en béton armé situé entre Genève (Suisse) et Chamonix (France) sur l'autoroute du tunnel du Mont Blanc (ATMB) dans les Alpes françaises. Cet ouvrage est un passage inférieur de 25 m de long et d'environ 3 m de haut. Des CND à grand rendement (radar, capacimétrie, potentiel de corrosion) ont été réalisés sur la demi-traverse Nord de l'ouvrage, dans le sens de circulation Genève → Chamonix. Les mesures ont été acquises sur une surface de 12.5 m par 2.5 m selon un maillage de 25 x 25 cm. La Figure 4.5 présente un schéma de localisation de la zone d'étude.

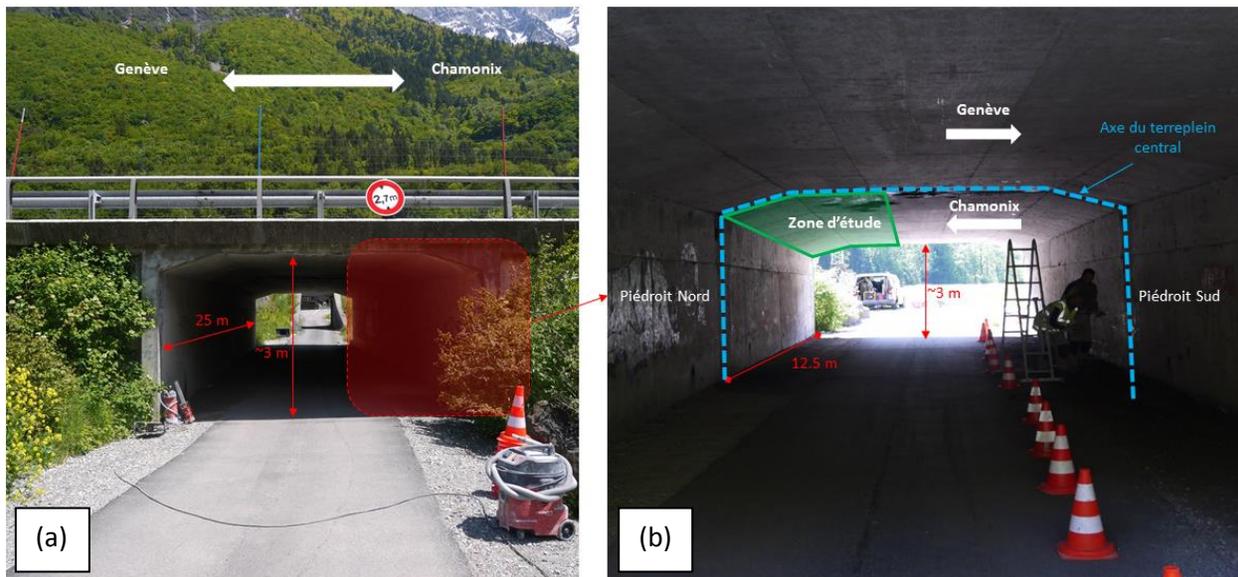


Figure 4.5 Caractéristiques géométriques de l'ouvrage (a) et emprise de la zone d'étude (b - en vert).

Les Figure 4.6, Figure 4.7 et Figure 4.8 présentent respectivement la cartographie d'enrobage obtenu par radar, la cartographie d'humidité superficielle obtenu par capacimétrie et la cartographie du potentiel de corrosion. Celles-ci sont reportées sur un modèle photogrammétrique 3D de la zone d'étude.

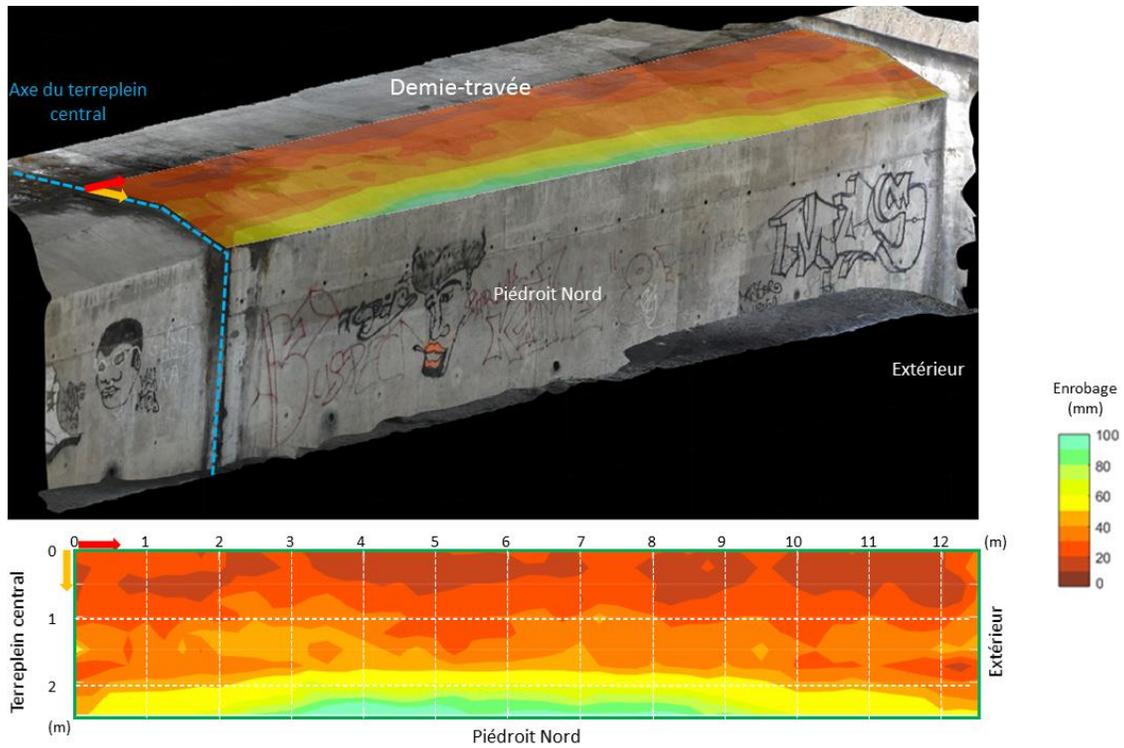


Figure 4.6 Cartographie d'enrobage et report sur le modèle photogrammétrique 3D.

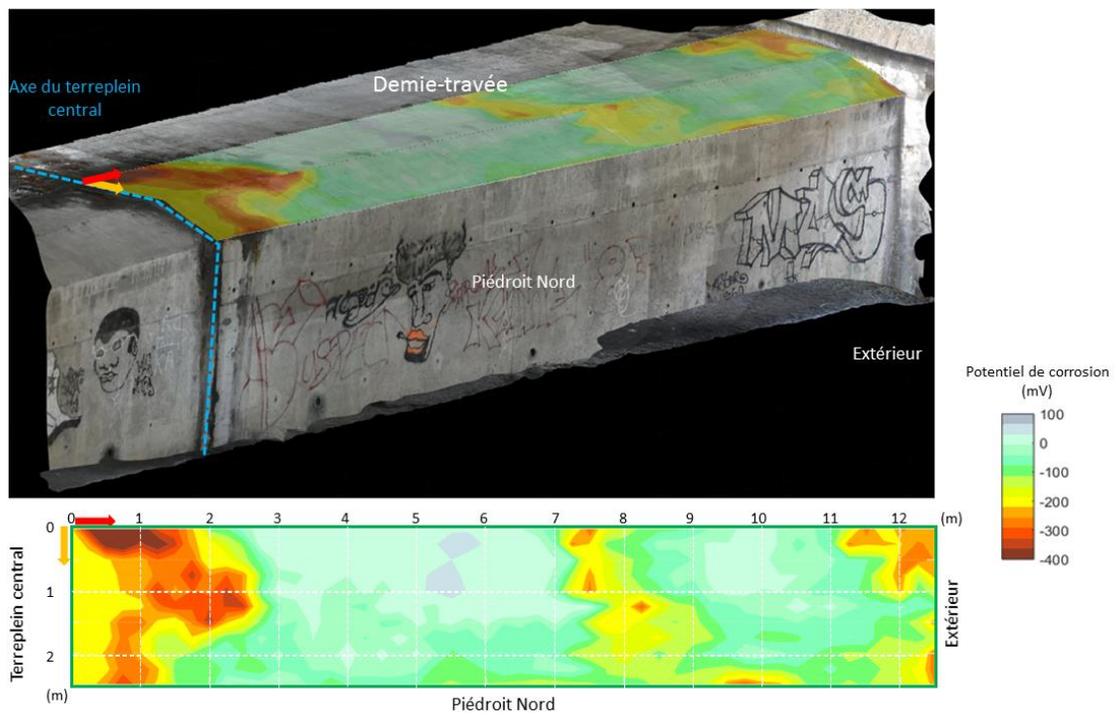


Figure 4.7 Cartographie du potentiel de corrosion et report sur le modèle photogrammétrique 3D.

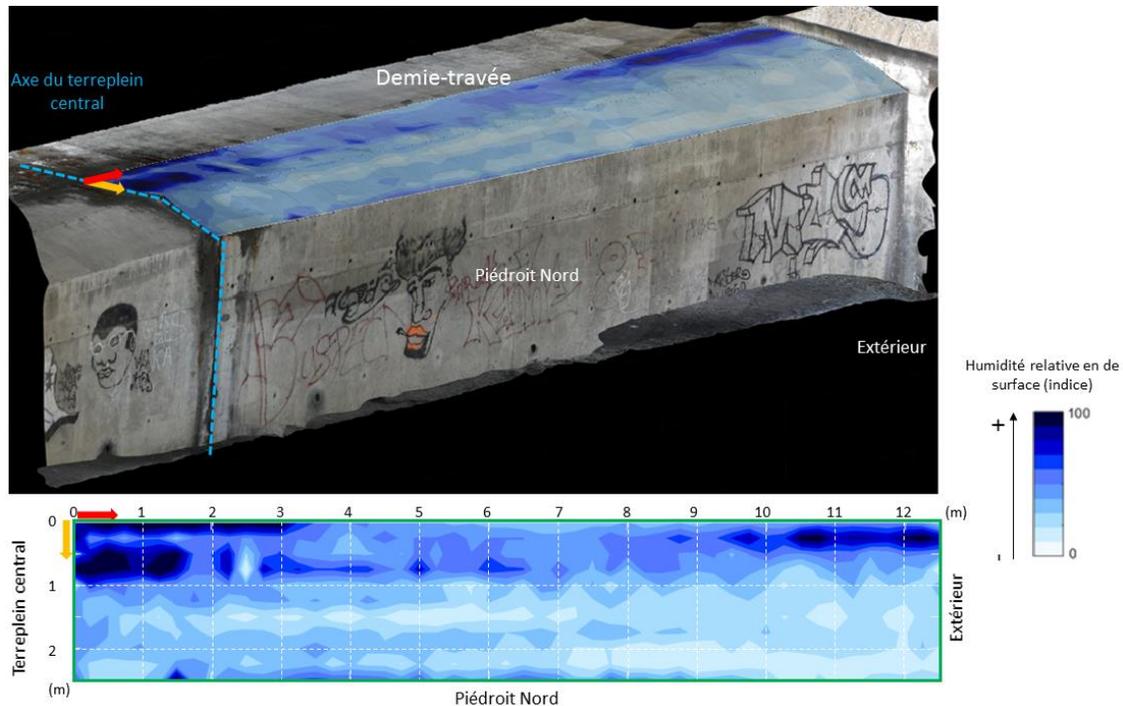


Figure 4.8 Cartographie d'humidité superficielle relative et report sur le modèle photogrammétrique 3D.

La cartographie radar indique des variations d'épaisseur d'enrobage. À proximité du piédroit, les épaisseurs d'enrobage sont importantes. En s'éloignant du piédroit, des zones de sous enrobage sont observées sur la traverse. La cartographie d'humidité relative de surface indique des zones plus humides dans les zones les moins enrobés ce qui indique un environnement favorable au développement de la corrosion. La cartographie de potentiel confirme cette information avec des potentiels électronégatifs importants mis en évidence à proximité du terre-plein central et vers l'extérieur. À noter qu'une zone présentant des potentiels électronégatifs est également mise en évidence dans la portion droite de la traverse.

Trente (30) mesures ponctuelles de la vitesse de corrosion (V_{cor}) ont également été réalisées à l'aide d'une nouvelle sonde développées dans le cadre du projet DIAMOND (Samson *et al.*, 2018) tel que présenté sur le schéma d'implantation 3D présenté sur la Figure 4.9. L'implantation d'un prélèvement utilisé pour la réalisation d'analyses en laboratoire est aussi reporté sur la Figure 4.9.

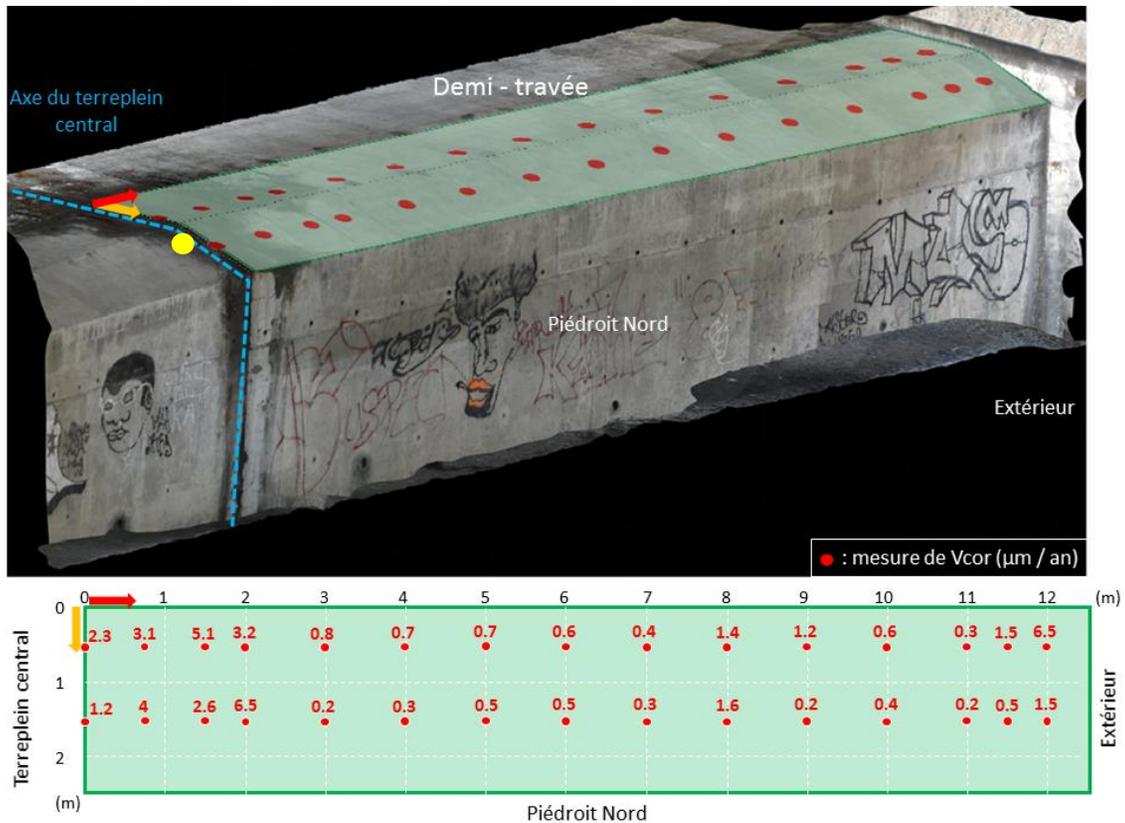


Figure 4.9 Implantation (points rouges) et valeurs des mesures de vitesse de corrosion (en $\mu\text{m}/\text{an}$) et du prélèvement (point jaune) reporté sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté.

Le Tableau 4.2 présente les coefficients de corrélation pour les mesures CND à grand rendement colocalisées avec les mesures de vitesse de corrosion (V_{cor}). En complément, la profondeur de carbonatation et la teneur en chlorures ont été déterminés en laboratoire au niveau du prélèvement matérialisé par un point jaune sur la Figure 4.9. La profondeur de carbonatation varie entre 5 et 10 mm dans la zone.

Le profil de teneur en chlorure libre est présenté sur la Figure 4.10. À noter que le seuil limite de 0.4% est atteint à une profondeur d'environ 47 mm. Finalement, le Tableau 4.3 synthétise les principales caractéristiques des mesure réalisées sur l'ouvrage.

Tableau 4.2 Coefficient de corrélation entre les valeurs de CND à grand rendement et de V_{cor} .

Paramètres	Coefficient de corrélation
Potentiel de corrosion/ V_{cor}	-0.8706
Capacimétrie/ V_{cor}	0.3651
Enrobage/ V_{cor}	-0.1983

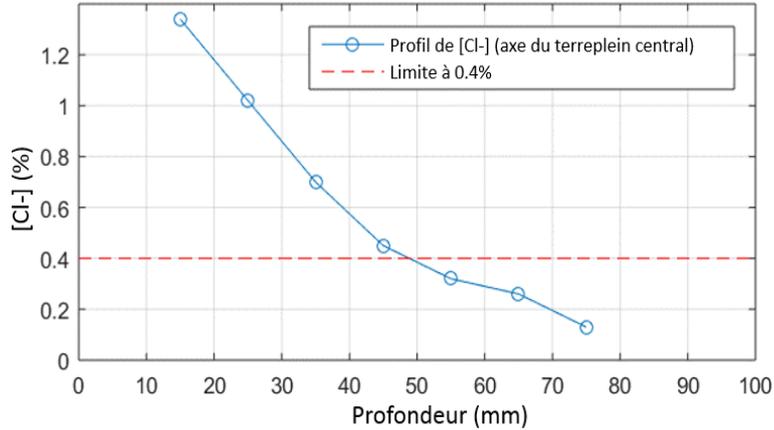


Figure 4.10 Profil des teneurs en chlorures libres mesurées à proximité de l'axe du terre-plein central.

Tableau 4.3 Synthèse des principales caractéristiques des mesures réalisées sur l'ouvrage.

Moyens mis en œuvre	CND à grand rendement			CND ponctuel	Analyses en laboratoire	
	Radar	Capacimétrie	Potentiel de corrosion	Vitesse de corrosion	Chlorures	Carbonatation
Caractéristiques	Cartographie : 12.5x2.5 m Échantillonnage : 25x25 cm			30 points colocalisés avec les mesures de CND à grand rendement	Profil 7 points	Mesure après aspersion du béton avec une solution de phénolphaléine

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Fusion de CND

La Figure 4.11 et la Figure 4.12 présentent respectivement les résultats obtenus par fusion de CND par rapport au front de carbonatation et par rapport au front d'infiltration des chlorures. À partir de ces cartographies, chaque classe d'indicateur de risque (cf. paragraphe 4.2.1) peut être exprimée en m² et en pourcentage de la surface totale investiguée tel que présenté dans le Tableau 4.4.

La Figure 4.11 met en évidence une zone pouvant être attribuée à un risque modéré à élevé, localisée à proximité de l'axe du terre-plein central et une zone correspondant à un risque modéré localisée à proximité de l'extérieur de l'ouvrage. Le reste de la zone d'étude présente un risque négligeable. Ces deux zones sont également mises en évidence sur la Figure 4.12. La superficie couverte par ces zones est cependant plus vaste et une partie plus importante est classée en risque élevé. Au centre de la zone d'étude, une autre zone correspondant à un risque modéré est mise en évidence.

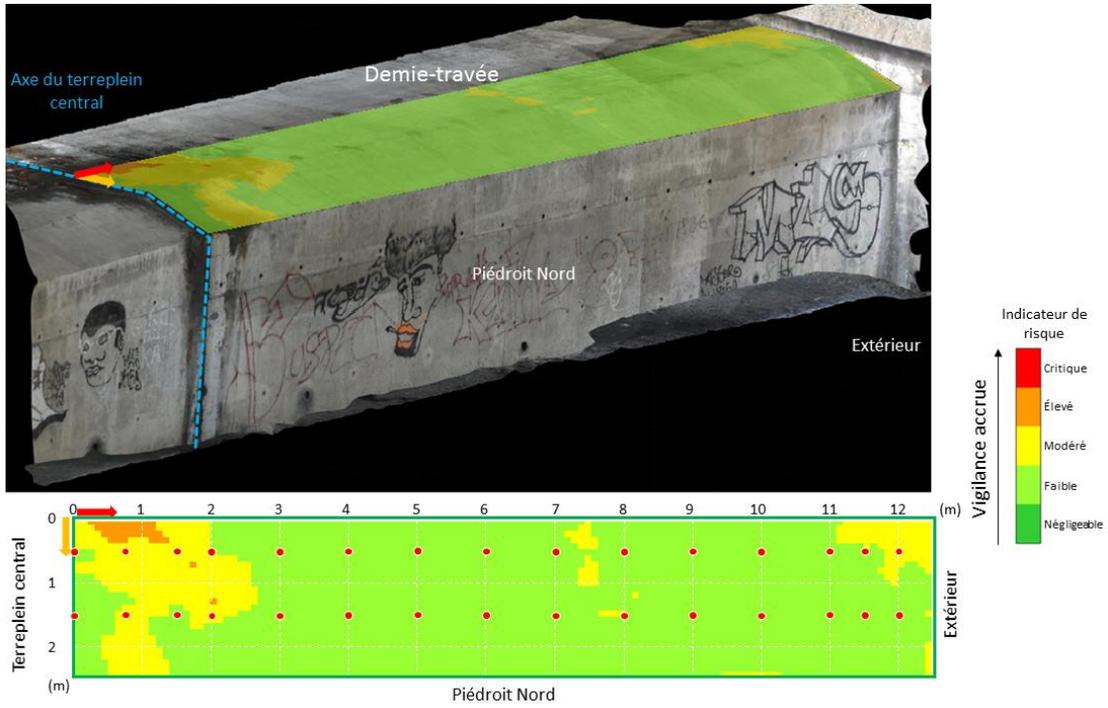


Figure 4.11 Indicateur de risque obtenu par fusion de CND par rapport à la carbonatation et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge= mesure de V_{cor}).

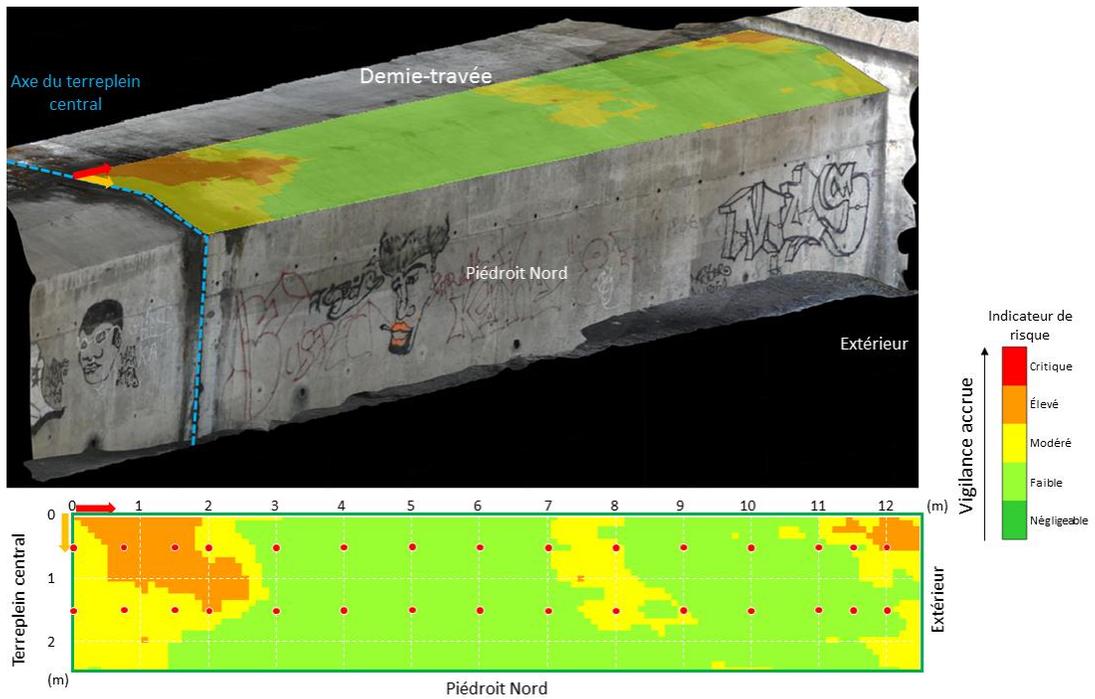


Figure 4.12 Indicateur de risque obtenu par fusion de CND par rapport aux agressions par les ions chlorures et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge= mesure de V_{cor}).

Tableau 4.4 Synthèse de la fusion de CND par rapport à la taille de la zone d'étude.

Risque / Vigilance	Surface impactée (m ²) /Surface totale		Surface (%)	
	Carbonatation	[Cl ⁻]	Carbonatation	[Cl ⁻]
Négligeable	-	-	-	-
Faible	25.94	2.17	83	69.5
Modéré	5	6.9	16	22
Élevé	0.31	2.65	1	8.5
Critique	-	-	-	-

4.3.2.2 Cokrigéage

La Figure 4.13 présente la distribution spatiale de la vitesse de corrosion (V_{cor}) obtenue par cokrigéage avec les données ponctuelles de V_{cor} et de potentiel de corrosion (cf. Figure 4.7) et le report des résultats sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté. Les zones à risque modéré à élevé mises en évidence sur les figures précédentes peuvent être corrélées aux zones où la vitesse de corrosion est la plus importante (environ 3 à 7 $\mu\text{m}/\text{an}$). À noter qu'aux points de mesures de la vitesse de corrosion (points rouges), les valeurs cokrigées correspondent aux valeurs mesurées (résultante intrinsèque du cokrigéage).

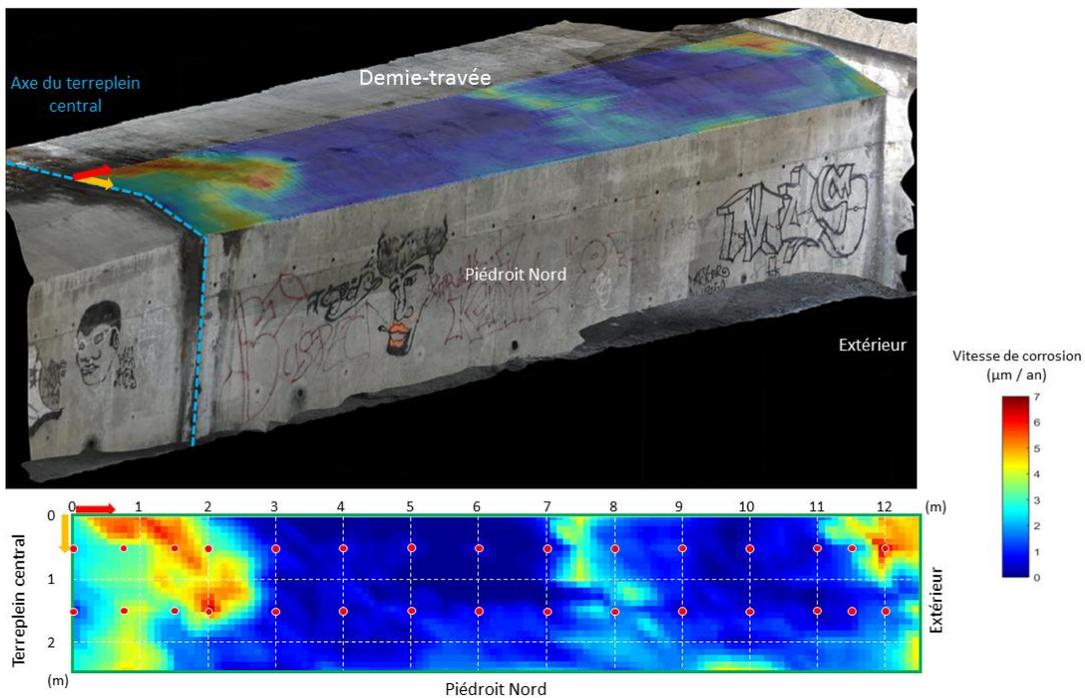


Figure 4.13 Cartographie de V_{cor} obtenue par cokrigéage et report sur le modèle photogrammétrique 3D (point rouge = mesure de V_{cor}).

4.3.2.3 Simulation séquentielle bayésienne

La Figure 4.14 présente les cartographies de probabilité que la vitesse de corrosion soit respectivement supérieure à 1, 2, 3, 4, 5 et 6 $\mu\text{m}/\text{an}$, obtenues par simulation séquentielle bayésienne à partir des données de vitesse de corrosion et des données de potentiel de corrosion (cf. Figure 4.7). En complément, la Figure 4.15 présente la cartographie d'écart type des données simulées par SSB. La distribution spatiale des vitesses de corrosion est sensiblement similaire à celle obtenue par cokrigeage (cf. Figure 4.13). De plus, ces simulations permettent d'apprécier les résultats sous forme de seuils de vitesse de corrosion et de tenir compte de l'incertitude associée aux données.

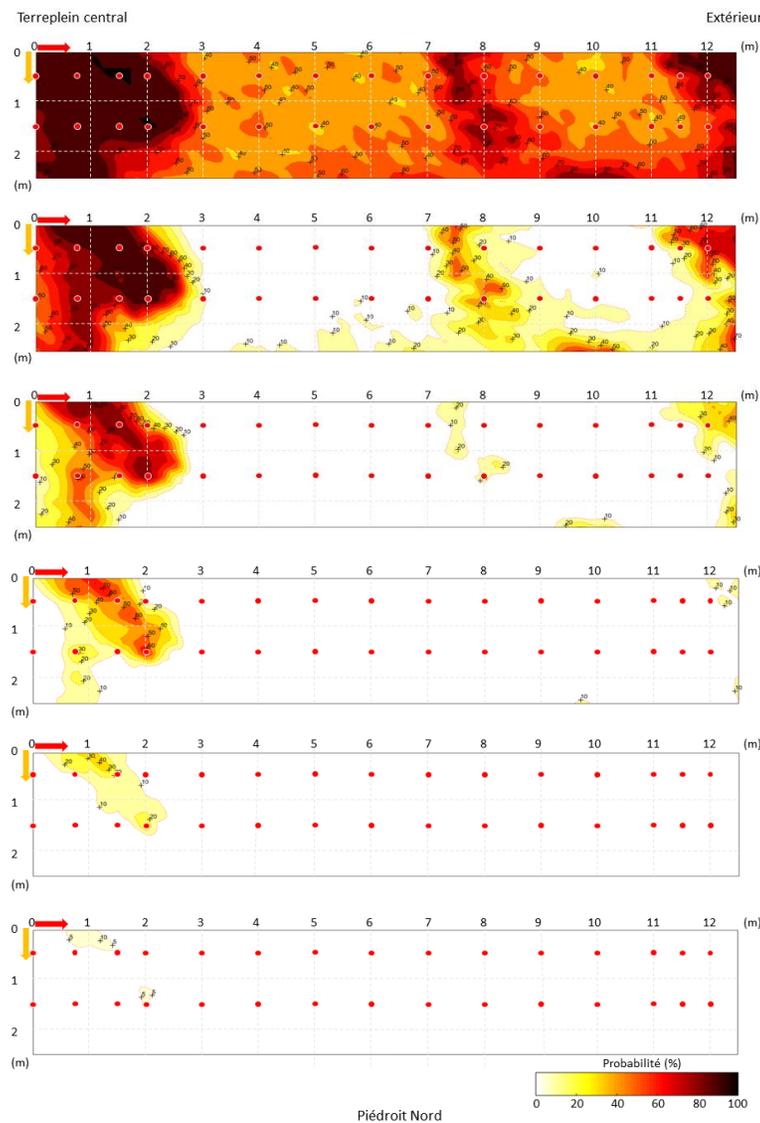


Figure 4.14 Du haut ver le bas – cartographies de probabilité que V_{cor} soit supérieure à 1,2,3,4,5 et 6 $\mu\text{m}/\text{an}$ obtenue par simulation séquentielle (point rouge = mesure de V_{cor}).

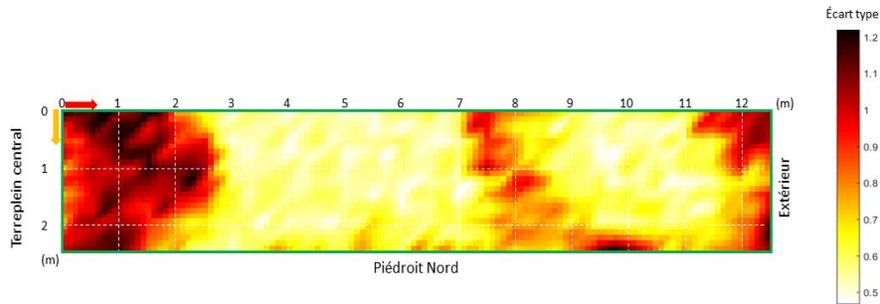


Figure 4.15 Écart type des données simulées par SSB.

À titre d'exemple, la Figure 4.16 présente la cartographie de probabilité que la vitesse de corrosion soit supérieure à $3 \mu\text{m}/\text{an}$, reportée sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté.

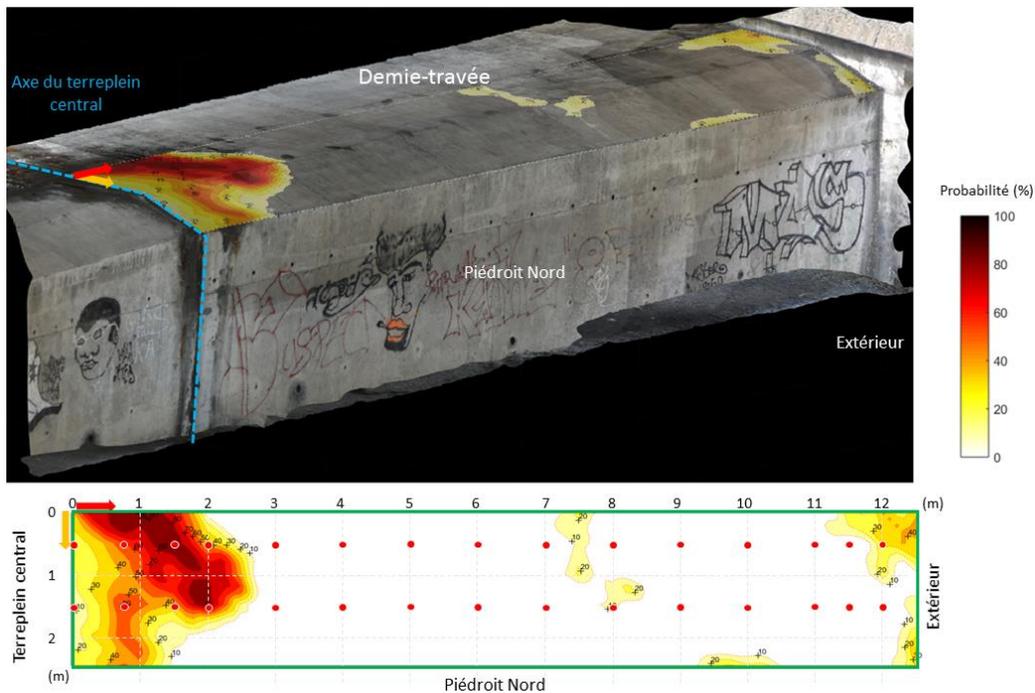


Figure 4.16 Exemple de cartographie de probabilité que la vitesse de corrosion soit supérieure à $3 \mu\text{m}/\text{an}$ obtenue par simulation séquentielle bayésienne, reportée sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté.

4.3.2.4 Arbre de décision (apprentissage supervisé)

La Figure 4.17 présente la cartographie de la vitesse de corrosion obtenue par arbre de décision (apprentissage supervisé) et le report des résultats sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté. La base de données d'apprentissage comporte plus de 150 valeurs de V_{cor} , auxquelles sont associés des valeurs de potentiel de corrosion, d'enrobage, de capacimétrie et de profondeur de carbonatation. Ces données d'apprentissage ont été acquises sur une dizaine d'ouvrages différents, indépendamment de l'ouvrage ausculté.

En terme qualitatif, cette cartographie de vitesse de corrosion reproduit globalement les anomalies mise en évidence par cokrigeage et par simulation séquentielle bayésienne (cf. Figure 4.13 et Figure 4.14). En terme quantitatif, les résultats estimés par l'arbre de décision sont comparés avec les 30 points de vitesse de corrosion mesurés sur l'ouvrage tel que présenté sur la Figure 4.18. À noter que les principales tendances et les ordres de grandeurs sont conservés.

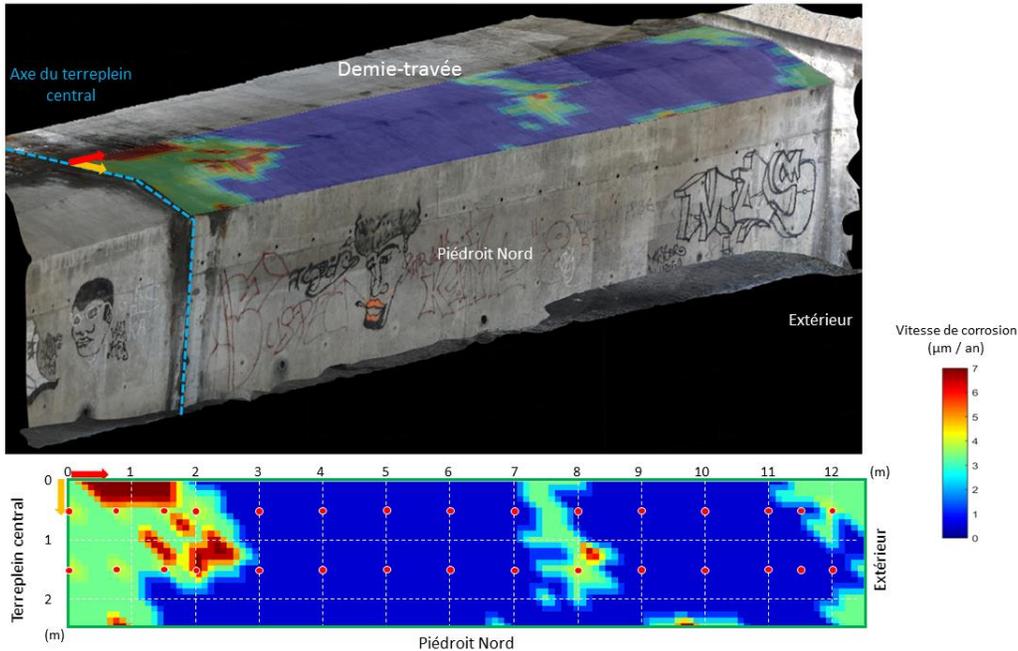


Figure 4.17 Cartographie de V_{cor} obtenue par arbre de décision (apprentissage supervisé) et report sur le modèle photogrammétrique 3D de l'ouvrage ausculté (point rouge=mesure de V_{cor}).

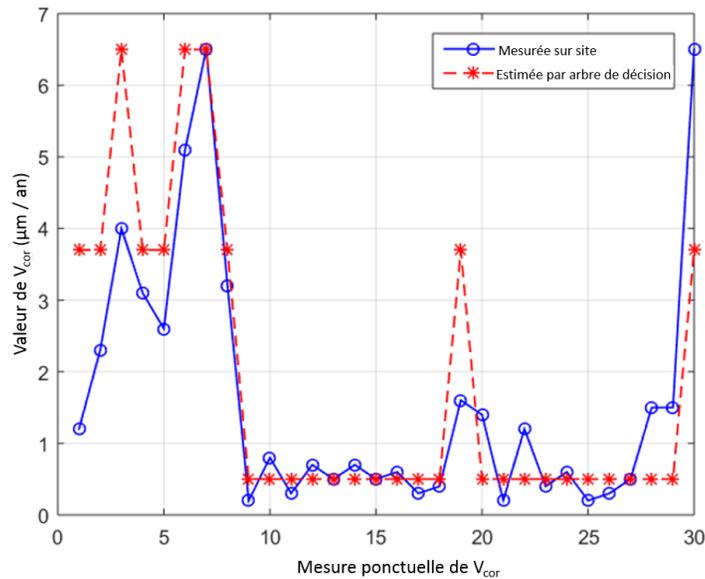


Figure 4.18 Comparaison entre les mesures de vitesse de corrosion acquises et les données estimées par arbre de décision.

4.3.3 Discussion

Les quatre méthodes d'intégration de données utilisées sur l'exemple d'ouvrage étudié reproduisent globalement les mêmes tendances, à savoir une anomalie localisée à proximité de l'axe du terre-plein central et une anomalie localisée à proximité de l'extérieur du passage inférieur. Ces techniques offrent cependant différentes approches permettant d'aider au diagnostic des ouvrages du génie civil sous différents angles.

La fusion de CND a permis d'apprécier globalement l'état de la structure auscultée en offrant un rendu sous forme de cartographies indicatrices de risques. Cette méthode a permis de tenir compte de tous les CND acquis dans la zone d'étude et des deux principaux phénomènes à l'origine du phénomène de corrosion (diffusion des ions chlorures et carbonatation). La gradation du risque doit être interprété en termes de vigilance vis-à-vis de la maintenance de l'ouvrage par rapport au phénomène de corrosion. Un risque négligeable ou faible ne nécessitera pas de vigilance particulière à court ou moyen terme. Un risque modéré nécessitera une vigilance à moyen terme avec possibilité de suivi temporel ou d'inspections complémentaires. Un risque élevé nécessitera un suivi à court terme avec la possible réalisation de travaux de réparation. Un risque critique nécessitera la réalisation de travaux. Ce type d'intégration par fusion de CND peut aider le gestionnaire d'ouvrage à définir un plan de maintenance préventive et servir de guide pour prioriser les zones de travaux en contribuant à quantifier les coûts associés aux surfaces à réparer. Les principales limites liées à la fusion de CDN est la classification des seuils utilisés pour définir les indices de risques et l'hypothèse simplificatrice concernant la planéité des fronts d'infiltration des ions chlorures et de carbonatation.

Le cokrigeage et la simulation séquentielle bayésienne ont été utilisés pour caractériser la distribution spatiale de la vitesse de corrosion (variable primaire faiblement échantillonnée) en tenant compte du lien spatial qui la relie au potentiel de corrosion (variable secondaire densément échantillonnée). Le cokrigeage a permis de produire une cartographie interpolée de la vitesse de corrosion dans le champ des données de potentiel de corrosion. La principale limite du cokrigeage est de ne pas rendre compte de l'incertitude des données de vitesse de corrosion.

La simulation séquentielle bayésienne a permis d'exploiter les résultats en terme probabiliste en produisant plusieurs cartographies de probabilité de dépassement de seuil de vitesse de corrosion. Cette seconde approche permet également de tenir compte de l'incertitude des données et offre ainsi au gestionnaire d'ouvrage un outil d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste.

La mise en œuvre de ces deux méthodes géostatistique est cependant tributaire du coefficient de corrélation entre la variable primaire et la variable secondaire (la valeur absolue du coefficient de corrélation doit être d'au moins 0.6) et nécessite suffisamment de points de la variable primaire pour modéliser le lien spatial (variogramme). À noter que dans cet exemple, les 30 points de vitesses de corrosion répartis sur une zone de 31 m² ont permis d'établir un lien spatial suffisant pour pouvoir modéliser le variogramme. Par ailleurs, étant donné les coefficients de corrélation présentés dans le Tableau 4.2, seules les mesures de potentiel de corrosion ont été retenues pour intégrer les données de vitesse de corrosion.

L'apprentissage supervisé par arbre de décision a permis de produire une cartographie de la distribution spatiale de la vitesse de corrosion en tenant uniquement compte d'une base de données d'apprentissage construite à partir de mesures provenant d'autres sites (vitesse de corrosion, enrobage, potentiel de corrosion, humidité relative, profondeur de carbonatation). En utilisant une base de données d'apprentissage composée d'environ 150 points de mesures colocalisés acquises sur différents ouvrages, un arbre de décision a pu être modélisé par régression. À partir de cet arbre de décision, la vitesse de corrosion a pu être estimée dans toute la zone d'étude. Les valeurs obtenues donnent des ordres de grandeurs et des tendances similaires au droit des points où les mesures de vitesse de corrosion ont été acquises. D'autre part, les résultats sont globalement similaires à ceux obtenus par les autres méthodes d'intégrations présentées. Ceci met en évidence le caractère prometteur des méthodes d'intelligence artificielle dans le cadre du diagnostic des ouvrages du génie civil. Il semblerait intéressant de continuer d'alimenter la base de données d'apprentissage à partir de nouvelles acquisitions et de modéliser un nouvel arbre de décision permettant d'estimer de nouvelles valeurs de vitesse de corrosion, ceci dans le but d'évaluer si les données estimées convergent vers les données réelles au fur et à mesure que la base de données est enrichie.

Le Tableau 4.5 récapitule les avantages, limitation et utilisation préférentielle des quatre méthodes d'intégration de données présentées.

Tableau 4.5 Synthèse des principales caractéristiques des techniques d'intégration de données utilisées.

	Données intégrées	Avantages	Limitations	Utilisation préférentielle
Fusion de CND	Enrobage, potentiel de corrosion, humidité, V_{cor} , front d'infiltration des Cl- et front de carbonatation	Simplicité de mise en œuvre. Considère de nombreux paramètres	Les seuils définissant les indices de risques sont relativement subjectifs.	Production de cartographies d'indicateur de risque globaux par rapport au front d'infiltration des Cl- et/ou du front de carbonatation
Cokrigeage	V_{cor} + potentiel de corrosion	Considère le lien spatial entre les données	Requiert suffisamment de données de V_{cor} pour modéliser le variogramme Uniquement deux variables Ne rend pas compte de l'incertitude des données	Production d'une cartographie des valeurs de V_{cor} interpolées dans le champ des données de potentiel
SSB	V_{cor} + potentiel de corrosion	Considère le lien spatial et l'incertitude associée aux données	Requiert suffisamment de données de V_{cor} pour modéliser le variogramme Plus coûteux en ressources de calcul	Production de cartographie de probabilité des niveaux de V_{cor}
Arbre de décision	Enrobage, potentiel de corrosion, humidité, V_{cor} , front d'infiltration des Cl- et front de carbonatation	Ne nécessite aucune prise de mesure de V_{cor}	Nécessite une base de données d'apprentissage la plus vaste possible. Stabilité du modèle de prédiction (arbre de décision)	Production d'une cartographie de V_{cor} sur des sites ne permettant pas la prise de mesure de V_{cor} (zone difficile d'accès, durée d'intervention limitée, etc.)

4.4 Conclusions

Quatre méthodes d'intégrations de données ont été utilisées sur un ouvrage situé sur l'autoroute du tunnel du Mont Blanc (France). Ces méthodes ont permis de mettre en évidence une complémentarité des approches permettant de fiabiliser le diagnostic des ouvrages du génie civil.

La fusion de CND est un outil intégrateur global permettant de fournir des cartographies indicatrices du niveau de vigilance à apporter dans le cadre de la maintenance des structures. Le cokrigeage peut être utile pour interpoler les mesures ponctuelles de vitesse de corrosion dans le champ d'une mesure de CND à grand rendement (potentiel de corrosion dans ce cas) à condition qu'un lien de corrélation spatial suffisant puisse être mis en évidence. La simulation séquentielle bayésienne peut être utilisée dans les mêmes conditions que le cokrigeage mais offre l'avantage de donner accès aux valeurs de vitesses de corrosion en terme probabiliste en établissant des seuils et en tenant compte de l'incertitude associée. Finalement, le test effectué par arbre de décision a permis de mettre en lumière l'intérêt d'une méthode d'apprentissage superficiel pour

déterminer rapidement des valeurs de vitesses de corrosions cohérentes avec la réalité, en tenant uniquement compte de données acquises sur d'autres ouvrages et donc sans même réaliser de mesures de cette variable dans la zone d'étude.

En fonction des objectifs et du rendu souhaité (carte de niveaux de vigilance, interpolation d'une variable faiblement échantillonnée, probabilité de dépassement de seuils d'une variable, estimation d'une variable non échantillonnée à partir d'une base de données) ces différentes techniques d'intégrations peuvent être des outils pertinents et complémentaires d'aide à la décision pour la maintenance des ouvrages du génie civil.

Ces quatre méthodes d'intégrations sont incluses dans le système d'exploitation présenté dans le chapitre suivant, permettant non seulement d'intégrer des données multi-échelles et multivariées mais également de représenter ces données sur plusieurs supports numériques réalistes de la structure auscultée afin de faciliter leurs exploitations et d'accroître leurs représentativités.

5 SYSTÈME D'EXPLOITATION DÉVELOPPÉ

Les chapitres précédents ont montré qu'il existe différents moyens de caractérisation des pathologies des ouvrages générant d'importants jeux de données dont les paramètres et les échelles de représentation sont variables dans l'espace et le temps (Chapitre 2). Bien qu'il existe quelques outils de traitement des résultats et de modélisation des structures, chacun d'eux présente des limitations quant à une approche globale et intégrée de diagnostic d'un ouvrage. Dans ce contexte, différents développements méthodologiques et algorithmiques ont été réalisés de manière à exploiter les données acquises, tant sur le plan de leur visualisation (chapitre 3) que sur le plan de leur intégration (Chapitre 4).

Étant donné la diversité des sources d'information et des supports de représentation, un système d'exploitation numérique a été créé, sous la forme d'un logiciel nommé *Datae*. Il est composé de quatre interfaces graphiques permettant respectivement d'exploiter les données dans le temps (interface *monitoring*), en plan (interface 2D), dans l'espace (interface 3D) et les données d'instrumentation (interface courburemétrie). Chacune de ces interfaces présente des spécificités propres et a nécessité le développement de fonctionnalités distinctes permettant d'interagir avec les données, de les traiter et de les représenter afin de faciliter et d'améliorer leurs exploitations.

Ce chapitre propose d'abord une présentation générale de l'architecture du système d'exploitation *Datae* en mettant l'accent sur la typologie des données d'entrée. Pour chaque interface, les fonctionnalités spécifiquement développées et des exemples d'utilisation sont ensuite présentés. Les gains générés par l'utilisation de ces interfaces sont finalement discutés.

5.1 Présentation générale du système d'exploitation

5.1.1 Considérations techniques

Pour le développement du système d'exploitation, l'environnement Matlab® a été choisi pour plusieurs raisons. Cet outil de développement logiciel compact est pertinent pour sa rapidité d'exécution, sa stabilité et sa flexibilité. Il permet de gérer les calculs scientifiques autant que l'affichage graphique de séries temporelles ainsi que l'affichage de données en 2D et en 3D. Il offre également la possibilité de créer des interfaces graphiques, des exécutable autonomes et propose de nombreuses fonctions et supports d'aide et de documentation. En date de rédaction de cette thèse, le système d'exploitation développé nécessite, à minima, la version d'OpenGL® 2.1 ou supérieure pour un affichage graphique fluide des représentations 3D.

5.1.2 Architecture modulaire

Le système d'exploitation *Datae* est conçu selon une architecture modulaire composée de quatre interfaces graphiques permettant d'exploiter indépendamment ou conjointement les différents types de données acquises.

Le premier module, nommé *Datae Monitoring*, est une interface permettant de visualiser, de traiter et d'exploiter les données provenant de capteurs de monitoring placés à demeure sur les ouvrages et fournissant des données en continu sous forme de séries temporelles.

Le second module interfacé, nommé *Datae 2D Map*, utilise un cliché photographique comme support de représentation des données. Cette image peut être alimentée de façon interactive (cf. Chapitre 3) et évolutive par les différents types de données acquises dans une zone d'étude (cf. Chapitre 2). Différents types de traitements et d'intégrations de données (cf. Chapitre 4) peuvent par ailleurs être réalisés dans ce module.

Dans le troisième module, nommé *Datae 3D map*, le support de représentation des données est une enveloppe texturée ou un nuage de point 3D (cf. Chapitre 3). Ce module est une extension de la version de *Datae 2D map* en ce qui a trait à l'interaction et l'enrichissement du modèle.

En marge de ces trois interfaces, un quatrième module, nommé *Datae Courburemétrie*, permet de faciliter l'exploitation des données d'instrumentation provenant des mesures acquises sur les ouvrages en béton précontraint.

La Figure 5.1 synthétise l'architecture générale du système d'exploitation *Datae* ainsi que l'utilisation préférentielle et les liens existants entre chaque interface.

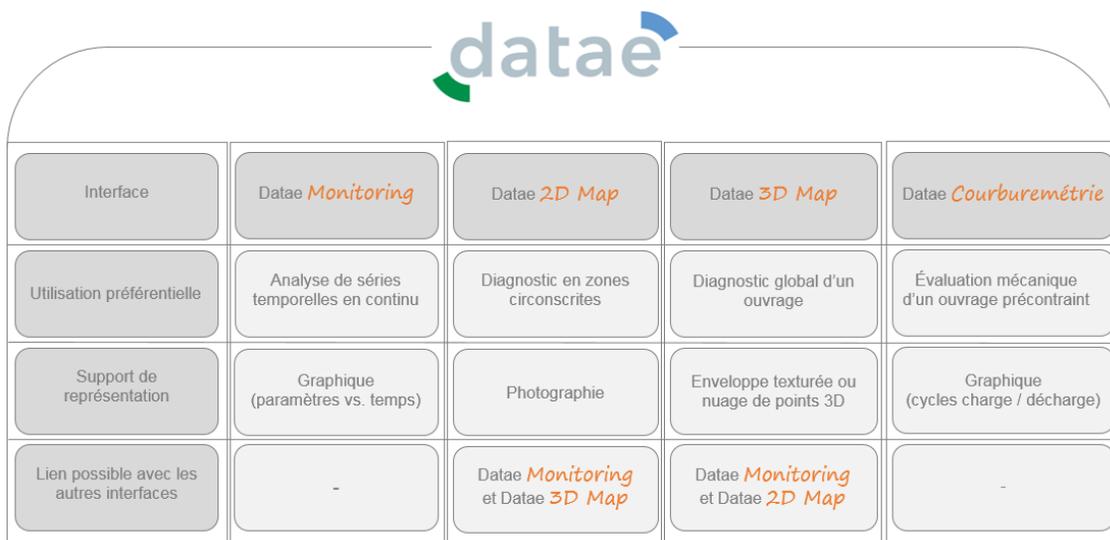


Figure 5.1 Présentation générale des différentes interfaces du système d'exploitation *Datae*.

L'intérêt d'utiliser une architecture modulaire est triple. Ceci permet d'une part d'améliorer l'ergonomie et le caractère intuitif des interfaces en évitant de les surcharger. D'autre part, ceci permet d'utiliser ces différentes interfaces comme des entités propres ou complémentaires en fonction de la problématique et des données disponibles. Enfin, ceci ouvre la porte à des possibilités d'extensions, en ajoutant de nouveaux modules spécifiquement dédiés à certaines utilisations connexes (exploitation des données d'arbalète par exemple).

Lorsque le diagnostic met en jeu d'importants volumes de données multi-échelles et multivariées, *Datae* offre également des passerelles entre les différentes interfaces. À titre d'exemple, il est possible de matérialiser la localisation d'un capteur de *monitoring* dans *Datae 2D map* et d'ouvrir *Datae Monitoring* pour visualiser les données pertinentes provenant de ce capteur. Il est par ailleurs possible de produire une cartographie de données intégrées dans *Datae 2D map* et de la projeter sur l'enveloppe texturée d'une structure représentée dans le module *Datae 3D map*.

Un autre exemple est celui du cas où des mesures sont réalisées dans plusieurs zones d'un ouvrage dont la géométrie est complexe, où le choix d'un support de représentation 3D de la structure sera alors plus pertinent qu'un simple cliché photographique car ceci permettra de mieux appréhender la distribution spatiale des données acquises.

5.1.3 Les données d'entrée

Les données d'entrée sont d'origines diverses tant sur le plan des paramètres mesurés qu'au niveau des formats de fichiers. Ces données peuvent être classées en trois familles distinctes :

- Données de *monitoring* ;
- Données servant à créer les supports de représentation (en 2D et en 3D) ;
- Données à inclure sur ces supports (en 2D et en 3D) ;
- Données de courburemétrie.

Dans l'interface *Datae Monitoring*, les données d'entrées sont celles enregistrées par les capteurs placés à demeure sur les ouvrages. Elles correspondent aux différents paramètres structurels (ouverture d'une fissure, roulis, basculement, etc.) et environnementaux (température, hygrométrie, etc.) mesurés. Ces données sont accessibles directement dans l'interface via une base de données PostgreSQL alimentée en continue tel que présenté sur la Figure 5.2.

À noter que Matlab® permet de récupérer le contenu de cette base de données à l'aide d'un pilote ODBC (*open database connectivity*) et d'une requête SQL (*Structured Query Language*).

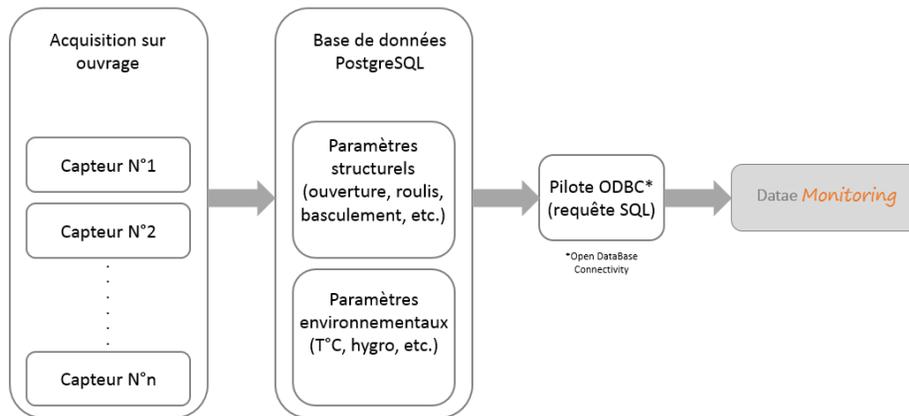


Figure 5.2 Données d'entrée dans l'interface *Datae Monitoring*.

Dans le cas de l'interface *Datae 2D map*, les données d'entrée permettant de créer le support de représentation sont de simples photographies au format image (*.jpg, *.bmp, *.tiff, etc.).

Pour l'interface *Datae 3D map*, les données d'entrée permettant de créer le support de représentation sont des nuages de points au format *.txt provenant d'acquisitions par scanner 3D ou des fichiers au format *.obj (cf. chapitre 3) préalablement exportés depuis un logiciel de photogrammétrie et combinant un fichier principal au format *.txt et des fichiers de texture au format image (*.jpg, *.bmp, *.tiff, etc.).

En 2D comme en 3D, les données d'entrée incluses sur les supports de représentation peuvent provenir des sources suivantes :

- Données de *monitoring*, (position des capteurs de mesure), séries temporelles sous forme de courbes au format image (*.jpg, *.bmp, *.tiff, etc.).
- Données de CND au format *.xlsx ou *.txt pour les cartographies et les mesures ponctuelles et multimédia pour les mesures vidéoendoscopiques (format *.mp4, *.avi).
- Données de représentation des contrôles destructifs sous forme de photographies au format image (*.jpg, *.bmp, *.tiff, etc.).
- Données d'analyses en laboratoire, généralement des tableaux de synthèse de résultats aux formats *.xlsx ou *.txt ;
- Données complémentaires tel que des plans, des graphes, des histogrammes, des notes de terrain, des comptes rendus, etc. (format *.pdf).

Les données ponctuelles représentées en 2D et en 3D sont matérialisées par des points de localisation de type « popup » permettant d'ouvrir un menu faisant référence aux informations

disponibles. Ces points de localisation peuvent être positionnés de manière interactive par l'utilisateur alimentant le support de représentation.

Dans l'interface *Datae Courburemétrie*, les données d'entrée sont des fichiers de valeurs numériques associées aux cycles de chargement et de déchargement (format *.txt ou *.xlsx).

Le Tableau 5.1 synthétise les principales données d'entrée utilisées dans chaque interface ainsi que les formats de fichiers associés et les types de représentations.

Tableau 5.1 Synthèse des principales caractéristiques des données d'entrées supportées par *Datae*.

Données d'entrée	Format	Type de représentation	Interface
<i>Monitoring</i>	*.txt	Séries temporelles	<i>Datae Monitoring</i>
	*.bmp, *.jpg, *.tiff	Point de localisation et lien vers le graphique associé	<i>Datae 2D/3D</i>
Réflectométrie radar	*.xlsx, *.bmp, *.jpg, *.tiff	Cartographie	<i>Datae 2D/3D</i>
Potentiel de corrosion	*.xlsx, *.bmp, *.jpg, *.tiff	Cartographie	<i>Datae 2D/3D</i>
Capacimétrie électrique	*.bmp, *.jpg, *.tiff	Cartographie	<i>Datae 2D/3D</i>
Vitesse de corrosion	*.bmp, *.jpg, *.tiff ou *.xlsx, *.txt,	Cartographie ou point de localisation et lien vers la valeur numérique associée	<i>Datae 2D/3D</i>
Résistivité électrique	*.bmp, *.jpg, *.tiff ou *.xlsx, *.txt,	Cartographie ou point de localisation et lien vers la valeur numérique associée	<i>Datae 2D/3D</i>
Vitesse du son	*.bmp, *.jpg, *.tiff ou *.xlsx, *.txt,	Cartographie ou point de localisation et lien vers la valeur numérique associée	<i>Datae 2D/3D</i>
Vidéo-endoscopie	*.mp4, *.avi	Point de localisation et lien vers la vidéo associée	<i>Datae 2D/3D</i>
Contrôles destructifs	*.bmp, *.jpg, *.tiff	Point de localisation et lien vers l'image associée	<i>Datae 2D/3D</i>
Analyses en laboratoire	*.xlsx, *.txt	Valeurs numériques	<i>Datae 2D/3D</i>
Autres (plans, graphes, histogrammes, etc.)	*.pdf	Point de localisation et lien vers le document externe associé	<i>Datae 2D/3D</i>
Courburemétrie	*.txt, *.xlsx	Graphe des cycles de chargement et déchargement	<i>Datae Courburemétrie</i>

Les paragraphes suivants présentent l'ergonomie de chaque interface, décrivent succinctement les principales fonctionnalités en proposant un exemple d'exploitation des données et indiquent les bénéfices liés à l'utilisation de *Datae*.

5.2 Solution pour le *monitoring*

5.2.1 Présentation de l'interface et des fonctionnalités

L'interface *Datae Monitoring* se présente sous la forme d'une fenêtre principale divisée en deux panneaux distincts tel que présenté à la Figure 5.3. La partie supérieure de l'interface est dédiée à la gestion et à l'exploitation des données. La partie inférieure de l'interface est destinée à l'affichage graphique permettant la représentation des séries temporelles.

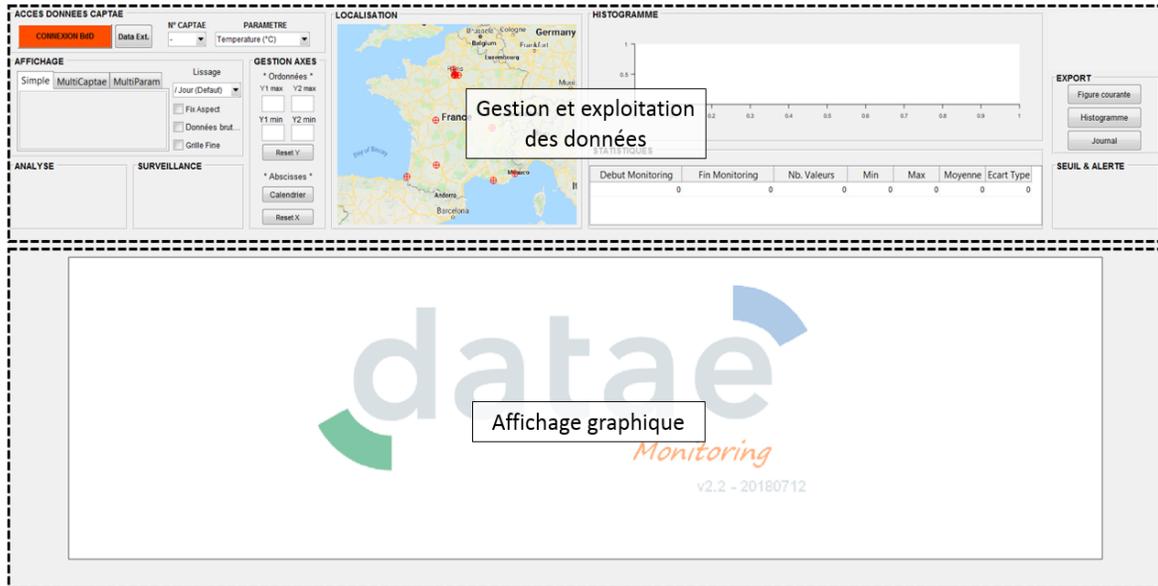


Figure 5.3 Aspect général de l'interface *Datae Monitoring*.

Les principales fonctionnalités de cette interface, accessibles depuis le panneau de gestion et d'exploitation des données, sont les suivantes :

- Connexion et accès permettant de récupérer et de sélectionner les informations stockées dans la base de données alimentée en continu par les capteurs.
- Localisation et fiche de renseignement des différents capteurs actifs au moment de la connexion à la base de données.
- Mode d'affichages variés (un paramètre, deux paramètres mesurés simultanément par un capteur, un paramètre mesuré par plusieurs capteurs positionnés sur un même ouvrage).
- Lissage des données par filtre médian.
- Histogramme et statistiques des données sélectionnées.
- Export des données sous forme de graphes (*.bmp, *.jpg, *.tiff) ou de tableaux de valeurs exploitables sur une plateforme externe (*.xlsx).

Des fonctionnalités spécifiquement dédiées au suivi et à la maintenance préventive sont également disponibles :

- Outil d'aide à la prédiction de tendance de l'évolution d'un paramètre à court/moyen terme (quelques jours à quelques mois) par ajustement d'une loi polynomiale sur les données.
- Définition de seuils de vigilance et d'alerte pour les différents paramètres mesurés avec envoi automatique de courriel en cas de dépassement de seuils.
- Correction de l'influence des variations thermiques sur l'évolution de l'ouverture d'une fissure (cf. Chapitre 3).

5.2.2 Exemple d'exploitation

La Figure 5.4 présente un exemple d'application de *Datae Monitoring* pour la prédiction de tendance de l'évolution d'un paramètre au cours du temps. Dans cet exemple, des données de basculements (en degré) sont présentées. Elles ont été acquises du 1 mai 2017 au 1 juillet 2018 sur l'édifice de la Bourse du Commerce à Paris (France) afin d'assurer le suivi des mouvements structurels potentiels de l'ouvrage pendant une période de travaux réalisés à proximité. Compte tenu de la tendance générale de l'évolution du basculement, une fonction polynomiale d'ordre 3 a été utilisée afin de d'estimer l'évolution les valeurs de basculement jusqu'au 1 novembre 2018.

Le premier graphique (a) présente la tendance obtenue pour le jeu de données considéré avec un intervalle de confiance de 95% (pointillés bleus) autour de la valeur estimée (trait bleu). Le second graphique (b), présente les données réellement acquises jusqu'au 1 octobre 2018. Celles-ci coïncident avec le modèle d'évolution des valeurs de basculement.

À noter que cet outil de prédiction de tendance peut s'avérer utile dans les cas simples où les évolutions sont pseudo-linéaires ou présentent une cyclicité. Il peut ainsi guider l'utilisateur dans l'estimation des valeurs des seuils de vigilance et d'alerte à définir à court ou moyens terme (quelques mois maximum) pour assurer le suivi et la maintenance sécuritaire des ouvrages.

Il convient également de mentionner que cet outil de prédiction de tendance ne permet pas de décrire l'évolution d'un paramètre à long terme ni de prendre en considération des phénomènes stochastiques, comme par exemple, une déformation soudaine de type rupture ou un choc sur la structure considérée.

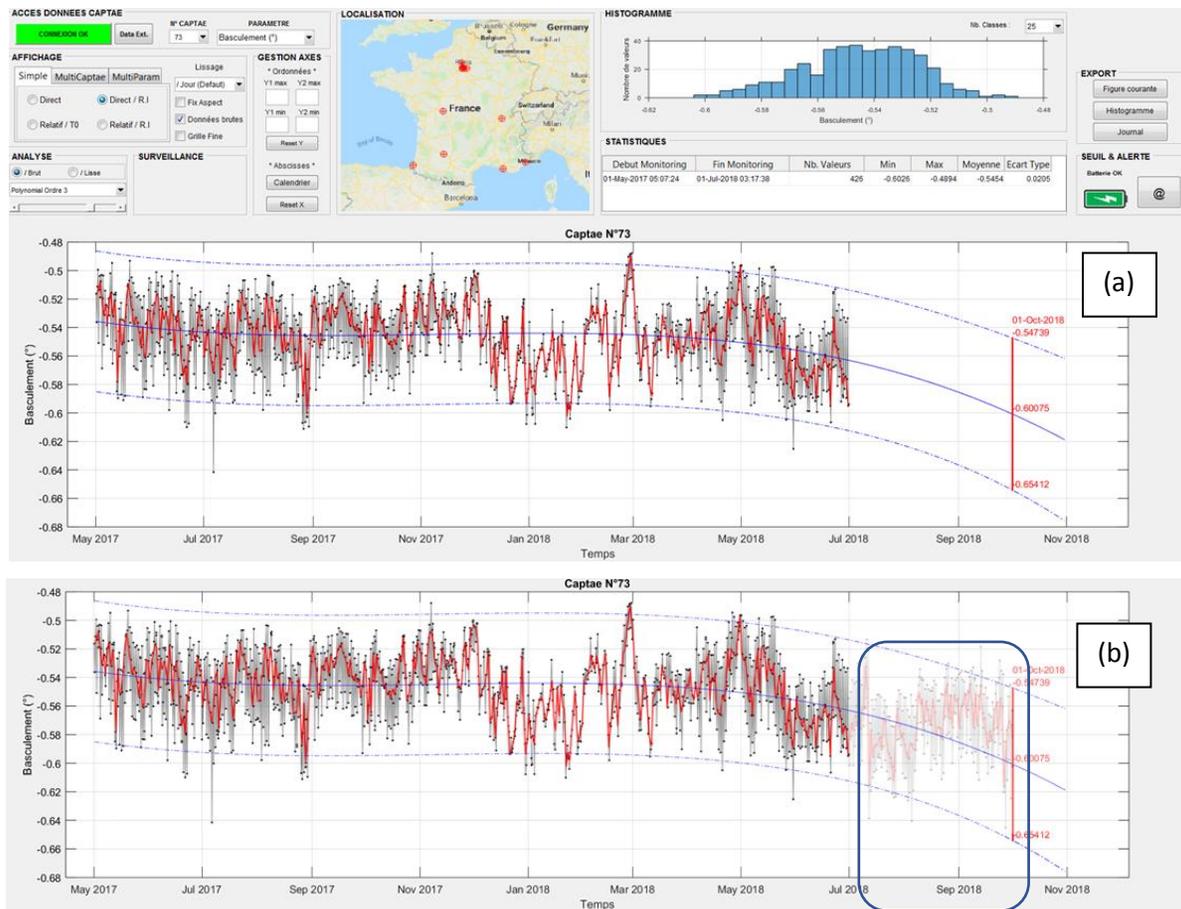


Figure 5.4 Exemple de prédiction de tendance avec *Datae Monitoring* – a : prédiction de l'évolution du basculement à 4 mois – b : Comparaison après trois mois de nouvelles données acquises.

5.2.3 Bénéfices et gains

Les bénéfices liés à l'utilisation de *Datae Monitoring* sont à la fois techniques, opérationnels et organisationnels. Techniquement, cette interface permet d'accéder en temps réel aux données stockées dans une base PostgreSQL et de pouvoir réaliser un contrôle de la qualité des résultats en continu. Elle permet également d'accroître la pertinence des mesures par les différents développements réalisés (correction thermique, prédiction de tendance, filtrages des artefacts de mesures). Les gains opérationnels et organisationnels concernent la possibilité de limiter les pertes d'exploitation et de prévenir d'éventuels risques d'accidents à l'aide de seuils de vigilance et d'alerte ajustables pour chaque paramètre d'intérêt. La diffusion d'un message automatique par courriel lors du dépassement d'un seuil favorise la réactivité dans le transfert d'informations, la prise de décisions et les interactions entre l'ingénieur en charge de l'étude et le gestionnaire d'ouvrage.

5.3 Solution 2D

5.3.1 Présentation de l'interface et des fonctionnalités

L'interface *Datae 2D map* se présente sous la forme de trois panneaux distincts. Le premier panneau (Figure 5.5) permet de gérer les données de CND, de prélèvements et d'analyses en laboratoire et de les reporter dans la zone d'affichage graphique correspondant à un support photographique. Ce panneau permet également l'intégration de données (cf. Chapitre 4) par fusion de CND. Le deuxième panneau (Figure 5.6) est dédié à l'analyse par méthodes géostatistiques. Il permet d'intégrer les données primaires et secondaires par cokrigage et par simulation séquentielle bayésienne. Ce panneau permet également de réaliser différents traitements sur les données brutes de cartographie de CND. Le troisième panneau (Figure 5.7) permet d'intégrer les données par apprentissage supervisé. Les cartographies générées par intégration de données peuvent ensuite être exploitées directement dans le premier panneau.

Les principales fonctionnalités de l'interface *Datae 2D map* sont les suivantes :

- Importation d'une photographie servant de support de représentation (panneau 1)
- Représentation des données (CND, analyses en laboratoire, prélèvements, vidéo) sur la photographie (panneau 1).
- Passerelle vers *Datae Monitoring* par le biais de points de localisation des capteurs (panneau 1).
- Passerelle vers *Datae 3D map* (panneau 1).
- Projection des cartographies de CND sur un plan ou sur plusieurs plans (panneau 1).
- Estimation de surfaces d'intérêt et relevé de désordres (panneau 1).
- Filtrage des données brutes (panneau 2).
- Intégration des données par fusion de CND, méthodes géostatistiques et apprentissage supervisé (panneaux 2 et 3).
- Export des résultats selon différents formats (*.dxf, *.xlsx, *.tiff, *.bmp) (panneaux 1 à 3).
- Enregistrement et chargement du projet en fichier *.mat (panneau 1) pour sessions de travail multiples.

À noter que le support photographique peut être alimenté et sauvegardé pour des utilisations futures et constitue donc une base de données propre à la structure diagnostiquée. Il peut ainsi être enrichi au court du temps avec de nouvelles données. Ceci permet de corrélérer et d'analyser la cinétique d'évolution des paramètres mesurés afin d'apporter une aide au diagnostic.

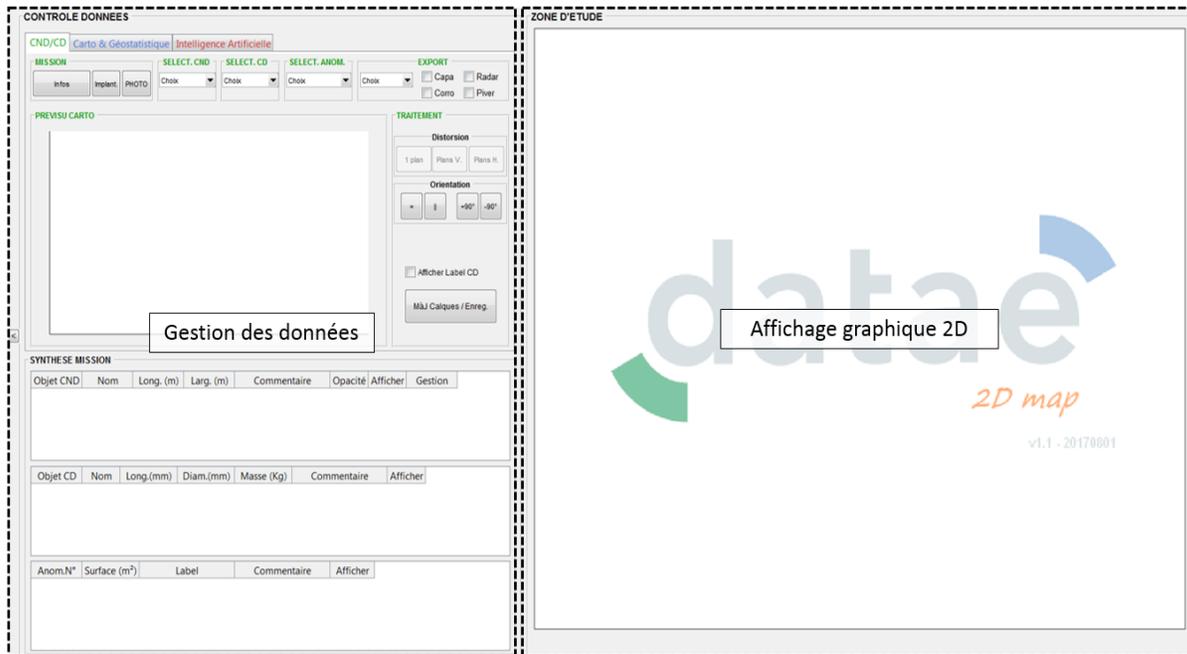


Figure 5.5 Aspect général de l'interface *Datae 2D map* pour le panneau 1 : gestion et de représentation des données sur support photographique.

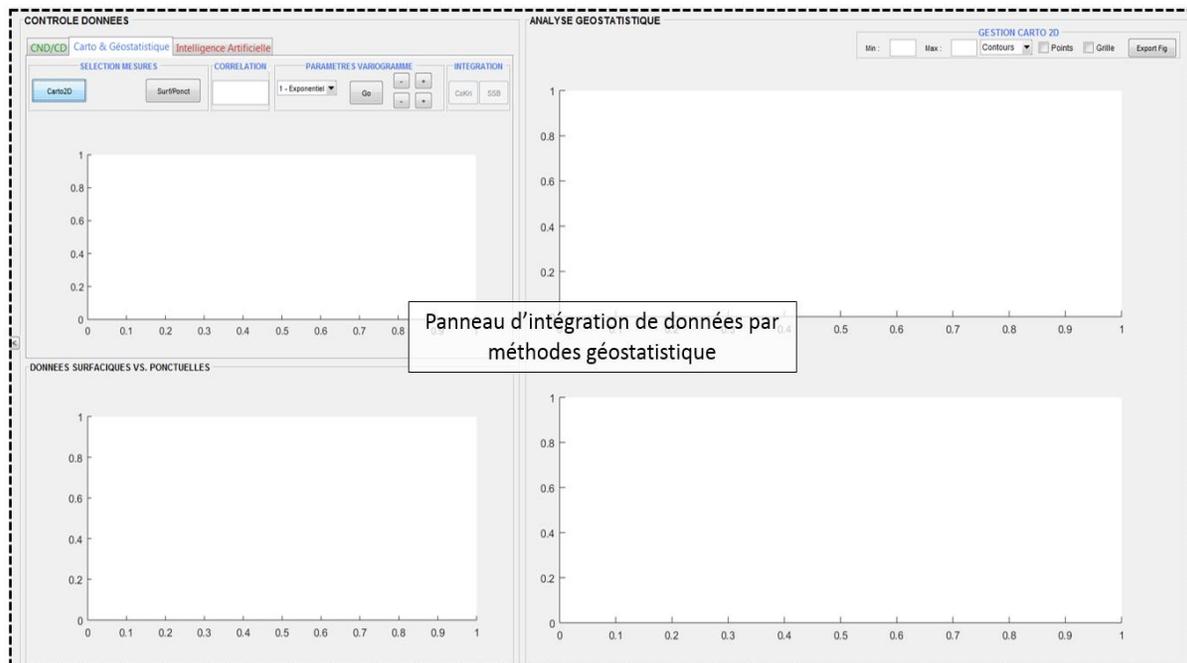


Figure 5.6 Aspect général de l'interface *Datae 2D map* pour le panneau 2 : intégration des données par méthodes géostatistiques.

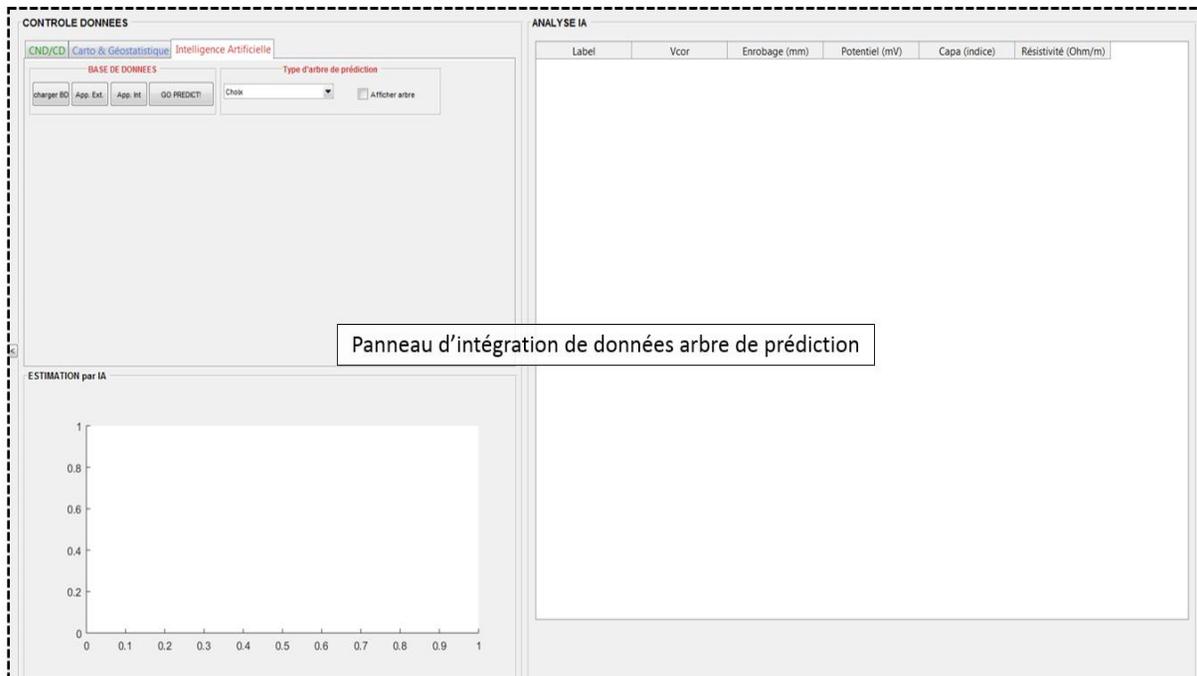


Figure 5.7 Aspect général de l'interface *Datae 2D map* pour le panneau 3 : intégration des données par apprentissage supervisé.

5.3.2 Exemple d'exploitation

La Figure 5.8 présente un cliché photographique d'une pile de la passerelle Adrien Pouillot située dans la ville de Québec. Une importante zone de faïençage est mise en évidence en partie inférieure gauche de la pile. Cette pile a fait l'objet d'investigations par mesures de potentiel de corrosion et d'humidité relative par capacimétrie. Les données étant colocalisées, les deux cartographies ont été conjointement reportées sur le support photographique dans *Datae 2D map* tel que présenté sur la Figure 5.9. La superposition des deux cartographies et la possibilité de pouvoir jouer sur leurs transparences respectives permet clairement de mettre en évidence une corrélation entre la zone de faïençage observée en partie inférieure gauche et les résultats des mesures de CND. Les potentiels les plus électronégatifs (-300 à -350 mV) et l'humidité relative la plus élevée sont en effet observés dans cette zone. L'exemple montre également qu'il est possible d'estimer la surface de cette zone (pointillés blancs), évaluée dans ce cas à environ 1.7 m². Bien que la zone soit de faible dimension, ce type d'information est généralement pertinent car il permet de contribuer à la planification et à la définition des budgets à allouer aux travaux de réparation ou de maintenance.



Figure 5.8 Vue générale de la pile auscultée sous la passerelle Adrien Pouillot (Ville de Québec).

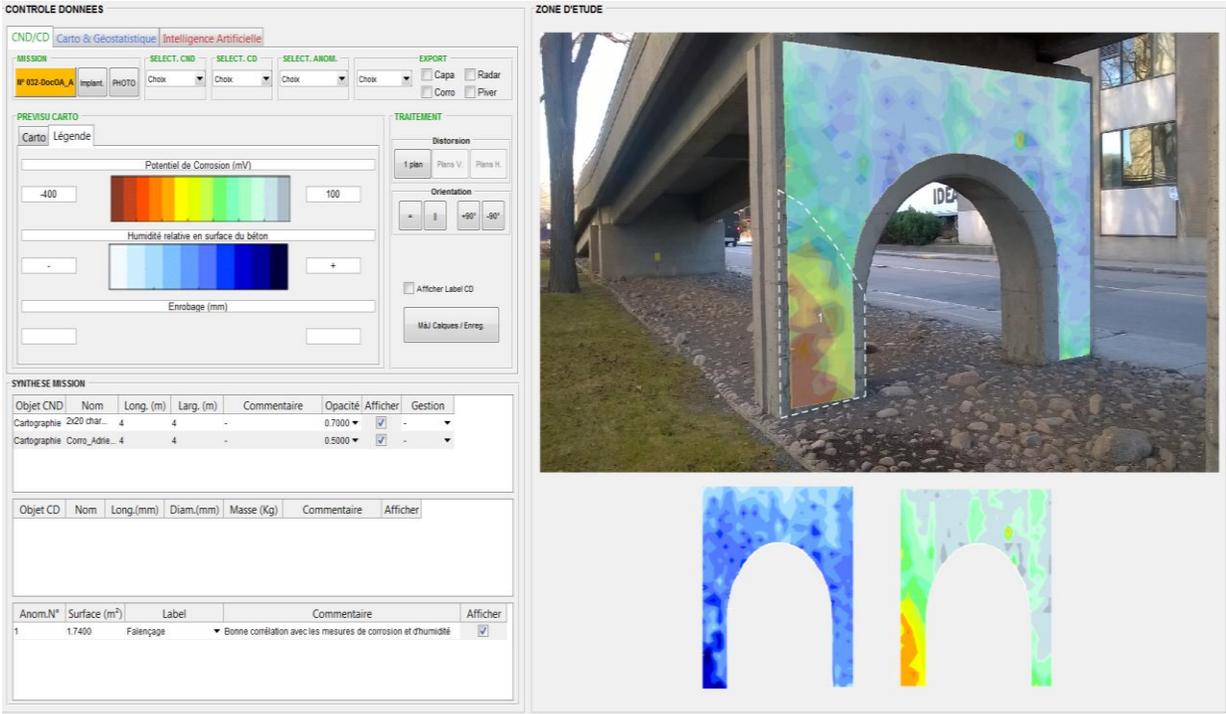


Figure 5.9 Exemple d'exploitation des données acquises sur une pile de la passerelle Adrien Pouillot dans l'interface Datae 2D map. Les cartographies superposées en transparence sur la photographie sont présentées individuellement sous celle-ci.

5.3.3 Bénéfices et gains

L'utilisation de *Datae 2D map* engendre plusieurs gains importants liés aux développements techniques réalisés.

Au niveau de la représentation des mesures de CND à grand rendement, les gains générés proviennent de la possibilité de réduire la durée globale des investigations sur site et la durée du traitement des données quand plusieurs plans d'une zone d'étude sont auscultés consécutivement. En effet, l'apport technique de la transformation projective (cf. Chapitre 3) offre la possibilité de limiter le temps de prise de mesure car l'acquisition peut être menée en un seul passage et en continue sur les différents plans de la structure auscultée. Connaissant les possibilités de restitution des cartographies de CND offertes par *Datae 2D map*, des premiers tests ont montré un gain de temps à l'acquisition des mesures de l'ordre de 10%. Ce gain est encore plus important en ce qui concerne le traitement et la mise en forme des résultats. Dans ce cas, il est directement proportionnel au nombre de plans auscultés. La Figure 5.10 illustre les gains temporels directs estimés entre une approche conventionnelle et l'utilisation de *Datae 2D map* pour l'acquisition sur site et la représentation des données cartographiques de CND.

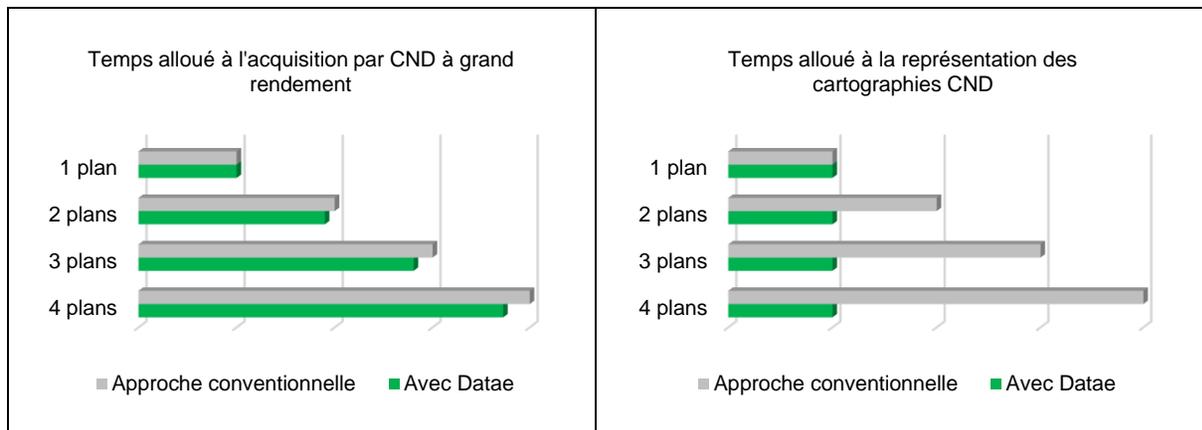


Figure 5.10 Gains de temps obtenus pour l'acquisition (gauche) et la représentation (droite) des données de CND à grand rendement sur plusieurs plans d'une structure entre l'approche conventionnelle (en gris) et l'utilisation de *Datae 2D map* (en vert).

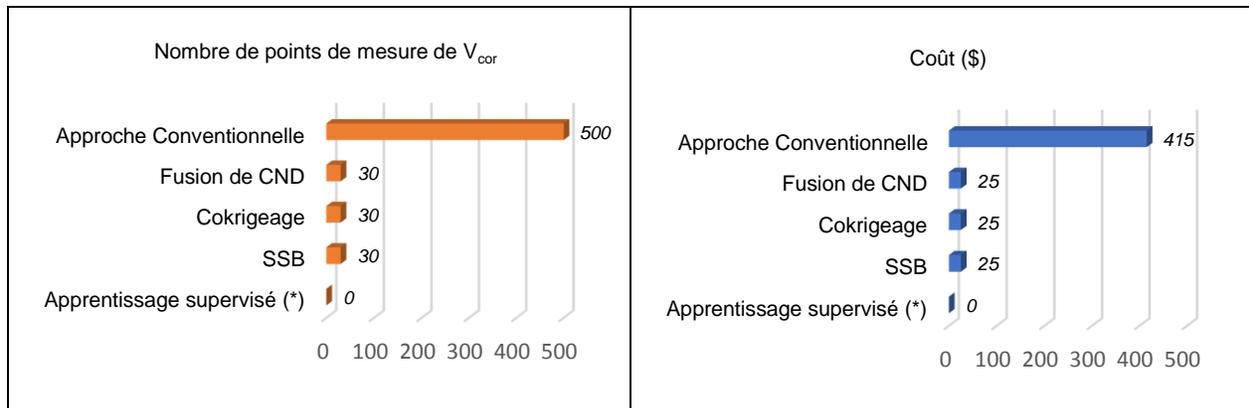
L'exemple suivant met en évidence le gain financier direct obtenu en utilisant *Datae 2D map*. En considérant que le coût d'une heure d'acquisition de données de CND par un technicien sur site est de l'ordre de 50\$ et celui d'un ingénieur en charge de la mise en forme et du traitement des données et de l'ordre de 100\$, si une cartographie CND à grand rendement est réalisée sur 4 plans consécutifs en 1h sur le terrain et que le temps de traitement est de 15 minutes par cartographie pour l'ingénieur, le coût total avec l'approche conventionnelle sera de 150 \$ contre 70\$ en utilisant *Datae*.

Tableau 5.2 Exemple de gain financier direct entre une approche conventionnelle et en utilisant *Datae 2D map* dans le cadre d'une auscultation par *CND* réalisée sur 4 plans consécutifs.

Description	Coût horaire technicien (\$)	Coût horaire Ingénieur (\$)	Unité	Approche conventionnelle			Avec <i>Datae</i>		
				Quantité	Prix unitaire (\$)	Montant (\$)	Quantité	Prix unitaire (\$)	Montant (\$)
Acquisition d'une cartographie sur 4 plans consécutifs	50	-	Heure	1	50	50	0.9	50	45
Traitement	-	100	Heure	1	100	100	0.25	100	25
					Total =	\$150.00		Total =	\$70.00

L'apport technique lié aux méthodes d'intégration de données présentées au Chapitre 4 engendre également d'importants gains d'exploitation et de représentativité. Au niveau de l'acquisition sur site, le gain de temps de mise en œuvre est considérable car les données intégrées permettent de limiter (fusion de *CND*, géostatistique), voire d'éviter (apprentissage supervisé) la réalisation de mesures ponctuelles quand un lien de corrélation peut être établi entre celles-ci et les données densément échantillonnées.

En prenant pour exemple les données acquises dans le cas d'étude présenté au Chapitre 4, il aurait fallu plus de 8h pour réaliser une cartographie de la vitesse de corrosion (V_{cor}) en échantillonnant toute la zone auscultée par *CND* à grand rendement (500 points), à hauteur d'une mesure de V_{cor} par minute. En ne réalisant qu'une trentaine de mesures de V_{cor} , soit environ 30 minutes d'acquisition et en les intégrant avec les données de potentiel de corrosion, des cartographies de la distribution spatiale de V_{cor} ont été produites. Le gain financier direct découlant d'une telle intégration de données est présenté à la Figure 5.11 en considérant que taux horaire d'un technicien soit de 50\$ de l'heure et qu'il réalise 60 mesures de V_{cor} par heure (soit 0.83\$/mesure) tel que présenté dans le Tableau 5.3.



(*) Pour l'apprentissage supervisé, la possibilité de simuler la propriété primaire sans faire de mesure nécessite néanmoins l'acquisition de valeurs connues sur d'autres sites et la validation du modèle de prédiction.

Figure 5.11 Comparaison du nombre de points d'acquisition (gauche) et des coûts de réalisation associés (droite) entre une approche conventionnelle et l'utilisation des méthodes d'intégration de données utilisées dans *Datae 2D map*.

Tableau 5.3 Exemple de gain financier direct entre la réalisation d'une cartographie de données primaires obtenue par une approche conventionnelle et par les méthodes d'intégration de données utilisées dans *Datae 2D map*.

Description	Coût horaire Technicien (\$)	Coût horaire Ingénieur (\$)	Unité	Approche conventionnelle			Avec Datae		
				Quantité	Prix unitaire (\$)	Montant (\$)	Quantité	Prix unitaire (\$)	Montant (\$)
Acquisition de données de V_{cor} sur une grille de 500 points	50	-	Heure	500	0.83	415	30	0.83	25
Traitement	-	100	Heure	0.1	100	10	0.1	100	10
				Total =		\$425.00	Total =		\$35

En outre, ces cartographies offrent un gain de représentativité par la définition de niveaux de vigilance (fusion de CND) ou en tenant compte de l'incertitude des données simulées (SSB).

Un troisième gain lié à l'utilisation de *Datae 2D map* concerne la possibilité de réaliser l'archivage numérique des données sur le support photographique. Les données sont centralisées et enregistrées pour des exploitations ultérieures ce qui permet d'une part de pérenniser les projets en cours et permet d'autre part de constituer une base de données pouvant être enrichie au cours du temps. Cette base de données peut notamment être utile pour améliorer la prédiction de données par apprentissage supervisé.

5.4 Solution 3D

5.4.1 Présentation de l'interface et des fonctionnalités

L'interface *Datae 3D map* se présente sous la forme d'une fenêtre principale divisée en deux panneaux distincts, soit un panneau de gestion des données et un panneau d'affichage du modèle 3D, tel que proposé sur la Figure 5.12. Bien que sensiblement similaire à l'ergonomie de l'interface 2D, l'interface 3D présente certaines différences, notamment en ce qui a trait à la navigation et à l'affichage spécifique en 3D.

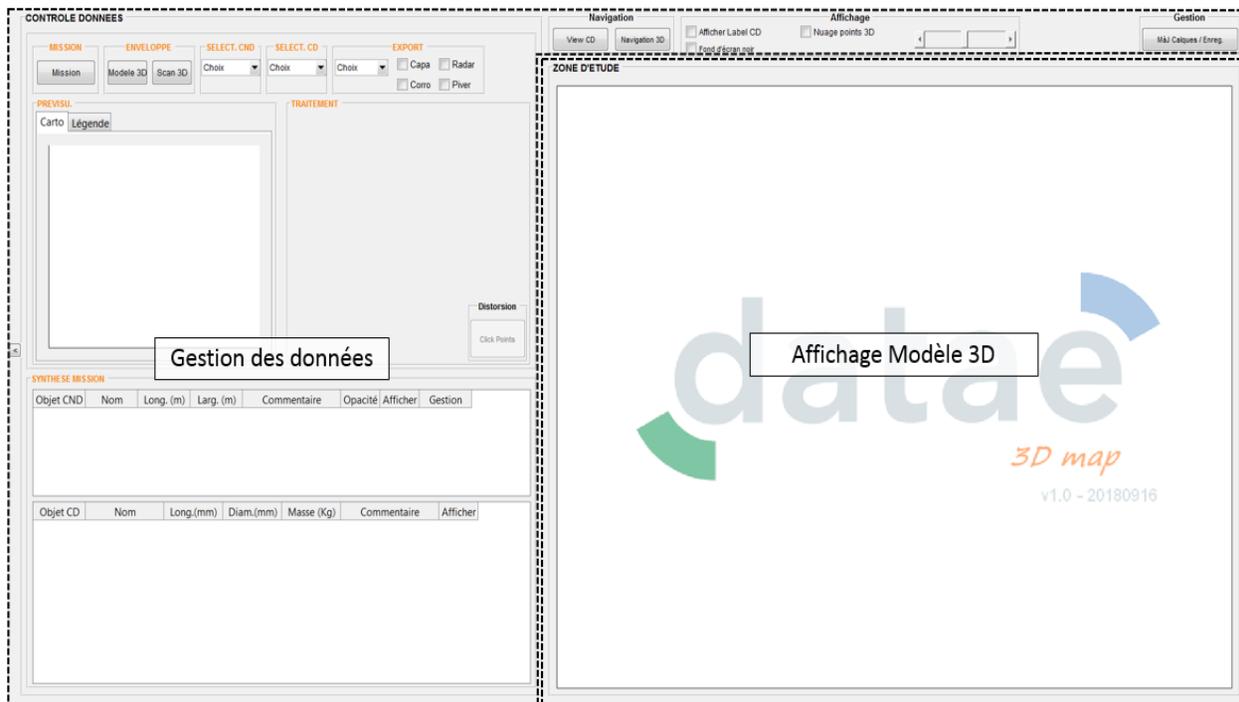


Figure 5.12 Aspect général de l'interface *Datae 3D map*.

Les principales fonctionnalités de l'interface *Datae 3D map* sont les suivantes :

- Importation d'un modèle 3D photogrammétrique (format *.obj) ou d'un nuage de points servant de support de représentation.
- Représentation des données (CND, analyses en laboratoire, prélèvements, vidéo).
- Passerelle vers *Datae Monitoring* par le biais de points de localisation des capteurs.
- Passerelle vers *Datae 2D map*.
- Export des résultats selon différents formats (*.dxf, *.xlsx, *.tiff, *.bmp).
- Enregistrement et chargement du projet en fichier *.mat pour sessions de travail multiples.

Comme pour l'interface *Datae 2D map*, le support de représentation 3D peut être alimenté et sauvegardé pour des utilisations futures et constitue donc une base de données propre à la structure diagnostiquée. Il peut ainsi être enrichi au court du temps avec de nouvelles données. Ceci permet de corrélérer et d'analyser la cinétique d'évolution des paramètres mesurés afin d'apporter une aide au diagnostic.

5.4.2 Exemple d'exploitation

La Figure 5.13 présente une vue d'ensemble de l'ouvrage considéré dans cet exemple de représentation 3D. Il s'agit de la jetée d'embeckage du port de Saint Malo (Bretagne, France), une structure en béton armé permettant de guider les navires dans leur approche du quai. Cet exemple a été choisi pour la complexité de la géométrie de la structure à représenter ainsi que pour les contraintes liées à la restitution du modèle 3D. La fenêtre temporelle des prises de vues photographiques était en effet fortement limitée compte tenu de l'influence de la marée. L'objectif étant de pouvoir représenter l'intégralité de la structure, il fallait pouvoir agir rapidement en tenant compte du marnage.



Figure 5.13 Vue générale de la jetée d'embeckage du port de St Malo (France).

Pour prendre en considération ces différentes contraintes, l'acquisition de 550 prises de vues photographiques a été menée en moins de 2 h à l'aide d'un drone équipé d'une caméra haute définition. Le traitement des photographies a été réalisé par analyse photogrammétrique et le modèle 3D a été exporté au format *.obj, exploitable dans *Datae 3D map*.

La Figure 5.14 présente l'exemple de représentation de la jetée d'embarcadere dans l'interface *Datae 3D map*.

Sur cette structure, les investigations suivantes ont été réalisées et reportées sur le modèle tel que présenté sur la Figure 5.15 :

- Six (6) zones de réflectométrie radar afin d'évaluer l'épaisseur d'enrobage des aciers (cartographies et points bleus associés),
- Vingt-six (26) prélèvements par carottage afin de procéder à différentes analyses en laboratoire (points rouges),
- Deux (2) prélèvements d'acier (points jaunes) pour évaluer leur résistance à la traction.

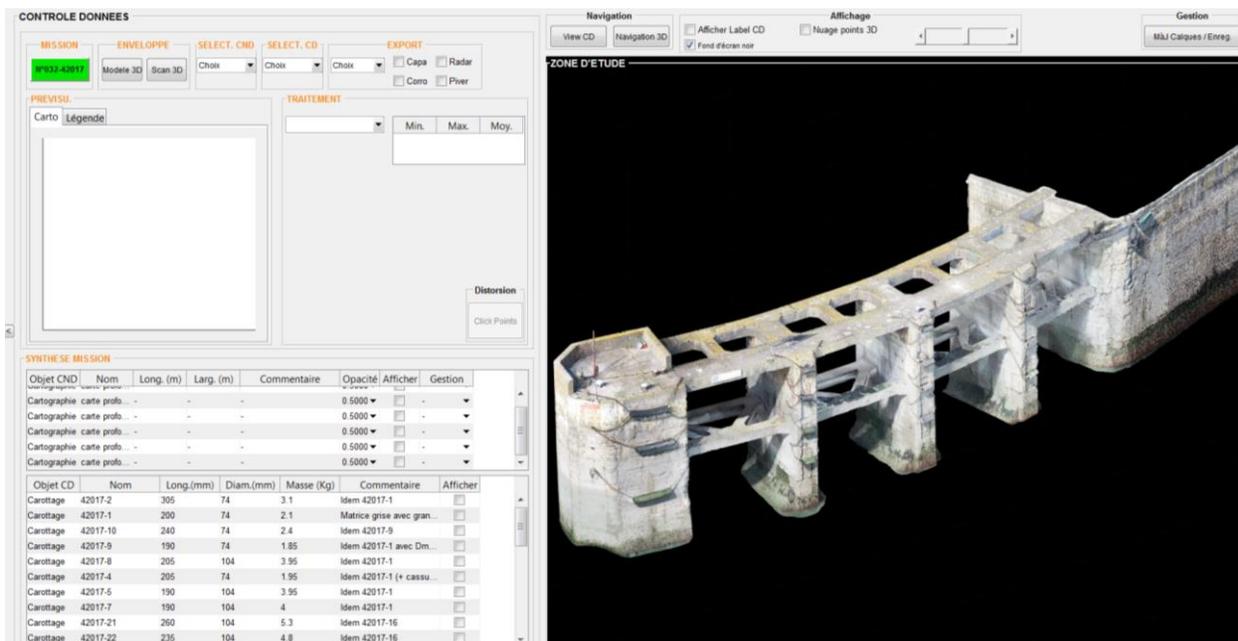


Figure 5.14 Modèle de la jetée d'embarcadere du port de St Malo, représenté dans l'interface *Datae 3D map*.

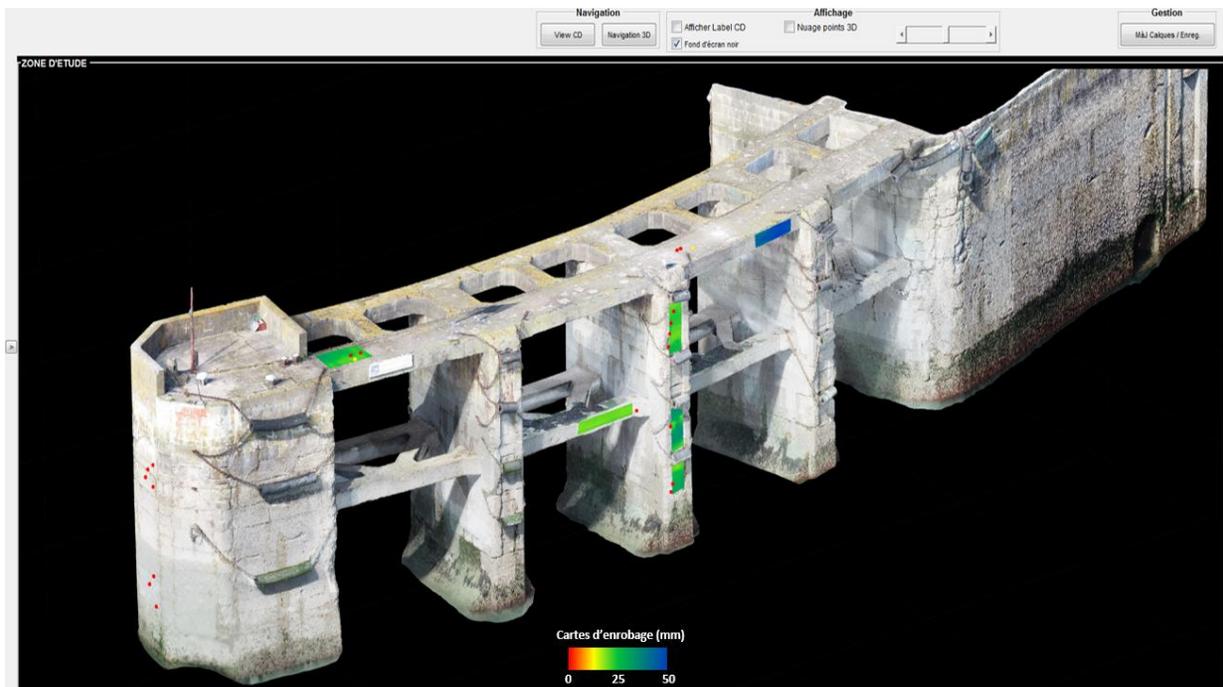


Figure 5.15 Représentation des données d'investigation sur site de la jetée d'embectage du port de St Malo dans l'interface *Datae 3D map*.

En cliquant sur les différents points répertoriés sur la structure, il est possible de visualiser les résultats associés, tel que présenté sur la Figure 5.16 pour l'exemple d'un carottage.

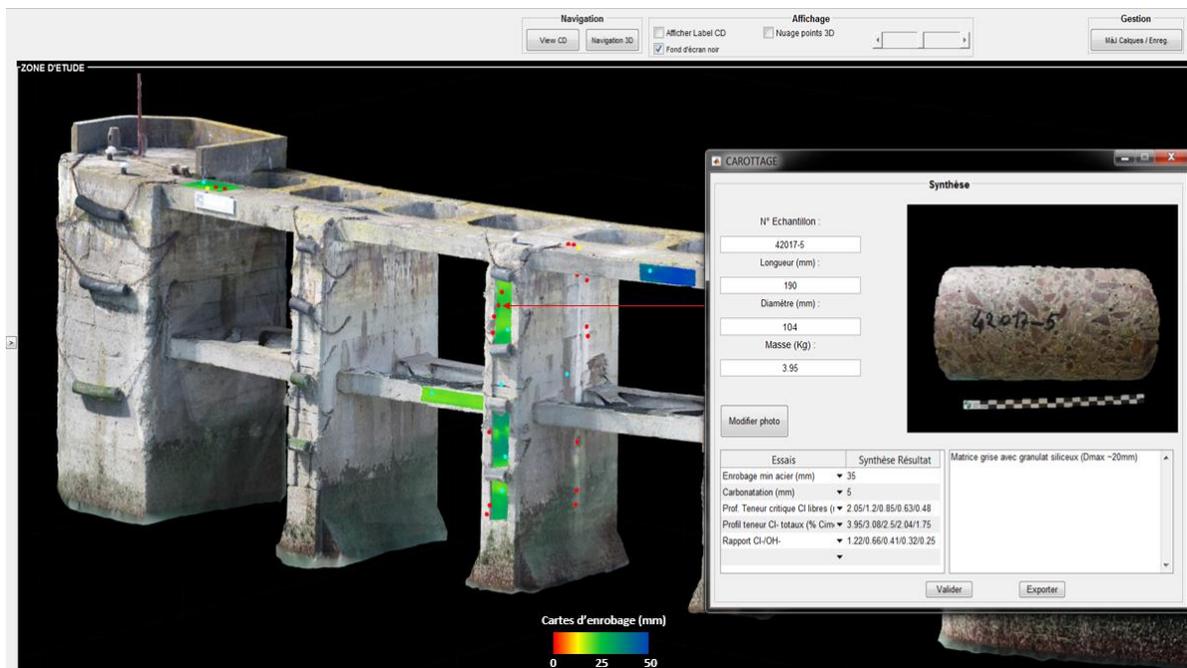


Figure 5.16 Exemple de synthèse des résultats pour un carottage réalisé sur la jetée d'embectage du port de St Malo.

L'agrégation des résultats sur la structure 3D permet d'en faire une analyse exhaustive en tenant compte du contexte général, en confrontant et en corrélant rapidement les données acquises.

5.4.3 Bénéfices et gains

Les développements techniques de *Datae 3D map* permettent d'obtenir une restitution réaliste de l'ouvrage et d'interagir avec le modèle 3D pour y reporter et visualiser les données acquises. Le caractère immersif lié à la possibilité de naviguer au sein de la structure accroît la représentativité des résultats et permet d'appréhender le diagnostic dans sa globalité.

L'archivage numérique des données, centralisées sur le modèle 3D permet de constituer un véritable modèle BIM (*Building Information Modeling*) dédié à la maintenance de l'ouvrage considéré. La possibilité d'enregistrer et d'enrichir le modèle au cours du temps permet, comme pour *Datae 2D map*, de pérenniser le diagnostic en constituant une base de données multi échelles et multivariés pouvant être alimentée au cours du temps et des projets de diagnostic mesures.

Un autre bénéfice est de pouvoir valoriser des données anciennes. À titre d'exemple, si un gestionnaire réalise aujourd'hui un modèle 3D de son ouvrage, il est possible qu'il désire représenter sur celui-ci des données acquises antérieurement à la réalisation du modèle. *Datae 3D map* permet d'exploiter ces données et de les représenter sur le modèle 3D avec la possibilité d'exporter les résultats au format *.dxf, utilisables sur d'autres plateformes. En marge de ce projet de doctorat, une sollicitation de ce genre a d'ailleurs conduit à utiliser *Datae 3D map* pour restituer des cartographies radar sur le semis de points 3D d'un ouvrage récemment modéliser par scanner 3D à Bergen (Norvège).

5.5 Solution pour la courburemétrie

5.5.1 Présentation de l'interface et des fonctionnalités

L'interface *Datae Courburemétrie* se présente sous la forme d'une fenêtre principale divisée en deux panneaux distincts tel qu'illustrée sur la Figure 5.17. L'ergonomie est consistante avec les modules 2D et 3D, la partie gauche de l'interface étant dédiée à la gestion des données et la partie droite de l'interface étant destinée à l'affichage et à l'analyse graphique des cycles de chargement et de déchargement.

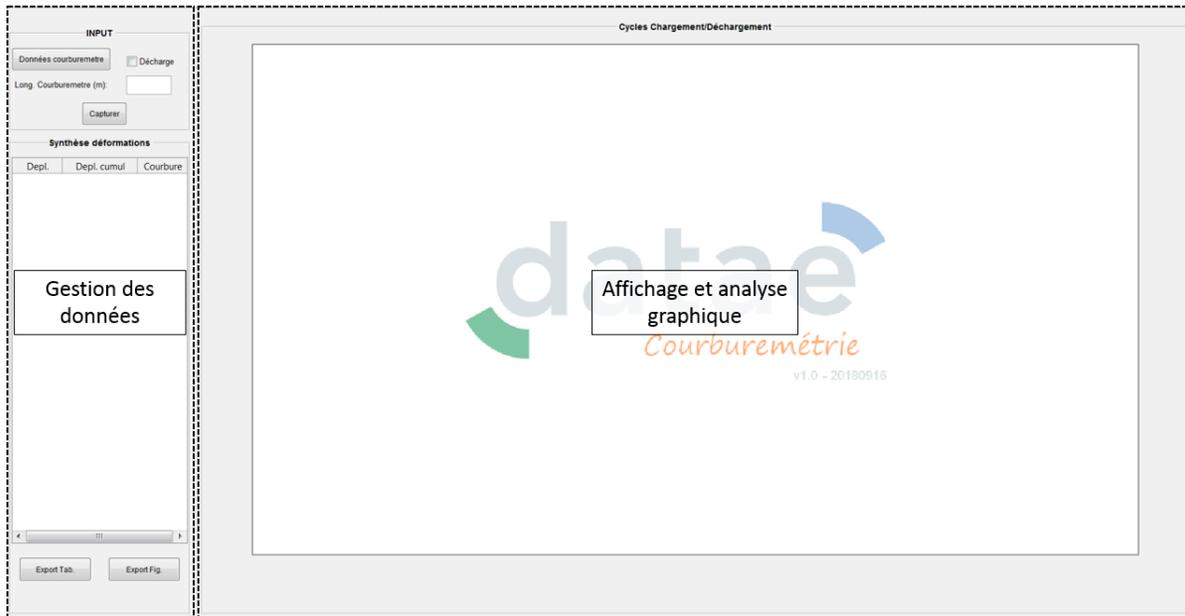


Figure 5.17 Aspect général de l'interface *Datae Courburemétrie*.

Les principales fonctionnalités de cette interface sont les suivantes :

- Importation des données de chargement / déchargement (format *.txt ou *.xlsx),
- Analyse graphique semi-automatique du déplacement, des déplacements cumulés et de la courbure pour chaque cycle de chargement et de déchargement,
- Enregistrement et exportation des résultats.

5.5.2 Exemple d'exploitation

La Figure 5.18 présente un exemple d'exploitation des données de courburemétrie acquises lors de cycles de sollicitations mécaniques (chargement et déchargement) sur un ouvrage en béton précontraint situé en France.

Un « patron dynamique » d'aide à l'interprétation est successivement déplacé sur le graphique représentant les cycles de chargement et de déchargement. La largeur du rectangle rouge correspond au nombre de points acquis lors d'un cycle et les deux traits verts correspondent aux pentes respectives des plateaux atteints entre deux cycles consécutifs. L'intersection entre les deux traits verts et le trait bleu, centré sur la demi largeur du rectangle rouge, permet de calculer et d'enregistrer le déplacement associé à un cycle de sollicitation mécanique. Quand une mesure de déplacement est réalisée, le patron se déplace automatiquement au cycle suivant et laisse une « trace » (trait rouge encadré de pointillés verticaux) indiquant que l'analyse a été prise en compte.

Les dimensions du patron peuvent être adaptées graphiquement par l'utilisateur pour s'ajuster à la forme de chaque cycle et permettre la mesure automatique du déplacement associé.

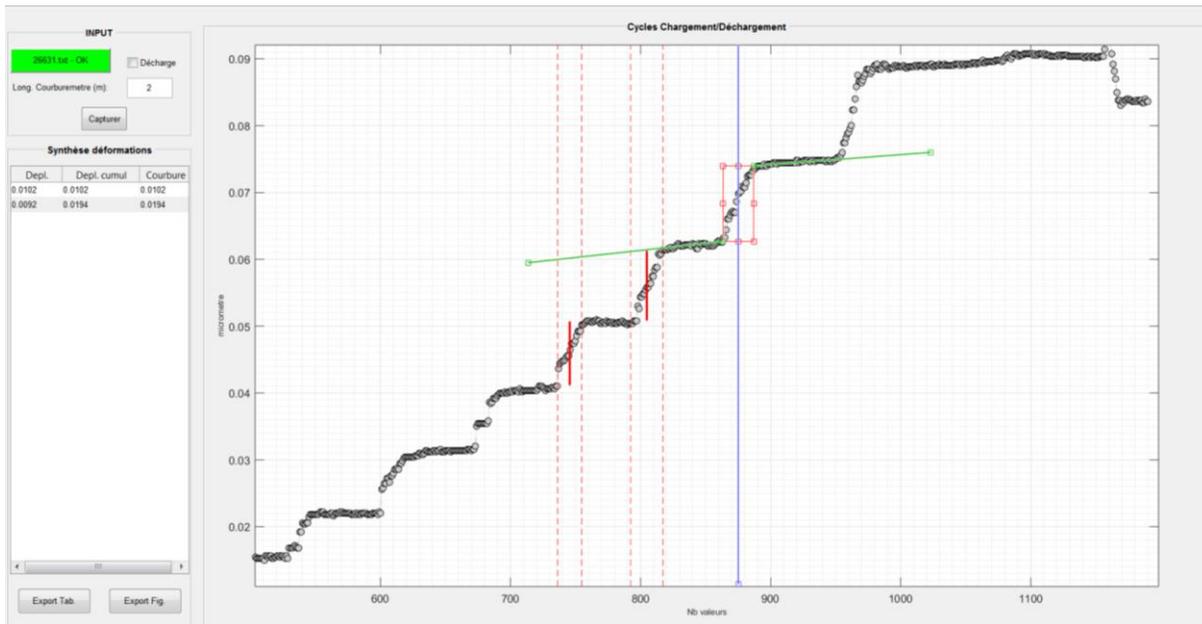


Figure 5.18 Exemple d'exploitation de données de courburemétrie dans l'interface *Datae Courburemétrie*.

5.5.3 Bénéfices et gains

L'utilisation de cette interface permet d'accélérer considérablement le temps d'analyse des mesures de courburemétrie. Une étude préliminaire a permis de comparer la durée d'exploitation par méthode graphique conventionnelle et en utilisant cette interface. Les premiers résultats montrent que cette durée est divisée par 6 en utilisant *Datae Courburemétrie*, la durée d'exploitation des données (analyse des cycles de chargement et de déchargement) passant d'environ 30 minutes à environ 5 minutes.

5.6 Synthèse

Ce chapitre a permis de présenter le système d'exploitation développé dans le cadre de cette thèse afin d'aider au diagnostic et à la maintenance des ouvrages du génie civil. Nommé *Datae*, il se divise en quatre principaux modules interfacés permettant de représenter, de traiter et d'intégrer séparément ou conjointement des données provenant de sources variées. Ce système d'exploitation centralise les différentes contributions techniques présentées dans les chapitres 3 et 4, liées à la représentation et à l'intégration des données.

Les principaux gains directs générés par l'utilisation de *Datae* ont également été présenté. Ceux-ci sont à la fois :

- Techniques (intégration des données de CND), rendus plus intuitifs, etc.),
- Opérationnels (réduction du temps d'investigation sur site ou de traitement),
- Organisationnels (anticipation, prédiction de phénomènes),
- Financiers (gains de temps substantiels, réduction des coûts des travaux de réparation par un ciblage plus précis des zones pathologiques, réduction de la perte d'exploitation due à des travaux moins longs et moins importants, allongement de la durée de vie de la structure).

Il existe aussi des gains indirects tant pour l'ingénieur en charge du diagnostic que pour le gestionnaire des ouvrages. Pour l'ingénieur, l'utilisation d'un tel système d'exploitation contribue à diminuer les tâches fastidieuses et redondantes de mise en forme et de traitement des données, laissant plus de place au travail d'analyse des résultats et favorisant ainsi la qualité du diagnostic. Pour le gestionnaire d'ouvrages, un diagnostic réalisé avec *Datae* pourra permettre d'améliorer la planification des travaux de maintenance et d'optimiser l'affectation des budgets d'investissement. De plus, une autre externalité positive est de pouvoir améliorer le niveau de service rendu aux usagers et aux citoyens (environnement plus sécuritaire, esthétisme, image et niveau de service valorisés).

Le Tableau 5.4 synthétise les apports techniques, les gains directs et indirects pour chaque interface du système d'exploitation développé.

Interface		Apports techniques	Gains directs		Gains indirects (externalités positives)	
			Ingénieurs	Gestionnaires	Ingénieurs	Gestionnaires
Datae Monitoring	Représentation	Accès aux données disponibles dans des bases SQL	Accès aux données en temps réel		Réactivité, contrôle qualité, travail plus axé sur l'analyse et dédié au diagnostic, moins fastidieux, moins redondant	Confiance, sérénité, sécurité, meilleure affectation des budgets d'investissement, niveau de service amélioré, planification facilitée
	Traitement	Prédiction de tendances, Correction de paramètres d'influence (T°C), Seuils et alertes automatique avec envoi de courriels	Interprétation et analyse plus précise, meilleur contrôle sur la gestion des paramètres, réactivité accrue dans le transfert d'informations	Résultats fiables, réactivité accrue dans la prise de décisions		
Datae 2D map	Représentation	Transformation projective simple et multiplans	Meilleure appréciation des résultats, protocoles d'acquisition sur site simplifiés, réduction du temps de mise en forme,	Rendus plus précis, plus intuitif et évolutif, baisse des coûts de travaux de réparation (ciblage dans le temps et l'espace). Baisse du risque de pertes d'exploitation		
	Traitement	Intégration de données par fusion de CND, géostatistique et apprentissage supervisé	Archivage numérique centralisé, nouvelles sources d'informations	Archivage numérique d'une zone de l'ouvrage et des données centralisées (pérennisation des projets)		
Datae 3D map	Représentation	Restitution des données photogrammétriques (format *.obj), interaction avec nuage de points et modèle 3D texturé, projection de données cartographiques et ponctuelles	Meilleure appréciation des résultats, protocoles d'acquisition sur site simplifiés, restitution des données sur des géométries complexes (voutes, piles circulaires, etc.), réduction du temps de mise en forme	Rendus plus précis, plus intuitif et évolutif, baisse des coûts de travaux de réparation (ciblage dans le temps et l'espace) Valorisation de données anciennes (2D --> 3D)		
	Traitement	Idem Datae 2D map	Archivage numérique centralisé,	Archivage numérique de l'ensemble de l'ouvrage et des données centralisées (pérennisation des projets)		
Datae Courburemétrie	Représentation	-	Simplification de la gestion des données	-		
	Traitement	Analyse semi-automatique des cycles de chargement et de déchargement	Réduction des risques d'erreur, temps d'exploitation divisé par 6	-		

Tableau 5.4 Synthèse des apports techniques, des gains directs et indirects générés par l'utilisation du système d'exploitation Datae.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusion

Ce sujet de thèse a été motivé par l'absence d'une solution technique et opérationnelle permettant de représenter et d'analyser l'ensemble des données provenant des différents moyens de caractérisation des ouvrages du génie civil.

Les travaux se sont d'abord intéressés aux supports de représentation des ouvrages dont la nature peut être différente selon le contexte du diagnostic, l'ampleur et l'état d'avancement des pathologies, la taille des zones d'étude et la typologie des données échantillonnées sur la structure. Selon que le diagnostic est réalisé sur un élément ou sur l'ensemble de l'ouvrage, les supports de représentation peuvent varier et correspondre à un simple cliché photographique de la zone auscultée ou à un modèle numérique 3D réaliste obtenu par scanner 3D ou par photogrammétrie. Différents algorithmes de représentation des données ont été développés afin d'interagir sur chaque type de support pour y projeter les données acquises, tant en 2D qu'en 3D.

Dans un second temps, différentes approches statistiques ont permis de mettre en évidence l'importance des techniques d'intégration de données afin de combiner les résultats pour fournir des éléments d'aide à la décision et à l'interprétation des données. Bien que basée sur des hypothèses simplificatrices (valeurs des seuils, planéités des fronts de carbonatation et d'infiltration des ions chlorures), la fusion de CND fournit des cartographies indicatrices du niveau de vigilance à apporter aux zones auscultées et permet ainsi d'aider à la maintenance en raisonnant en termes de critères de risques. Les méthodes géostatistiques ont également montré leur pertinence pour interpoler une variable d'intérêt faiblement échantillonnée dans le champ d'une variable secondaire densément échantillonnée, à condition qu'un lien spatial puisse être établi entre les deux variables concernées. Si le cokrigage permet de fournir une cartographie interpolée de la variable primaire, la simulation séquentielle bayésienne offre de surcroît la possibilité de raisonner en termes de dépassements de seuils et de tenir compte de l'incertitude des résultats. Finalement, la méthode d'apprentissage supervisé par arbre de décision a été testée afin d'estimer un paramètre d'intérêt à partir de résultats disponibles dans une base de données. Malgré le faible nombre de données d'apprentissage disponibles, les données estimées ont correctement restitué les ordres de grandeurs des données mesurées. Ceci met en lumière le potentiel intéressant des méthodes d'apprentissage automatique dans l'intégration des données en génie civil.

Finalement, une solution technique et opérationnelle a été développée sous la forme d'un système d'exploitation modulaire nommé *Datae*. Les principales interfaces et les fonctionnalités de ce logiciel ont montré l'importance de centraliser et de corrélérer toutes les informations disponibles tant au niveau de la restitution des ouvrages que des données servant à réaliser le diagnostic. Les bénéfices provenant de l'utilisation d'une telle solution sont nombreux tant pour les ingénieurs en charge des études de diagnostic que pour les gestionnaires des ouvrages. Outre les améliorations techniques permettant de visualiser et de d'intégrer les données, cet outil permet également de réaliser des gains financiers substantiels et permet de fiabiliser les diagnostics.

6.2 Perspectives

Les perspectives ouvertes par ce projet de doctorat sont nombreuses.

Concernant le système d'exploitation, différentes pistes d'amélioration et de développement sont envisagées. Elles concernent notamment l'ajout de nouvelles fonctionnalités pour s'adapter à de nouvelles problématiques des gestionnaires et à des jeux de données provenant de moyens spécifiques de caractérisation. À titre d'exemple, il est prévu de créer un module dédié à l'exploitation des données d'arbalète. Il pourrait aussi être pertinent de réaliser des tests de *monitoring* 4D en évaluant l'évolution temporelle des déformations structurelles et des désordres visibles, directement sur la différence entre deux modèles 3D d'un même ouvrage, réalisés à deux moments distincts, suffisamment espacés dans le temps (par exemple 1 an).

Le fait que le système d'exploitation soit modulaire permettra également d'étoffer l'éventail des moyens d'analyse et d'élaborer des solutions spécifiques en fonction des contraintes rencontrées et des objectifs formulés par les ingénieurs et les gestionnaires lors du diagnostic des ouvrages.

Une autre perspective intéressante qui pourrait se généraliser aux différents modules de *Datae* serait l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique. Les premiers tests réalisés dans ce projet sur l'intégration des données de CND et de données ponctuelles par apprentissage supervisé ont montré le potentiel prometteur de ces méthodes. La base de données utilisée devra cependant être enrichie au fil du temps afin de consolider les résultats obtenus. Il serait aussi intéressant d'appliquer ces méthodes d'apprentissages aux séries temporelles de données de *monitoring* pour tenter d'estimer l'évolution de certains paramètres sensible (basculement d'une structure par exemple). Les valeurs estimées à l'aide de ces techniques pourraient assez facilement être testées et les résultats comparés rapidement aux données enregistrées compte tenu du flux continu de données enregistrées.

Il pourrait également être intéressant d'utiliser la simulation séquentielle bayésienne en tenant compte de plusieurs variables secondaires densément échantillonnées.

Concernant la diffusion des résultats, une perspective envisagée est de permettre un accès aux informations via une interface web, sous forme d'un visualisateur permettant aux différentes parties prenantes d'un projet d'interagir conjointement.

Finalement, l'utilisation de *Datae* pourrait être étendue à des applications sur des ouvrages du patrimoine bâti.

BIBLIOGRAPHIE

- Advitam (2018) *Sixense Systems - Solutions pour la gestion et la surveillance des infrastructures*. <http://www.advitam-group.com/index.php?language=fr> (Consulté le 29 Oct.)
- Andrade C & Alonso C (2001) On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials* 15(2-3):141-145.
- Andrade C & Alonso C (2004) Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures* 37(9):623-643.
- Azhar S, Khalfan M & Maqsood T (2015) Building information modelling (BIM): now and beyond. *Construction Economics and Building; Vol 12, No 4 (2012): AJCEB Incorporating Special Issue on BIM* 10.5130/AJCEB.v12i4.3032.
- Bernard S, Adam S & Heutte L (2007) Using random forests for handwritten digit recognition. *Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*. IEEE, p 1043-1047.
- Blouin M, Le Ravalec M, Gloaguen E & Adelinet M (2017) Porosity estimation in the Fort Worth Basin constrained by 3D seismic attributes integrated in a sequential Bayesian simulation framework. *GEOPHYSICS* 82(4):M67-M80.
- Bourke P (2018), <http://paulbourke.net/dataformats/ply/> (Consulté le 29 Oct.)
- Bowman A & Foster P (1993) *Density based exploration of bivariate data*. 171-177 p
- Breiman L (1996) Bagging predictors. *Machine learning* 24(2):123-140.
- Breiman L (2001) Random forests. *Machine learning* 45(1):5-32.
- Breyse D, Klysz G, Dérobert X, Sirieix C & Lataste JF (2008) How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Research* 38(6):783-793.
- Carranza EJM & Laborte AG (2015) Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines). *Computers & Geosciences* 74:60-70.
- Civionics (2018) *Percev System - Intelligent Decisions Driven by Intelligent Sensors*. <http://www.civionics.com/sites/default/files/pictures/PercevNode.pdf> (Consulté le 29 Oct.)
- Claprod M, Gloaguen E, Giroux B, Konstantinovskaya E, Malo M & Duchesne MJ (2012) Workflow using sparse vintage data for building a first geological and reservoir model for CO2 geological storage in deep saline aquifer. A case study in the St. Lawrence Platform, Canada. *Greenhouse Gases: Science and Technology* 2(4):260-278.
- Dérobert X, Iaquina J, Klysz G & Balayssac JP (2008) Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & E International* 41(1):44-52.
- Diruy M (1975) *Etude experimentale de phenomenes differes dans les ouvrages en beton precontraint / M. Diruy*. Ministere de l'equipement, Laboratoire central des ponts et chaussees, Paris
- Doyen PM & Boer DLD (1996) *Baysian Sequential Gaussian Simulation of Lithology with Non-linear Data*. Attribué.

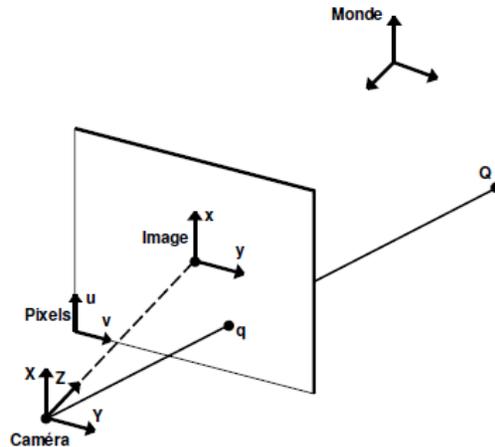
- Dubreuil-Boisclair C, Gloaguen E, Bellefleur G & Marcotte D (2012) Non-Gaussian gas hydrate grade simulation at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada. *Marine and Petroleum Geology* 35(1):20-27.
- Elsener B, Andrade C, Gulikers J, Polder R & Raupach M (2003) Hall-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures* 36(7):461-471.
- Emery X (2012) Cokriging random fields with means related by known linear combinations. *Computers & Geosciences* 38(1):136-144.
- Fauchard C, Antoine R, Bretar F, Lacogne J, Fargier Y, Maisonnave C, Guilbert V, Marjerie P, Thérain P-F, Dupont J-P & Pierrot-Deseilligny M (2013) Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the Pont De Coq, France. *Journal of Applied Geophysics* 98:100-112.
- Fischer A (2014) Deux méthodes d'apprentissage non supervisé: synthèse sur la méthode des centres mobiles et présentation des courbes principales. *Journal de la Société Française de Statistique* 155(2):2-35.
- Frangopol DM & Tsompanakis Y (2014) Front Matter. *Maintenance and Safety of Aging Infrastructure*, (Structures & Infrastructures Series: CRC Press, doi:10.1201/b17073-1 10.1201/b17073-1. p I-L.
- Godart B (2009) *Méthodes de suivi dimensionnel et de suivi de la fissuration des structures : Avec application aux structures atteintes de réaction de gonflement interne du béton : Guide technique*. 60 p
- Heutte L, Bernard S, Adam S & Oliveira É (2008) De la sélection d'arbres de décision dans les forêts aléatoires. *Colloque International Francophone sur l'Écrit et le Document*. (France, 2008-10) Groupe de Recherche en Communication Ecrite, p 163-168.
- Hugenschmidt J (2010) 15 - Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, Maierhofer C, Reinhardt H-W & Dobmann G (Édit.) Woodhead Publishing, Vol 2. p 317-333.
- IFSTTAR & CEREMA (2015) *Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015 [consulté le 25/10/2018]. Cahiers Interactifs, CII1. Disponible sur le web: <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/>*
- Karbhari VM & Ansari F (2009) *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*. Elsevier Science. <https://books.google.ca/books?id= bmjAqAAQBAJ>
- Kim J, Gucunski N, Dinh K & Duong TH (2016) Advanced Integration and 3-D Visualization of Data from Multiple Nondestructive Evaluation Technologies. *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, doi:10.1061/9780784479742.006. p 57-66.
- Kim J, Swartz RA, Lynch JP, Lee J-J & Lee C-G (2010) Rapid-to-deploy Reconfigurable Wireless Structural Monitoring Systems Using Extended-range Wireless Sensors.
- Koch GH, Brongers MPH, Thompson NG, Virmani YP & Payer JH (2001) Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States (Washington D.C.: FHWA, 2001).
- Lanzi L (2009) *La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D: applications aux sciences forensiques*. PhD (Université de Lausanne). 254 p

- Lataste JF, Sirieix C, Breyse D & Frappa M (2003) Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International* 36(6):383-394.
- Latinne P, Debeir O & Decaestecker C (2001) Limiting the number of trees in random forests. *International Workshop on Multiple Classifier Systems*. Springer, p 178-187.
- Lévy B, Petitjean S, Ray N & Maillot J (2002) Least Squares Conformal Maps for Automatic Texture Atlas Generation. *ACM Transactions on Graphics* 21(3):10 p.
- Lowe DG (2004) Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60(2):91-110.
- Maierhofer C, Reinhardt HW & Dobmann G (2010) *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures: Non-Destructive Testing Methods*. Elsevier Science. <https://books.google.ca/books?id=MolwAgAAQBAJ>
- Marcotte D (1991) Cokriging with matlab. *Computers & Geosciences* 17(9):1265-1280.
- Neville AM (2011) *Properties of Concrete, Edition : 5, Prentice Hall, Harlow, England; New York*.
- Nguyen Nt (2014) *Nondestructive evaluation of reinforced concrete structures : study of the spatial variability and the combination of techniques*. (Université de Bordeaux). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01194787> (Consulté le 2014-06-27)
- Ollivier JP & Vichot A (2008) *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées. <https://books.google.ca/books?id=pbLNOWAACAAJ>
- Perozzi L, Gloaguen E, Rondenay S & McDowell G (2012) Using stochastic crosshole seismic velocity tomography and Bayesian simulation to estimate Ni grades: Case study from Voisey's Bay, Canada. *Journal of Applied Geophysics* 78:85-93.
- Ploix MA, Garnier V, Breyse D & Moysan J (2009) "Possibilistic NDT data fusion for evaluating concrete structures". DTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009.
- Polder RB (2001) Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials* 15(2):125-131.
- RILEM-TC-154-EMC (2003) Recommendations of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion - Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures* 36(261):461-471.
- Rodriguez-Galiano V, Sanchez-Castillo M, Chica-Olmo M & Chica-Rivas M (2015) Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. *Ore Geology Reviews* 71:804-818.
- Ruggeri P, Gloaguen E, Lefebvre R, Irving J & Holliger K (2014) Integration of hydrological and geophysical data beyond the local scale: Application of Bayesian sequential simulation to field data from the Saint-Lambert-de-Lauzon site, Québec, Canada. *Journal of Hydrology* 514:271-280.
- Saint-Pierre F, Philibert A, Giroux B & Rivard P (2016) Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials* 125:1022-1027.

- Samson G, Deby F, Garciaz J-L & Perrin J-L (2018) A new methodology for concrete resistivity assessment using the instantaneous polarization response of its metal reinforcement framework. *Construction and Building Materials* 187:531-544.
- Sbartai ZM, Laurens S, Viriyametanont K, Balayssac JP & Arliguie G (2009) Non-destructive evaluation of concrete physical condition using radar and artificial neural networks. *Construction and Building Materials* 23(2):837-845.
- Schnitzler N (2017) *Apprentissage automatique de données multiparamétriques au gisement de sulfures massifs volcanogènes Bracemac-Mcleod, district minier de Matagami, Québec* Maîtrise en sciences de la terre (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec). 115 p. p
- Sehgal A, Kho YT, Osseo-Asare K & Pickering HW (1992) Comparison of Corrosion Rate-Measuring Devices for Determining Corrosion Rate of Steel-in-Concrete Systems. *CORROSION* 48(10):871-880.
- Silverman BW (1986) *Density estimation for statistics and data analysis / B.W. Silverman.* Chapman and Hall, London ; New York
- SIMCO Technologies (2018) *STADIUM® - Portfolio technologique.* <http://www.simcotechnologies.com/fr/notre-expertise/stadium-portfolio-technologique/> (Consulté le 10 Oct.)
- Snavely N (2006) *Structure-from-Motion Algorithm - Bundle Adjustment.* http://vhosts.eecs.umich.edu/vision/teaching/EECS442_2011/lectures/Bundle_Adjustment.pdf (Consulté le 15 Oct.)
- Stern M & Geary AL (1957) Electrochemical Polarization: I . A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. *Journal of The Electrochemical Society* 104(1):56-63.
- Strum P (2015), https://team.inria.fr/steep/files/2015/03/poly_3D.pdf (Consulté le 12 Oct.)
- Tonnoir B (2009) *Mesures de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'Arbalète : Guide technique.* LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC). 23p, tabl., photos en coul., ann. p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00596576>
- Tonnoir B, Briost JJ & Godart B (2014) *Evaluation mécanique des ouvrages d'art par la courburemétrie : Méthode d'essai n° 82.* INSTITUT FRANCAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMENAGEMENT ET DES RESEAUX - IFSTTAR. 21p, bibliogr., graph., fig., photos p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01212843>
- World Corrosion Organization (2018), <http://corrosion.org/> (Consulté le 25 Oct.)
- Zhang Y, O'Connor SM, Linden GWvd, Prakash A & Lynch JP (2016) SenStore: A Scalable Cyberinfrastructure Platform for Implementation of Data-to-Decision Frameworks for Infrastructure Health Management. *Journal of Computing in Civil Engineering* 30(5):04016012.

ANNEXE – PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

La photogrammétrie permet de représenter une scène du monde réel en 3D à partir de prises de vues photographiques 2D. Cette technique nécessite de définir 3 repères distincts tel que présenté sur la figure suivante :



Le repère de la caméra ($X_c Y_c Z_c$), le repère de la photographie (xy ou uv en pixels) et le repère du monde réel. Le point Q dans le repère du monde réel est restitué par le point q dans le repère de l'image.

Ces différents repères sont reliés entre eux de la façon suivante :

Image $\sim K \text{ Ref}_{\text{Camera}}$

Camera $\sim R_t \text{ Ref}_{\text{monde réel}}$

Image $\sim K R_t \text{ Ref}_{\text{monde réel}}$

Avec :

K = matrice de calibration interne (paramètres intrinsèques de la caméra).

R_t = matrice de rotation translation (paramètres extrinsèques de la caméra).

En coordonnées homogènes, le passage du repère de l'image au repère de la caméra s'exprime comme suit :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} k_u f & 0 & k_u x_0 & 0 \\ 0 & k_v f & k_v y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Le passage du repère de la caméra au repère du monde réel s'exprime comme suit :

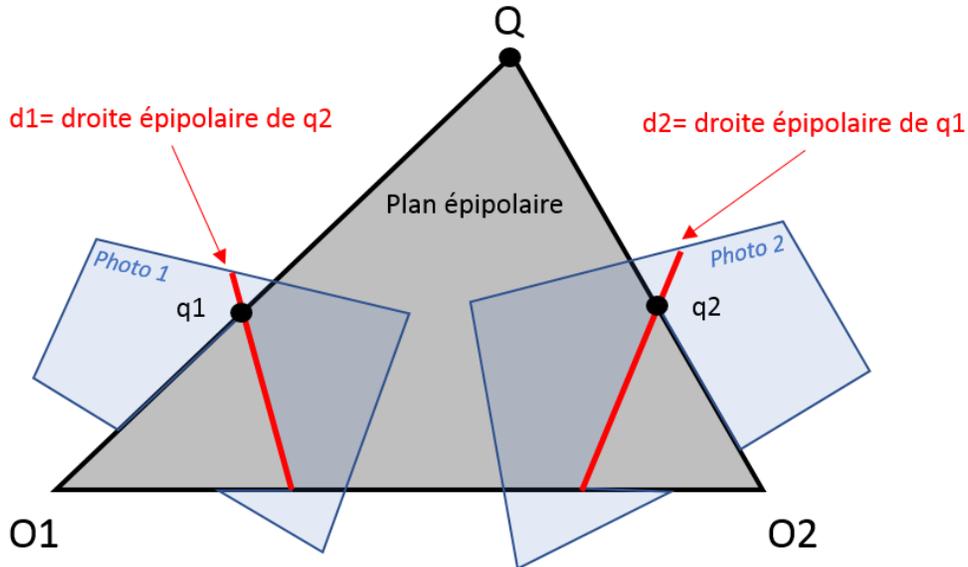
$$\begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} R & -Rt \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^m \\ Y^m \\ Z^m \\ 1 \end{bmatrix}$$

Le passage du repère de l'image au repère du monde réel s'exprime comme suit :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} k_u f & 0 & k_u x_0 & 0 \\ 0 & k_v f & k_v y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & -Rt \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^m \\ Y^m \\ Z^m \\ 1 \end{bmatrix}$$

P=KR(I-t) matrice de projection

Si deux clichés photographiques d'un même point Q sont réalisés depuis deux positions différentes, les points q₁ et q₂ représentent respectivement le point Q sur les deux photographies tel que présenté sur la figure suivante :



Pour deux prises de vues différentes, les matrices de projections des deux caméras peuvent s'écrire :

$$P_1 \sim K_1 R_1 (I - t_1)$$

$$P_2 \sim K_2 R_2 (I - t_2)$$

La droite épipolaire d_2 est associée au point q_1 par la relation suivante :

$$d_2 \sim (K_2 R_2)^{-T} (t_1 - t_2) (R_1^T K_1^{-1}) q_1$$

où F est appelée la matrice fondamentale tel que :

$$F \sim (K_2 R_2)^{-T} (t_1 - t_2) (R_1^T K_1^{-1})$$

Soit :

$$d_2 \sim F q_1$$

La contrainte épipolaire implique que le point q_2 sur la photo 2 (correspondant au point q_1 sur photo 1), doit se trouver sur la droite épipolaire d_2 , c'est-à-dire que le produit scalaire de q_2 et d_2 est nul, soit :

$$q_2^T d_2 = 0$$

où :

$$q_2^T F q_1 = 0$$

De la forme :

$$A f = 0$$

avec :

A = matrice des coordonnées des points similaires (repère photo) de dimension $n \times 9$ tel que :

$$A = \begin{bmatrix} x_2^1 x_1^1 & x_2^1 y_1^1 & x_2^1 & y_2^1 x_1^1 & y_2^1 y_1^1 & y_2^1 & x_1^1 & y_1^1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_2^n x_1^1 & x_2^n y_1^1 & x_2^n & y_2^1 x_1^1 & y_2^1 y_1^1 & y_2^n & x_1^n & y_1^n & 1 \end{bmatrix}$$

et :

f = coefficients de la matrice fondamentale F tel que :

$$f = (F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33})^T$$

En détectant suffisamment de points communs aux 2 images, les coefficients de F peuvent être déterminés (Snavely, 2006). La détection des points de similitude peut être réalisée de manière automatique à l'aide d'algorithme comme le détecteur SIFT (*Scale invariant Feature Transform*) (Lowe, 2004).

Une fois la matrice fondamentale déterminée, il est possible de déterminer les paramètres intrinsèques et extrinsèques des prises de vues à l'aide des matrices de projections et de déterminer la position 3D des points 2D.

Dans la pratique, plus le nombre de points image est important pour un même point objet, plus le modèle photogrammétrique sera précis. Le nuage de points 3D (points objets) ainsi déterminé peut ensuite être triangulé pour permettre la restitution en enveloppe de la structure photographiée.