

Rapport d'une Étude sur les Outils Informatiques pour l'Analyse des Données Obtenues du Système de Surveillance Électronique pour les Ponts Autoroutiers

Ref: 33110R623.1

Par:
David Lau
Ryan O'Connell

Ottawa Carleton Bridge Research Institute
Carleton University

1 Introduction

Présentement, les propriétaires et opérateurs de ponts basent leurs décisions en ce qui a trait à la gestion d'actifs d'infrastructure sur des inspections visuelles, qui sont parfois aidées par des techniques de diagnostics acoustiques, ultrasoniques, et de méthodologies non destructives utilisant les champs magnétiques. Cependant, la méthode d'inspection visuelle, même si elle est aidée par les techniques mentionnées ci-dessus, contient des limitations telles que l'inaccessibilité de certaines parties de la structure, l'incapacité de détecter des dommages cachés, le manque d'informations précises sur la location des dommages, et sa nature périodique. Ces inspections, qui sont entreprises seulement une fois chaque deux ans, sont aussi influencées par l'expérience et le jugement subjectif de l'inspecteur. Alors, il y a un besoin d'améliorer les méthodes de détections de détériorations, le plus tôt possible, quand des démarches plus économiques peuvent être entreprises pour empêcher, ou interrompre le processus de détérioration, permettant la création de meilleurs horaires d'entretiens et de réhabilitation.

Les progrès en technologies informatiques et les développements en instrumentations pour la surveillance des ponts, une méthode alternative pour la mise à jour sur la condition d'une structure est maintenant possible. Une instrumentation intelligente, placée sur une structure, rend possible la collecte de données techniques sur sa condition. Par conséquent, l'instrument crée un large volume de données informatiques, qu'on met du temps à organiser et qui demande beaucoup d'effort pour traiter et faire ressortir les données techniques importantes en ingénierie civile. Un logiciel informatique robuste utilisant la technologie et des techniques modernes peuvent surmonter ces difficultés et réduire les limitations des méthodes courantes d'inspections visuelles avec l'aide d'autres techniques de diagnostics dans le domaine de la gestion des ponts. Cela permettrait de minimiser les efforts requis pour avoir une idée de la performance d'une structure. L'adoption de surveillance électronique des données enregistrées par les détecteurs, dans les structures, va mener à des décisions plus éclairées pour permettre le bon fonctionnement des ponts, et l'établissement de meilleures priorités pour l'allocation des ressources limitées de l'entretien des ponts et d'autres structures, à un coût raisonnable.

Le choix de l'emplacement des détecteurs dépend de la sorte de données nécessaires pour atteindre les objectifs du projet. Les techniques de mesures et les détecteurs qui y sont associés peuvent être utilisés pour observer des phénomènes physiques localisés, ou le comportement structural à un ou plusieurs points d'intérêts sur le pont, et surveiller le comportement structural qui donne une idée de la condition du pont. Par exemple, des détecteurs de fléchissements installés sur des points d'intérêts du pont peuvent observer le comportement d'un joint de dilatation, le comportement du palier, ou l'expansion d'une fissure. Tandis que les jauges de contraintes installées sur les portions critiques du pont peuvent transmettre des informations importantes sur son bon fonctionnement. Cependant, la surveillance localisée du comportement de la structure et des indicateurs de performances ont

des limitations en ce qui a trait à la surveillance complète de la structure. Pour que cette évaluation soit efficace, il faut des connaissances antérieures précises du processus et du siège de la détérioration afin de déterminer où fixer les détecteurs, et à quelle fréquence, comme c'est le cas dans la surveillance de l'expansion de fissures. D'autre part, un système de surveillance globale basé sur une évaluation du comportement de la structure entière peut être plus efficace pour détecter des signes de détériorations ou de dommages le plus tôt possible. La surveillance de la condition d'une structure à base de vibrations peut donner une indication de la condition structurale du pont dépendant du bon positionnement des détecteurs. Un changement dans le comportement de la structure, basé sur les données obtenues à partir d'un pont équipé de surveillance électronique peut être une manifestation de la détérioration dans la structure. Compte tenu de ces informations, d'autres techniques, algorithmes, inspections visuelles sur le site, ou une combinaison des deux méthodes peut être utilisée pour diagnostiquer le problème et identifier plus précisément la zone problématique sur le pont. Par contre, la surveillance globale d'une structure est très sensible à cause du haut niveau de bruits électroniques et d'incertitudes, comparée à la surveillance plus localisée. Pour être capable de surveiller et détecter n'importe quelle variation dans les données informatiques sur le comportement structural, la contribution d'autres facteurs qui ne causent pas de changements à la condition structurale d'un pont doit être déterminée. Quand le comportement global de la structure est connu, des méthodes telles que les méthodes des éléments finis actualisés peuvent être utilisées pour quantifier la détérioration et déterminer la zone où cela se déroule. La région problématique peut être identifiée pour que des méthodes d'inspections plus détaillées puissent être utilisées dans la surveillance des développements futurs. Les leçons apprises, lors d'autres projets de surveillance de ponts, ont démontré que des plans d'instrumentations font souvent appel à des détecteurs pour la surveillance locale et globale.

2 Pratique Courante

De nos jours, la méthode principale utilisée pour la surveillance des infrastructures en génie civile est basée sur la pratique bien établie d'inspections visuelles à des intervalles réguliers. Cette méthode génère de l'information spécifique sur la structure en question, mais celle-ci n'est pas nécessairement accessible à toutes les parties prenantes dans la structure. Pour gérer toutes les données obtenues par le moyen d'inspections visuelles et faciliter leurs utilisations pour la planification des travaux de réparations et d'entretiens, des systèmes informatiques pour la gestion des ponts sont utilisés à tous les niveaux de gouvernements. Ces systèmes informatiques ont évolué de simples archives informatiques à des programmes plus complexes. Ceux-ci sont capables d'inclure des modèles de détériorations ainsi que des outils nécessaires à la prise de décisions de planification. Cependant, ces logiciels à base de données ont été développés principalement pour suivre, utiliser, et manipuler les données d'inspections visuelles. Par contre, ces logiciels n'améliorent pas la fiabilité des résultats, seulement leur disponibilité. Une autre forme de base de données est nécessaire pour organiser, entretenir, et sauvegarder les informations obtenues des structures fixées avec l'instrumentation de surveillance. Par conséquent, certaines fonctionnalités des bases de données informatiques actuelles, seront encore utiles pour combler les besoins du nouveau programme, tels que les

modèles mathématiques, pour estimer la durée de vie d'un pont fixé avec l'instrumentation de surveillance en utilisant les données enregistrées et les rapports d'inspections.

Chaque juridiction provinciale au Canada utilise une forme ou une autre de système informatique pour la gestion de ponts, y compris le Québec, l'Ontario, la Nouvelle-Écosse, l'Alberta, et la Colombie Britannique. Le logiciel de gestion de ponts Ontariens décrit ci-dessous, n'est qu'un échantillon d'un système de gestion de ponts (SGP) à des fins de discussions. Plusieurs systèmes similaires sont actuellement utilisés dans d'autres juridictions en Amérique du Nord et à travers le monde.

Le logiciel de gestion de ponts Ontariens (LGPO) a été développé par le Ministère des Transports de l'Ontario (MTO) pour mieux faciliter les décisions en ce qui a trait à la gestion des ponts. L'objectif principal du logiciel est d'intégrer les activités de gestion sous un seul système (Thompson et al., 2003). Quand les résultats des inspections visuelles sont ajoutés à la base de données du LGPO, ce logiciel peut fournir une estimation des coûts pour chaque alternative développée, soit pour un pont spécifique, ou pour le réseau d'infrastructure entier, ou pour un élément individuel d'un pont. Le logiciel peut aider au développement d'une politique publique pour la gestion des ponts, l'identification des besoins, l'établissement des priorités, et au développement du budget basé sur les alternatives présentées aux utilisateurs. Récemment, le ministère des Transports et des Travaux publics de la Nouvelle-Écosse (TTPNE) a implémenté une version personnalisée du LGPO pour faciliter la gestion de leur inventaire de ponts. Il est clair que le LGPO est adéquat pour satisfaire les besoins du TTPNE puisque certains aspects du *Code Canadien sur le Calcul des Ponts Routiers* y sont déjà incorporés (Speiran et al., 2004).

Six municipalités dans l'ouest du Canada ont conjointement développé un logiciel de gestion de ponts qui offre une méthode rentable pour gérer leur inventaire de ponts (Kriviak, 1999). En utilisant des bases de données statiques et dynamiques qui sauvegardent les données mesurées sur le site en question avec celles obtenues par des inspections visuelles, le logiciel peut attribuer une note de pourcentage pour chaque pont dans l'inventaire de la municipalité. Ainsi, le logiciel peut prédire la stratégie de gestion à plus bas prix pour l'ensemble des structures, ou exécuter une analyse détaillée d'une seule structure.

Un logiciel de gestion de ponts beaucoup utilisé aux États-Unis est Pontis. Avec Pontis, l'utilisateur peut suivre le cycle de vie entier de la structure, commençant par les inspections visuelles jusqu'à la réhabilitation, incluant des prédictions sur son niveau de performance future (Robert et al., 2003). L'utilisation fréquente de Pontis peut être attribuée à la flexibilité du logiciel et à son haut niveau de personnalisation.

BRIDGIT est un logiciel Américain qui a été développé pour donner une aide dans les décisions sur la gestion et les actions de projets possibles pour le réseau de ponts (Hawk, 1999). Les données sur l'inventaire des ponts, les inspections visuelles et les modèles numériques sont inclus dans le logiciel, permettant l'utilisation d'un outil d'analyse pour développer des plans de travail pour une ou plusieurs structures, selon les normes et les pratiques de l'utilisateur.

Au début des années 90, la collecte de données sur les ponts munis instruments de mesures fixés dans ceux-ci pour des raisons spécifiques, telles que les données de performance sismique en Californie ou les données en températures dans les régions froides, était introduite pour obtenir une meilleure compréhension et des connaissances plus précises sur la performance des ponts à certains endroits ciblés. De toute évidence, au cours de sa conception durant les années 90, le Pont de la Confédération avait besoin de spécifications de conception plus strictes qu'un pont typique à cause de sa durée de service de 100 ans et des conditions environnementales sévères dans sa localité. Cela était dû au manque d'informations sur les charges utilisées pour la conception des structures, telles que celles causées par les véhicules, le vent, le mouvement de la glace, et les tremblements de terre. Pour vérifier les hypothèses et les paramètres utilisés dans la conception et obtenir de l'information sur sa performance à court et long termes, un système de surveillance intelligente avait été développé durant la phase de conception et installé durant la construction du pont. Le système de surveillance inclut un programme de collecte de données automatique et continue qui est en fonctionnement depuis l'ouverture du pont en 1997. Les instruments et appareils de surveillance ont été développés par une équipe de recherche menée par le « Ottawa-Carleton Bridge Research Institute » (OCBRI). Un large volume de mesures et de données d'une grande importance sur la performance du pont ont été récoltées depuis son ouverture en 1997 qui requièrent beaucoup d'efforts des enquêteurs, des opérateurs de ponts privés, et des propriétaires (les gouvernements) pour organiser et évaluer les données récoltées afin d'obtenir l'information pertinente en ingénierie dans ce premier cas d'un grand projet public « Build, Operate, Transfer » (BOT) en infrastructure au Canada. Le système de surveillance du Pont de la Confédération avait été développé dans le but à long terme d'établir une base de données pour l'évaluation de sa santé future en utilisant les données et les tendances de son comportement pour minimiser les coûts d'entretiens et de réparations au cours de sa durée de vie et pour aider à maintenir son bon fonctionnement au cours des 35 années à venir. Tandis que le logiciel avait été développé au départ pour tracer, organiser, traiter et analyser les données, il était déterminé durant le développement du projet qu'un logiciel plus robuste avec la capacité et la possibilité d'expansion serait requis pour une application facile dans des projets futurs de surveillance des ponts. Ainsi, le logiciel qui avait été développé au début pour satisfaire aux besoins de la surveillance du Pont de la Confédération, a été amélioré afin d'avoir la capacité d'expansion requise pour être utilisé dans d'autres projets de surveillance des ponts.

3 Développements Courants

Une étude récente par l'Administration d'Autoroute Fédérale aux États-Unis a découvert que seulement 68% des évaluations sur la condition des ponts, basées sur les inspections visuelles, sont précises (Li et al., 2008). Ces découvertes évoquent la possibilité de sérieuses conséquences pour le reste des structures qui n'ont pas d'évaluations complètes sur leur état. Pour améliorer la fiabilité des évaluations des ponts, la surveillance électronique de structures a attiré beaucoup d'attention au cours de la dernière décennie. Ces structures instrumentées peuvent être équipées pour mesurer les réactions statiques et dynamiques. L'enregistrement des données statiques tels que les températures, fléchissements, contraintes, et la corrosion

etc., permet l'analyse des tendances de la structure pour prédire son comportement futur et estime les besoins en entretiens au fil du temps. La surveillance permet l'acquisition de plus de connaissance sur la condition et la performance d'un pont. Par exemple, les détecteurs de déplacements localisés peuvent surveiller le comportement des joints de dilatations, ou le blocage des joints peut être détecté.

Récemment, la discussion sur la surveillance de la condition structurale à base de vibrations (SCSBV) a reçu une attention considérable comme une nouvelle méthode d'évaluation de structures instrumentées plus fiable afin de mieux détecter les premiers signes de détériorations, localiser et quantifier les dommages dans la structure. Les techniques SCSBV évaluent la condition d'une structure et sa performance à partir des données sur son comportement. En utilisant l'hypothèse que les caractéristiques de la masse et de la rigidité de la structure restent constantes, n'importe quels changements détectés dans les caractéristiques modales, qui sont dépendantes des caractéristiques physiques du pont, doivent être une manifestation de dommages possibles ou de la détérioration de la structure. Comme cela a été démontré dans des études, la température et les effets environnementaux peuvent avoir une grande influence sur la fiabilité d'une évaluation de la condition d'une structure utilisant les techniques SCSBV (Londono, 2006), l'intégration des données de surveillance sur les températures et conditions environnementales dans la zone où est situé le pont et les données des réactions aux vibrations du pont sont importantes pour obtenir des résultats fiables. Pour le projet de surveillance du Pont de la Confédération, les instruments utilisés tels que les détecteurs statiques et dynamiques enregistrent les réactions structurales causées par la température, les changements dans les caractéristiques des matériaux, les charges causées par la glace, les vibrations causées par le vent, la circulation et les séismes, et la corrosion. Il faut reconnaître qu'il existe une relation entre les différentes réactions causées par les charges. Le système d'instrumentation et du processus de collection de données de toutes les zones du pont sous surveillance est intégré, et les informations récoltées sont utilisées pour créer une base de données sur le comportement et la performance du pont. Par exemple, les données sur les températures et les conditions environnementales du vent sont utilisées pour établir le lien et la variabilité précis dans les caractéristiques modales du pont. Celles-ci sont importantes pour s'assurer de la fiabilité et de la facilité d'utilisation des techniques SCSBV pour des évaluations structurales exactes sur le site.

En ce qui concerne la surveillance des ponts utilisant les méthodes de vibrations, puisque les données sur les charges d'excitations sur la structure ne sont pas connues, des techniques d'identification de systèmes spéciales sont requises pour analyser les données de vibrations mesurées. En général, ce sont des données antécédentes sur l'accélération qui sont utilisées pour obtenir les caractéristiques modales dynamiques du pont. Les données sur les réactions du pont aux vibrations ambiantes sont traitées et analysées afin d'obtenir les caractéristiques modales. Toutes variations dans les caractéristiques modales qui ne sont pas liées à la relation établie entre celles-ci et les variations dans les conditions environnementales et opérationnelles au site du pont, sont éventuellement utilisées comme données pour l'algorithme de détection de dommages. Présentement, l'évaluation d'une structure par méthode de vibration est utilisée sur plusieurs structures pour vérifier les paramètres de la

conception et établir des paramètres opérationnels et leurs écarts de variation. Pour déterminer ces paramètres, des techniques d'identification des systèmes doivent être développées. Plusieurs algorithmes ont été développés; l'identification de subspace stochastique a été découverte comme étant la plus fiable et donnant des résultats plus consistants (Londono, 2006). Un nouvel algorithme, p-LSCF (polyreference least squares complex frequency estimator) (Peeters et al., 2004), a été récemment développé facilitant la détermination automatique des paramètres modaux, qui requiert aucune intervention de la part d'un analyste pour choisir les paramètres d'entrées dans le processus d'analyse de données (Lanslots et al., 2004). Cela réduit la subjectivité et augmente la rapidité et la fiabilité des résultats.

Au cours des années précédentes, en utilisant l'expérience acquise dans le projet de surveillance du Pont de la Confédération, l'équipe de recherche OCBRI a continué de développer le logiciel de surveillance qui inclut les données de mesures statiques et dynamiques dans une plate-forme informatique à base modulaire. Le but de la plate-forme informatique est de créer la compatibilité entre celle-ci et d'autres logiciels de surveillance des ponts instrumentés. Grâce aux efforts déployés, cet outil précieux a été développé pour combler les besoins identifiés des grands projets de surveillance complexes. Il a été validé pour être appliqué sur le site contrairement aux autres logiciels qui sont principalement des outils de recherches.

Un autre grand effort de l'équipe OCBRI est le développement d'une plate-forme de réseaux informatiques pour la gestion des ressources informatisées distribuées géographiquement pour la surveillance de différents lieux dans un réseau autoroutier. Puisque l'efficacité et la fonctionnalité d'un réseau autoroutier dépendent du bon fonctionnement de chaque élément, un réseau distribué géographiquement pour le traitement des données est nécessaire. Avec une plate-forme de base de données, le réseau informatique permettra une gestion plus efficace et facile de l'inventaire des ponts qui couvrent un vaste territoire, et aussi l'entreposage centralisé des données mesurées et des logiciels.

4 Logiciel de Surveillance des Ponts

Pour faciliter la surveillance efficace d'infrastructures civiles, un programme informatique robuste est requis, qui combine l'enregistrement, l'entreposage, le traitement, l'analyse, et la projection de données. Quatre principaux types de logiciels existent pour la surveillance électronique: logiciel du fabricant des matériaux, logiciel de surveillance développé commercialement, logiciel développé pour un projet spécifique, et logiciel adaptable. Chaque type de logiciel offre ses propres avantages et désavantages.

4-1 Logiciel du Fabricant des Matériaux

Les fabricants de logiciels et d'équipements de surveillance, tels que Campbell Scientific et National Instruments, fournissent un logiciel avec leurs équipements de

surveillance. Ce programme informatique est typiquement limité et manque de flexibilité de sorte que le logiciel et l'interface graphique fonctionnent seulement avec l'équipement fourni et les formats des données élémentaires. Ce type de logiciel est trop simple et manque de capacité et de fonctionnalité comparé au type de logiciel examiné dans cette étude de faisabilité.

4-2 Logiciels de Surveillance de Structures Générales

Il existe plusieurs programmes informatiques développés commercialement pour la surveillance de systèmes d'ingénieries mécanique et aéronautique. Récemment, certains de ces programmes informatiques ont été adaptés pour des applications en génie civil et d'autres programmes informatiques ont été développés spécifiquement pour la surveillance des structures civiles. Certains de ces programmes sont décrits ci-dessous.

BRIMOS

Vienna Consulting Engineers a développé BRIMOS (Vienna Consulting Engineers, 2008) avec la capacité de traiter et d'analyser les données sur les vibrations ambiantes de la structure afin d'utiliser cette information pour la détection et la localisation de dommages en utilisant l'identification des systèmes. Le logiciel compare les caractéristiques dynamiques récentes avec des données de références pour observer n'importe quel changement dans celles-ci. Ce logiciel est présentement utilisé sur plusieurs structures, incluant le Pont Rosen près de Tulin et le Pont Europa près de Innsbruck.

DEWESoft

Un programme informatique a été développé par DEWESoft pour traiter les données récoltées des réactions structurales causées par les vibrations, mouvements, températures etc. (DEWESoft, 2007). La plate-forme DEWESoft a la capacité d'enregistrer des données à haute et basse vitesses simultanément, permettant une combinaison des différents types de mesures enregistrées. Une vitesse d'écriture de 80 MB/s permet l'entreposage de larges fichiers créés par des événements dynamiques. Des affichages graphiques personnalisés sont possibles, permettant l'utilisateur de tracer et surveiller les données dans un projet d'une façon spécifique. Le programme de DEWESoft est présentement utilisé sur le Pont Straslund en Allemagne et le Pont des Stonecutters en Chine.

BridgeWatch

BridgeWatch a été développé par USEngineering Solutions pour récolter et traiter des données obtenues des stations météorologiques et d'autres appareils, en temps réels (USEngineering Solutions, 2008). Le logiciel est capable d'envoyer des alertes électroniques aux personnels responsables si une évaluation des données détermine que la charge est critique à cet instant.

Straininstall

Straininstall a développé un programme informatique qui peut être utilisé pour évaluer des paramètres structuraux tels que la contrainte, la charge, la température, l'inclinaison, et l'affaissement (Straininstall, 2005). Le système peut détecter les changements en contrainte dans le cisaillement, la variation dans la largeur des fissures dans le béton, les vibrations dans les poutres en acier, ou les mouvements relatifs entre différents éléments de la structure. Toutes données enregistrées peuvent être accessibles en utilisant un site web contrôlé par un mot de passe, permettant une distribution de données efficace, selon les besoins des parties prenantes.

4-3 Logiciel pour un Projet Spécifique

Une pratique commune dans des projets de surveillance de ponts précédents est le développement d'un logiciel conçu spécifiquement pour les critères et les besoins de la structure considérée. Ce type de logiciel de surveillance a été utilisé dans plusieurs projets, incluant les exemples suivants.

Le Pont Oresund qui relie le Danemark à la Suède a été équipé d'un système de surveillance qui inclut un programme informatique conçu pour ce projet (Peeters et al., 2003). Un algorithme muni d'un déclencheur γ a été implémenté pour enregistrer les données dynamiques si certains seuils prédéterminés ont été excédés, tandis que les données statiques sont entreposées séparément, et il informe par voie électronique les personnes responsables. Une interface graphique séparée surveille et affiche l'état des circuits de données, rendant disponible aux opérateurs du pont un diagnostic sur le système de surveillance.

Un système de surveillance sur la santé structurale a été implémenté dans le Pont Shandong Binzhou Yellow River, un pont à haubans en Chine (Li et al., 2006). Le logiciel a été développé spécialement pour la structure en format LabVIEW. Pour limiter le montant de données enregistrées, des valeurs de seuils ont été établies et implémentées pour consigner les événements extrêmes associés aux ouragans et aux typhons. Les paramètres de procédures d'acquisitions de données peuvent être modifiés via Internet, permettant un contrôle flexible pour les utilisateurs. La détection de dommages a été incluse dans le programme, utilisant la méthode courbure modale, un modèle des réactions de la structure aux variations de la fréquence, et la technique de fusion des données. L'information sur la contrainte, les déplacements, et les charges de tensions dans les câbles est disponible pour chaque élément de la structure. Suivant la détection des dommages, une estimation de la capacité de charge du pont peut être déterminée en utilisant les méthodes d'éléments finis actualisés.

Le pont autoroutier de la Baie de Shenzhen qui relie Shenzhen et Hong Kong a été équipé d'un système de surveillance dans le but de donner de l'aide pour la gestion et l'entretien du pont (Li et al., 2008). La charge dans les câbles de la structure du pont à haubans est le point central du système de surveillance. Plusieurs affichages graphiques ont été développés pour le système de surveillance, tels que: l'entretien des bases de données, la collecte des données, un

modèle à 3D de l'endroit où se trouve l'équipement de surveillance et sa gestion, un affichage vidéo, statistiques sur la circulation, surveillance du système électrique, système d'avertissement précoce, et évaluation de la sécurité structurale. L'affichage pour la sécurité structurale exécute l'identification des dommages sur la structure via l'identification modale et l'analyse à éléments finis. Il est aussi utilisé pour évaluer la tenue en service de la structure afin de donner une estimation de la fatigue dans les poutres caissons en acier. Pour aider à l'entretien et à la gestion de la structure, des rapports hebdomadaires, mensuels, et annuels sont créés par le système.

Le système de surveillance de santé structurale et de vent (SSSSV) a été implémenté sur le Pont Tsing Ma au Hong Kong (Wong, 2003). Il est utilisé pour prédire la réaction de la structure à certains événements extrêmes (Wong, 2003), sa durée de vie, et les dommages causés par la fatigue (Chan et al., 2001). Le système a été divisé dans 5 sous-catégories pour faciliter l'enregistrement, le traitement et l'analyse des données: systèmes sensoriels, systèmes d'acquisitions de données, systèmes de traitements et d'analyses de données, opérations, et systèmes de réseaux informatiques (Wong et al., 2000).

Le projet de surveillance à long terme du Pont de la Confédération au Canada possède un logiciel développé par le « Ottawa-Carleton Bridge Research Institute » (OCBRI) à l'Université Carleton, pour traiter particulièrement un large volume de données récoltées par les détecteurs installés sur le pont, incluant des thermocouples, des anémomètres, des jauges de contraintes, des inclinomètres, des détecteurs de corrosions, et des accéléromètres. Le logiciel est utilisé pour informer des changements dans les réactions de la structure causés par les charges ambiantes et les conditions environnementales de l'endroit où le pont est situé.

Durant de sa réhabilitation majeure en 1998, le Pont Plaza qui appartient et entretenu par la ville d'Ottawa, avait été équipé d'un système de surveillance continu. Une large variété de détecteurs étaient installés pour surveiller la température, la contrainte, les déformations et rotations, la corrosion, ainsi que la pénétration de l'humidité. L'équipe de recherches à OCBRI a développé un logiciel de surveillance et implémenté des outils pour le traitement des données automatiques afin de récolter, transmettre, traiter, et analyser celles-ci. Ce logiciel est une version simplifiée du système de surveillance du Pont de la Confédération. Il possède un système d'avertissement pour les détecteurs de la contrainte et de la température, avec des seuils déterminés à l'avance. Si les données obtenues par les détecteurs dépassent le niveau de prudence, une alerte jaune est envoyée aux personnes responsables, mais si elles dépassent le niveau d'actions requises, une alerte rouge est envoyée.

4-4 Logiciel Adaptable

Pour répondre aux besoins et aux exigences de traitements, d'analyses et de gestion d'un grand volume de données, particulièrement pour un réseau de ponts où plusieurs sont équipés d'instruments pour la surveillance, un programme informatique adaptable, évolutif et expansible est nécessaire. Un programme informatique ouvert pouvant être amélioré en y ajoutant de nouvelles fonctionnalités de manipulation et une plus haute capacité de traitement

de données, assurerait la viabilité et la stabilité du logiciel à long terme. Il aiderait aussi à réduire le temps requis pour la formation des utilisateurs. Le logiciel SPPLASH (Signal Processing Platform for Analysis of Structural Health en anglais), qui a été développé initialement pour le projet de surveillance du Pont de la Confédération, est un exemple d'un tel programme informatique ouvert adaptable.

SPPLASH

L'approche modulaire du SPPLASH permet l'implémentation de nouveaux détecteurs, de nouvelles interfaces graphiques, et de nouveaux outils d'analyse d'une manière simple et franche, lui permettant de devenir un logiciel indépendant de la structure où il est utilisé. Avec son approche à concept ouvert, SPPLASH peut être facilement adapté en vue d'organiser, traiter, et analyser les données mesurées et surveiller d'autres ponts instrumentés dans le réseau de transport. Présentement, le logiciel contient une série d'outils ou modules pour traiter, analyser, et interpréter un large ensemble de données récoltées grâce à la surveillance continue sur la contrainte, l'effet de la température et sa variation dans les membres structuraux, la corrosion, les charges glaciales et les réactions de la structure aux vibrations causées par la circulation, le vent et les tremblements de terre. Il contient aussi une panoplie d'outils pour l'extraction d'informations pertinentes des données instantanées en ingénierie, ou de la base de données historiques des réactions ou de la performance du pont le plus rapidement possible. Le logiciel couvre tous les aspects de la manipulation des données; de la gestion, du traitement et l'analyse des données pour une visualisation de celles-ci, et des résultats d'analyses. Cette information peut être utilisée potentiellement pour offrir de l'aide aux utilisateurs dans les décisions sur l'opération et la gestion de la structure surveillée. Les outils du logiciel ainsi que l'interface graphique réduisent considérablement le temps et les efforts nécessaires pour obtenir des résultats numériques et les conclusions d'observations sur les données de surveillance. La disponibilité des données statiques et dynamiques synchronisées, forment ensemble une unité de données compréhensives, donnent une meilleure description du comportement de la structure surveillée en entier et une meilleure compréhension de sa performance. Pour une détection des dommages précise et une évaluation fiable de la condition des ponts instrumentés sur le site, une détermination exacte des caractéristiques modales et de leur sensibilité aux conditions environnementales et opérationnelles au site du pont est essentielle. La température du pont peut affecter ses caractéristiques de vibrations modales, et la condition du vent et du courant de la rivière au site du pont ainsi que les différents scénarios de charges causées par la circulation véhiculaire au moment où les données ont été mesurées, peuvent avoir un impact significatif sur le bruit et le niveau d'incertitude de l'information en ingénierie obtenue des données mesurées. Le programme informatique SPPLASH, conçu pour répondre aux exigences du système de surveillance compréhensif du Pont de la Confédération, est composé de bases de données statiques et dynamiques corrélées.

Les modules fonctionnels du SPPLASH sont présentés dans la Figure 1. Avec sa conception modulaire, d'autres modules peuvent être développés et facilement ajoutés au programme pour entreprendre de nouvelles tâches à l'avenir. Un autre avantage de sa conception modulaire est le fait que son architecture peut être facilement adaptée pour profiter de la

puissance informatique croissante, comme les ordinateurs à processeurs parallèles ou multiprocesseurs. Par exemple, des modules qui exécutent des tâches intensives pour l'unité centrale (CPU), comme le traitement des données, l'identification des systèmes, et la visualisation en 3D peuvent être exécutés par des processeurs dans un ou plusieurs ordinateurs dans le réseau informatique réservés pour ces tâches. Les modules de traitement et de visualisation du SPPLASH sont conçus pour avoir la capacité de fonctionner en temps réel, permettant l'animation presque instantanée des réactions du pont, tels que les déplacements, limitée par la vitesse du réseau informatique.

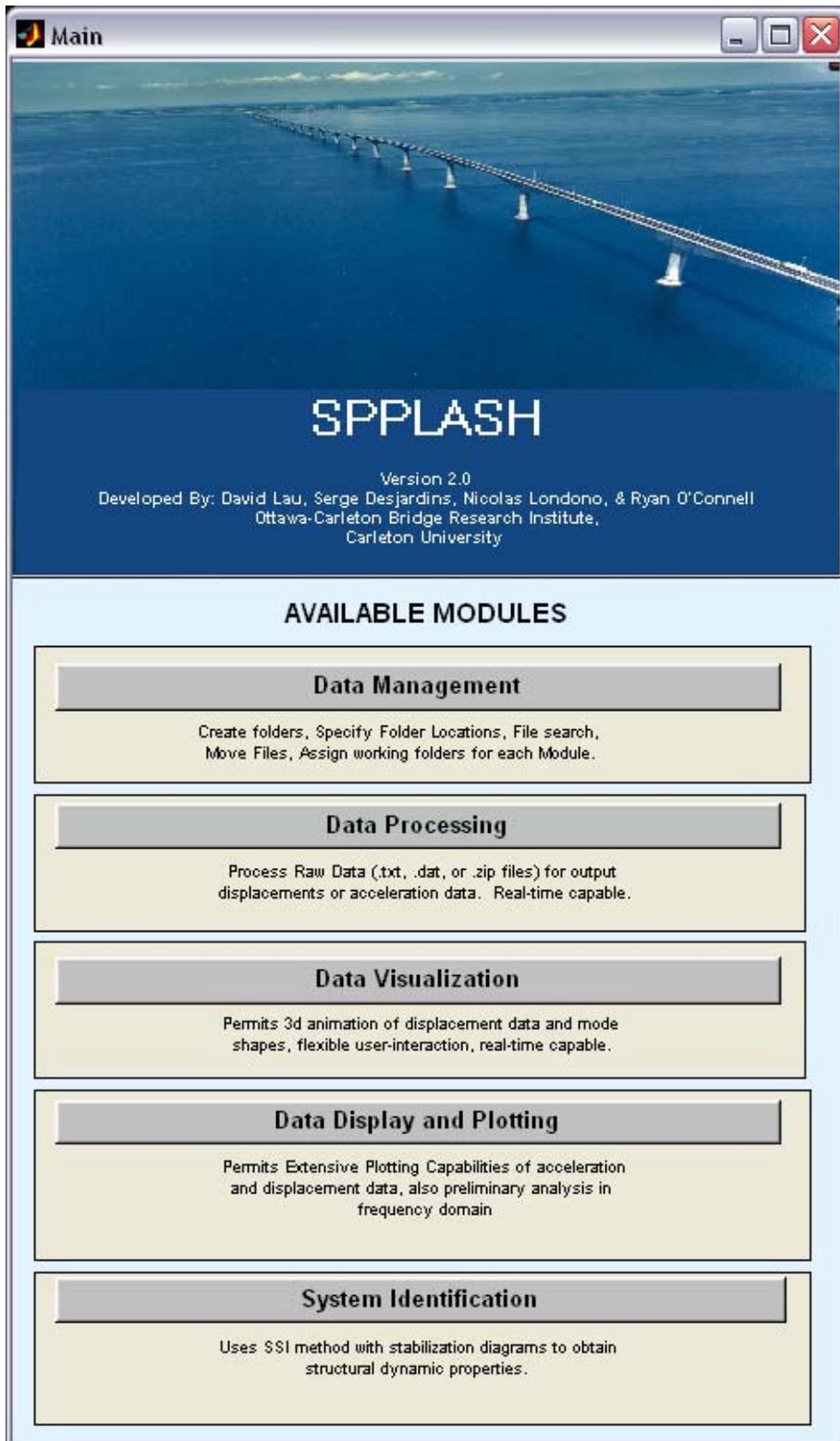


Figure 1: Menu Principale des Fonctions du SPPLASH

5 Logiciel de Surveillance et de Gestion pour Réseau d'Infrastructures de Ponts

Actuellement, les problèmes en infrastructures de ponts sont compartimentés. Des pièces isolées de la solution peuvent être trouvées dans des secteurs séparés: de la conception et la construction, l'entretien et la réparation, la surveillance, la gestion d'actifs, jusqu'à la politique publique et la planification. L'approche courante en ingénierie de ponts ne facilite pas le transfert d'informations et de connaissances. Plusieurs outils actuels sont développés et utilisés seulement dans des secteurs isolés en ingénierie de ponts. Étant donné que dans cet environnement fragmenté, avec la complexité et l'ampleur des problèmes en gestion de divers mélange de vieux et nouveaux ponts dans un réseau autoroutier, l'innovation et une approche intégrée sont nécessaires pour joindre les pièces non reliées du casse-tête dans un système unifié. Le développement présent et futur d'un programme de réseau informatique pour la gestion et le traitement des données avec un ensemble d'outils pour l'analyse des ponts instrumentés, est d'intérêt spécial dans cette étude de faisabilité.

L'équipe de surveillance du Pont de la Confédération, dirigée par l'OCBRI à l'Université Carleton, développe actuellement un logiciel plus efficace pour la gestion des données et des informations. Ce logiciel utilise une architecture de réseau de télécommunication via Internet à haute vitesse permettant un accès standardisé aux données ainsi que des protocoles d'échange d'informations pour la gestion intelligente des ponts. Plusieurs ressources incluant des centres informatiques, d'entrepôts de données et de communications, des détecteurs, et des algorithmes de collection de données peuvent être acheminées via un réseau distribué géographiquement, par l'entremise d'un programme informatique. Les ressources seraient disponibles aux utilisateurs autorisés et à ceux qui sont responsables de la gestion et du fonctionnement du pont à travers une interface graphique efficace et sécuritaire pour fournir de la connectivité entre les données et les ressources informatiques nécessaires pour le traitement et la gestion. Les utilisateurs du logiciel reçoivent un accès aux données ainsi qu'aux outils et ressources informatiques fiable pour leurs analyses en temps opportun, même si ils sont séparés par de grandes distances. Divers services peuvent être fournis par un intergiciel, incluant la découverte, l'allocation, et la programmation d'horaire des ressources informatiques pour satisfaire aux requêtes spécifiques soumises par les utilisateurs en utilisant l'interface graphique. Une interface de gestion pour le logiciel intermédiaire peut être incluse dans la gestion et l'administration du système ainsi qu'une interface de réseau d'informatique pour communiquer entre le logiciel intermédiaire et les diverses données et centres de ressources.

Les développements technologiques dans plusieurs domaines reliés à l'acquisition de données sur la santé structurale, aux méthodologies d'identification des systèmes, et aux algorithmes de détection de dommages devraient être complétés avec un développement parallèle en manipulation de données, et en outils informatiques simples et pratiques pour l'utilisateur. Cela faciliterait l'adoption plus répandue de la pratique de surveillance électronique de la santé structurale des ponts, du partage d'informations et de connaissances entre les ingénieurs, les opérateurs, et les propriétaires de ponts. Cette approche aurait un impact plus efficace pour réduire les coûts d'entretiens et de gestion d'infrastructures en ponts,

incluant la surveillance de l'état des ponts âgés. Du point de vue de l'utilisateur, le but principal d'une plate-forme et d'outils informatisés est de simplifier et de faciliter le processus d'extraction d'informations importantes à partir des données de surveillance en ingénierie. Des interfaces graphiques efficaces pour l'utilisateur sont des pièces essentielles dans un système avancé de surveillance. Celles-ci facilitent l'évaluation précise de la condition d'une structure surveillée, soit sur une base continue, ou immédiatement après un événement extrême, tels qu'une surcharge causée par un tremblement de terre, un déluge, un ouragan ou un impact d'accident de trafic maritime.

6 Développement de Logiciel pour la Surveillance des Ponts

Basé sur le sondage et l'étude de faisabilité contenus dans ce rapport, il est déterminé que le logiciel actuellement disponible ne peut satisfaire les critères du MTQ pour leurs plans courant et futur de surveillance électronique des ponts autoroutiers, comme ils sont définis dans le document officiel du projet (MTQ, 2009). Pour satisfaire aux exigences du MTQ et fournir un logiciel de surveillance flexible et expansif pour la manipulation des données électroniques des projets actuels de l'Autoroute 30 (Section Ouest) ainsi que les données mesurées sur le site des projets d'instrumentation précédents, la plate-forme informatique SPPLASH est considérée comme étant la plus adéquate. Un plan de travail pour l'adaptation du logiciel SPPLASH qui remplit les conditions et les spécifications du MTQ pour la surveillance électronique des ponts instrumentés est exposé ci-dessous.

En utilisant l'expérience acquise dans le projet de surveillance du Pont de la Confédération, il est déterminé que des aspects cruciaux de ces projets sont l'entretien, la viabilité et la fiabilité à long terme de la plate-forme informatique qui est utilisée pour le traitement, l'analyse, et l'organisation des données de surveillance et de l'entretien de la base de données. Une approche de l'industrie standardisée est importante dans le développement du logiciel.

Il y a plusieurs variables qui peuvent éventuellement affecter les paramètres structuraux prélevés des données de vibrations ambiantes récoltées des ponts. Des sources de variabilités potentielles doivent être identifiées et classifiées. Évidemment, certaines sources peuvent être plus importantes que d'autres, et leur importance relative est unique pour chaque projet de surveillance. Si la détection de dommages doit être implémentée de façon fiable, toutes sources significatives de variabilités doivent être comprises et expliquées. Ces sources de variabilités peuvent être groupées dans deux catégories majeures:

- Environnementales et fluctuations en charges
- Modélisation, mesures et incertitudes informatiques

En tenant compte de la variabilité dans les données de surveillance, un système de surveillance continue doit être déployé pour saisir des caractéristiques détaillées et des motifs de variabilités dans les données (Londono, 2006).

Figure 2 illustre la circulation des données à travers la plate-forme informatique proposée. Au fur et à mesure que les données sont récoltées des ponts instrumentés, les informations

obtenues par l'enregistreur de données sont sauvegardées dans une base de données non traitée, après quoi elles peuvent être traitées et analysées ultérieurement. Les données non traitées peuvent être exportées à ce moment-là, permettant l'analyse par un logiciel externe, tel qu'un tableur. Le fonctionnement du traitement des données décrit dans la Figure 3, est suivi de leur analyse, incluant leur manipulation afin d'en extraire l'information désirée en ingénierie. Celle-ci peut être aussi visualisée ou tracée pour faciliter son interprétation physique ou fournir une alerte précoce pour que des actions et des mesures de mitigation puissent être entreprises. Un autre module crée des rapports en ingénierie qui résument les données et les informations pertinentes dans un format concis, avant que celles-ci soient emmagasinées dans une base de données traitée sur la performance et les réactions de la structure. Une description du fonctionnement de chaque module individuel est présentée ci-dessous.

6-1 Enregistrement des Données

Pour minimiser le nombre de données à traiter et à analyser, l'utilisation de mécanismes dynamiques de données à été prouvée comme étant une méthode fiable d'acquisition pour la surveillance d'infrastructures civiles. Un algorithme déclencheur correctement implémenté, exécute la collecte des données quand les relevés des détecteurs surpassent une limite prédéterminée. Pour s'assurer de l'enregistrement complet de l'événement dynamique, un court segment de données (mémoire tampon) avant l'événement est inclus dans l'ensemble des données dynamiques. Pour permettre la récolte des données durant des tests de charges, la calibration du système de surveillance, ainsi que la validation du système d'acquisition, un déclencheur manuel est aussi incorporé dans l'algorithme de déclenchement.

6-2 Traitement des Données

Le traitement des données mesurées comprend plusieurs fonctions comme l'indique la Figure 3. Au départ, le fichier des données récupérées doit être converti aux formats appropriés, tels que ASCII, binaire, « tab-separated values » (TSV), ou « comma-separated values » (CSV), selon les critères des ensembles d'outils. Si les fichiers proviennent de multiples enregistreurs de données, l'information doit être organisée dans des ensembles de données cohérents. Généralement, les ensembles des données sont des événements qui se produisent durant une période de temps déterminée. Chaque ensemble de données est ensuite validé pour éliminer toute information fautive ou erronée. L'ensemble des données peut être réduit (ou augmenté) aux unités d'ingénierie désirées avant d'être échantillonné de nouveau à un intervalle commun et la quantité des données peut être réduite si cela est nécessaire pour améliorer la rapidité de l'analyse. Le rythme de 100 à 250 Hz est souvent utilisé dans l'enregistrement des données afin d'obtenir une bonne résolution dans la bande de fréquence concernée pour les ponts à modes vibrationnels entre 0 et 20 Hz. Pour empêcher le crénelage des données, des techniques filtrantes, pouvant être composées de filtres Bessel ou Chebyshev, de filtres à réaction aux impulsions finies ou infinies etc., sont souvent utilisées.

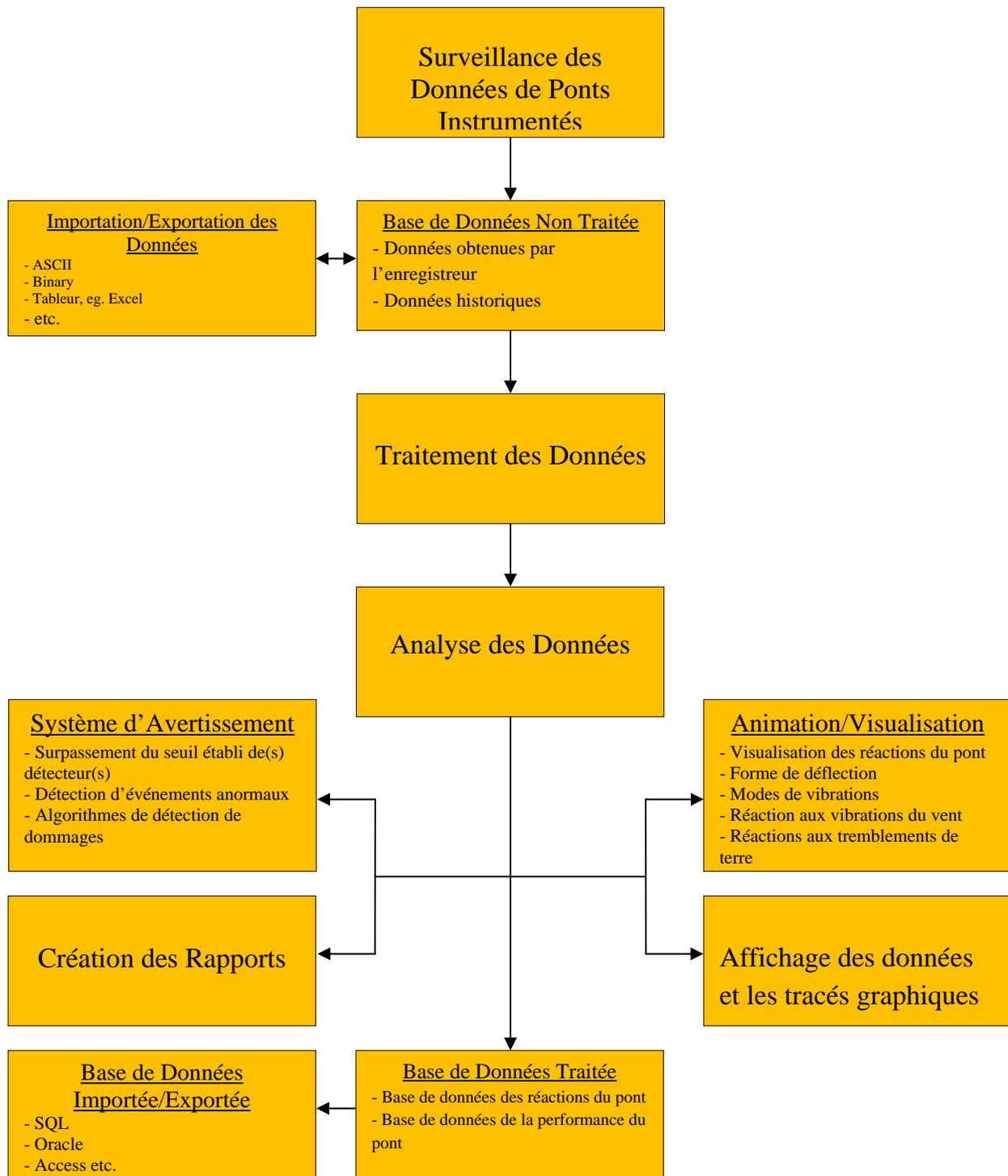


Figure 2: Schéma de l'Organisation du Logiciel de Surveillance des Ponts

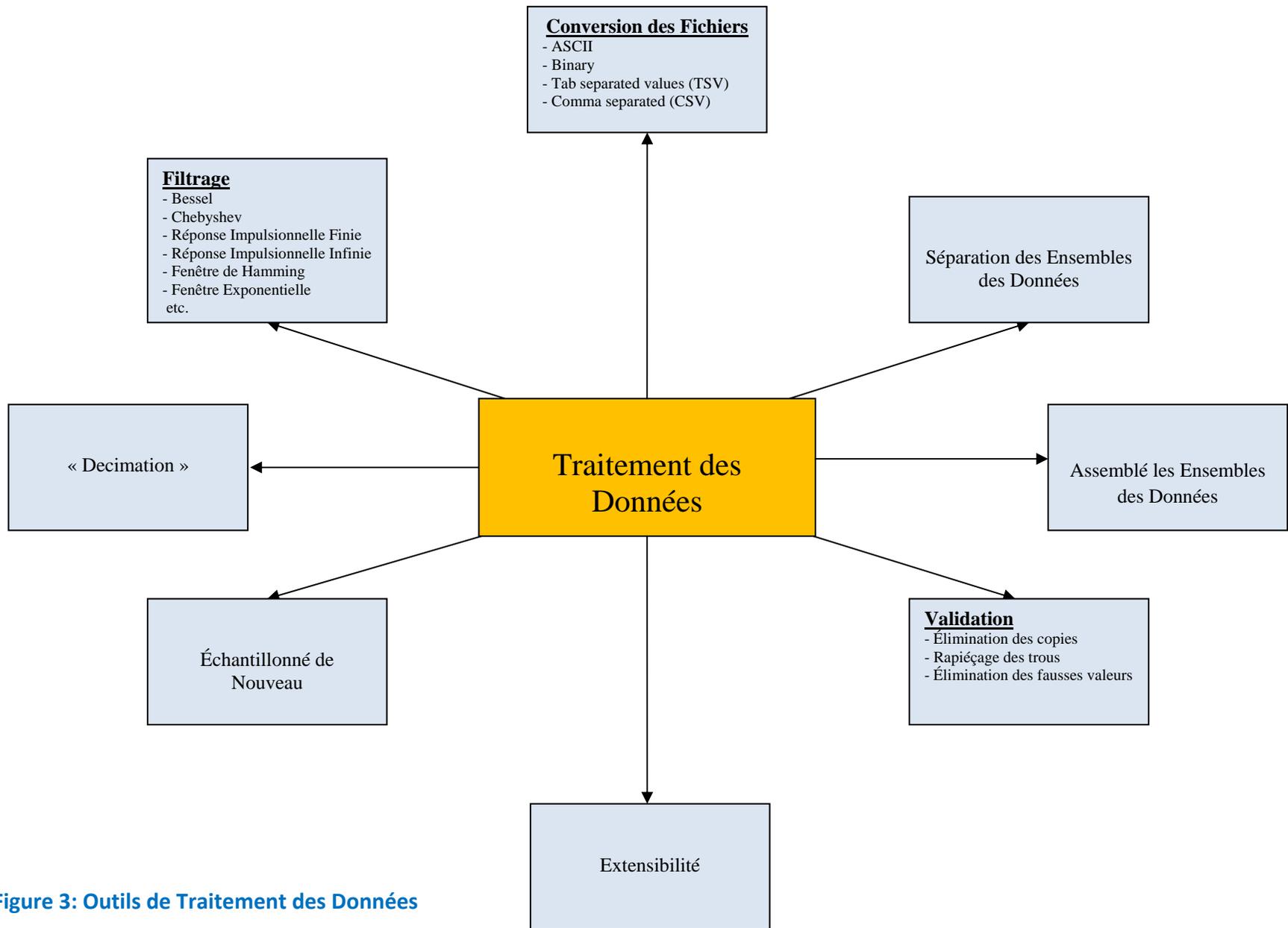


Figure 3: Outils de Traitement des Données

6-3 Analyse des Données

Après le traitement des ensembles de données, une analyse pour la récolte d'information en ingénierie désirée peut être entreprise. Figure 4 affiche les outils d'analyse disponibles. Les outils d'analyse disponibles aux utilisateurs dépendent du type de données mesurées. Des outils à identification de systèmes peuvent être utilisés pour déterminer les caractéristiques modales dynamiques et physiques d'un pont par une analyse des données des réactions aux vibrations forcées ou ambiantes. L'analyse d'événements dynamiques peut être aussi utilisée pour déterminer la tension dans les lignes à haute tension et les facteurs d'amplifications dynamiques. Les données sur la température peuvent être utilisées pour obtenir le gradient thermal à travers la coupe transversale, ou le profil de distribution le long d'une section du pont. Le processus de corrosion des barres d'armatures peut être surveillé pour déterminer la détérioration dans l'acier d'armature. Le fléchissement d'un pont peut être déterminé en analysant les mesures de charges statiques. La position de l'axe neutre peut être estimée, ainsi que les déformations moyennes. En utilisant des outils d'ajustements analytiques et d'analyses statistiques, des algorithmes de détection de dommages, une combinaison de tous ces ensembles d'outils d'analyses permet l'estimation de la durée de service d'une structure.

6-4 Animation et Visualisation

Pour faciliter l'interprétation physique des données analysées, des outils de visualisations peuvent être utilisés. Figure 5 démontre la capacité des tracés de tendance de surveiller les détecteurs individuels. La densité spectrale de puissance d'un signal peut être déterminée et utilisée comme méthode pour diagnostiquer le bon fonctionnement des détecteurs et de la qualité des données. Si un analyste croit qu'un des détecteurs a été compromis, la transformée de Fourier des données peut être tracée, et comparée à celle d'un détecteur en bon état pour déterminer les différences possibles. Le spectre de puissance croisé et la densité spectrale de puissance normalisée moyenne (DSPNM) peuvent être utilisés pour corroborer les résultats du système d'identification. Aussi, la visualisation des réactions du pont aux événements dynamiques peut être surveillée pour obtenir un aperçu dans le comportement opérationnel de la structure. Un module de visualisation, illustré dans la Figure 6, permet à l'utilisateur de surveiller les réactions de la structure aux événements dynamiques majeurs, ou des tests de charges, facilite ainsi la comparaison des formes de modes à celles obtenues théoriquement. Figure 7 présente l'interface graphique pour l'identification du type de détecteur ainsi que l'endroit où il est situé dans la structure. Figure 8 démontre la capacité du logiciel d'afficher la transformée de Fourier du signal de temps d'un événement qui peut être utilisé pour diagnostiquer un détecteur individuel. Étendre l'utilisation de la transformée de Fourier dans la formulation du spectre de puissance des données permet la détermination des caractéristiques dynamiques de la structure à travers l'analyse modale opérationnelle. Figure 9 illustre le calcul du spectre de puissance qui peut être combiné avec des techniques d'identifications des systèmes tel que p-LSCF pour permettre la détermination automatique des paramètres modaux de la structure.

Des modules similaires pour compléter les outils d'analyse comme cela est indiqué dans la Figure 4, doivent être développés pour inclure des calculs telles que l'estimation de la fatigue, l'estimation de la durée de vie, l'estimation de la corrosion etc.

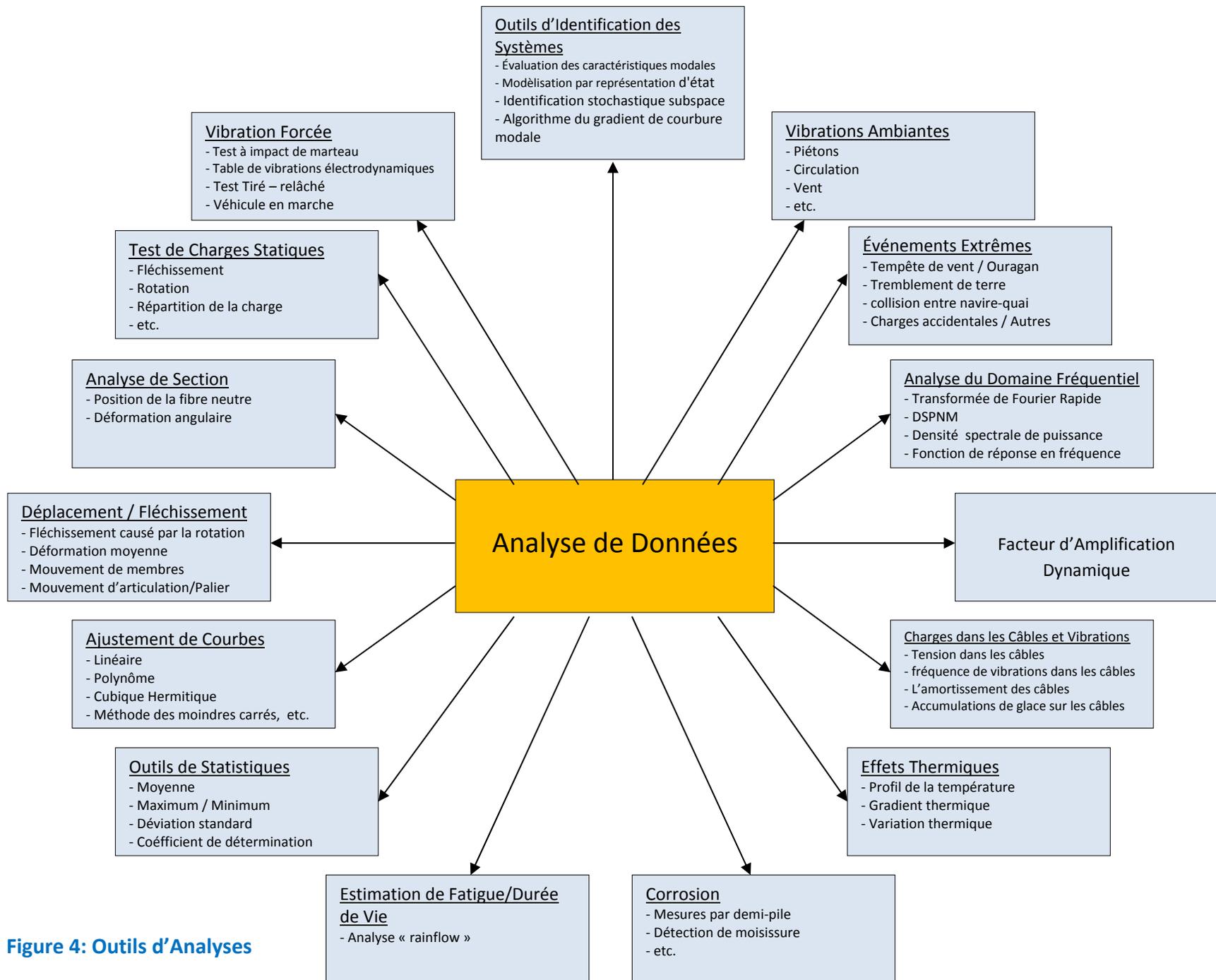


Figure 4: Outils d'Analyses

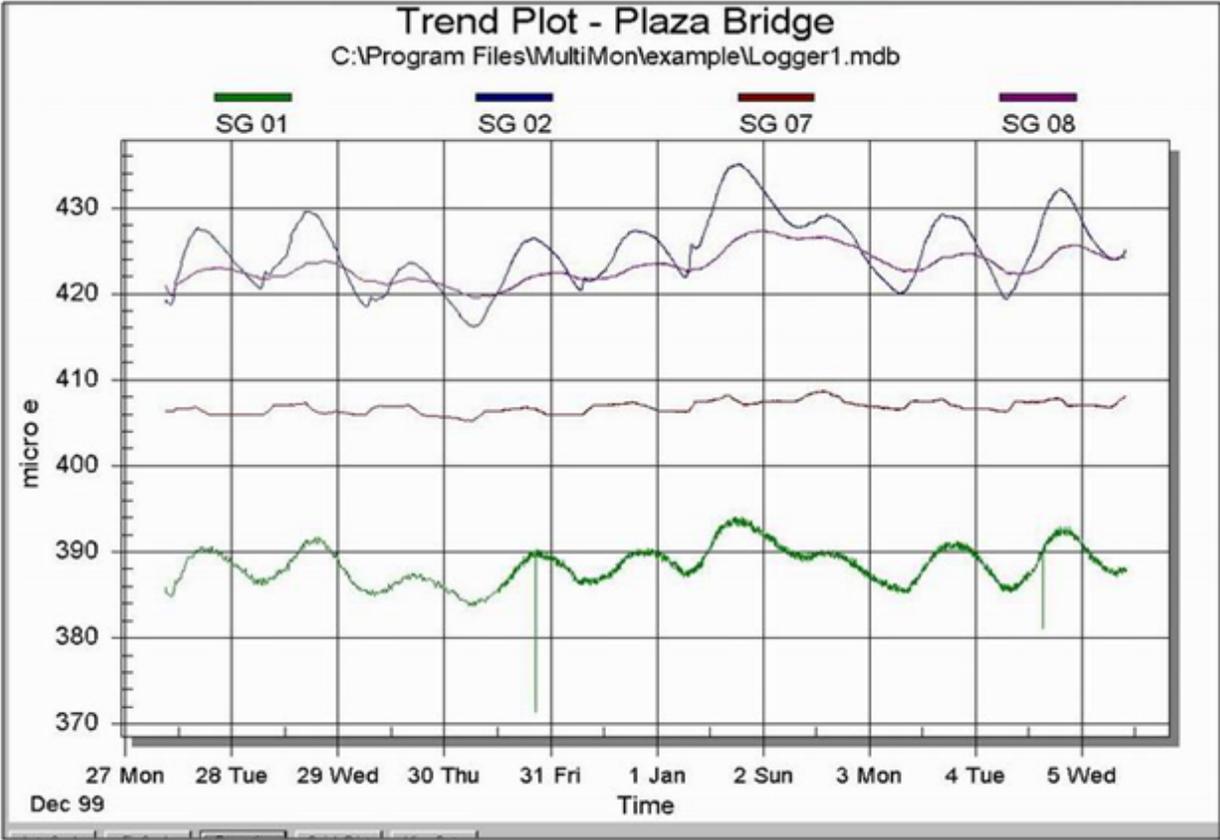


Figure 5: Représentation Graphique des Tendances et Analyse des Données de Surveillances

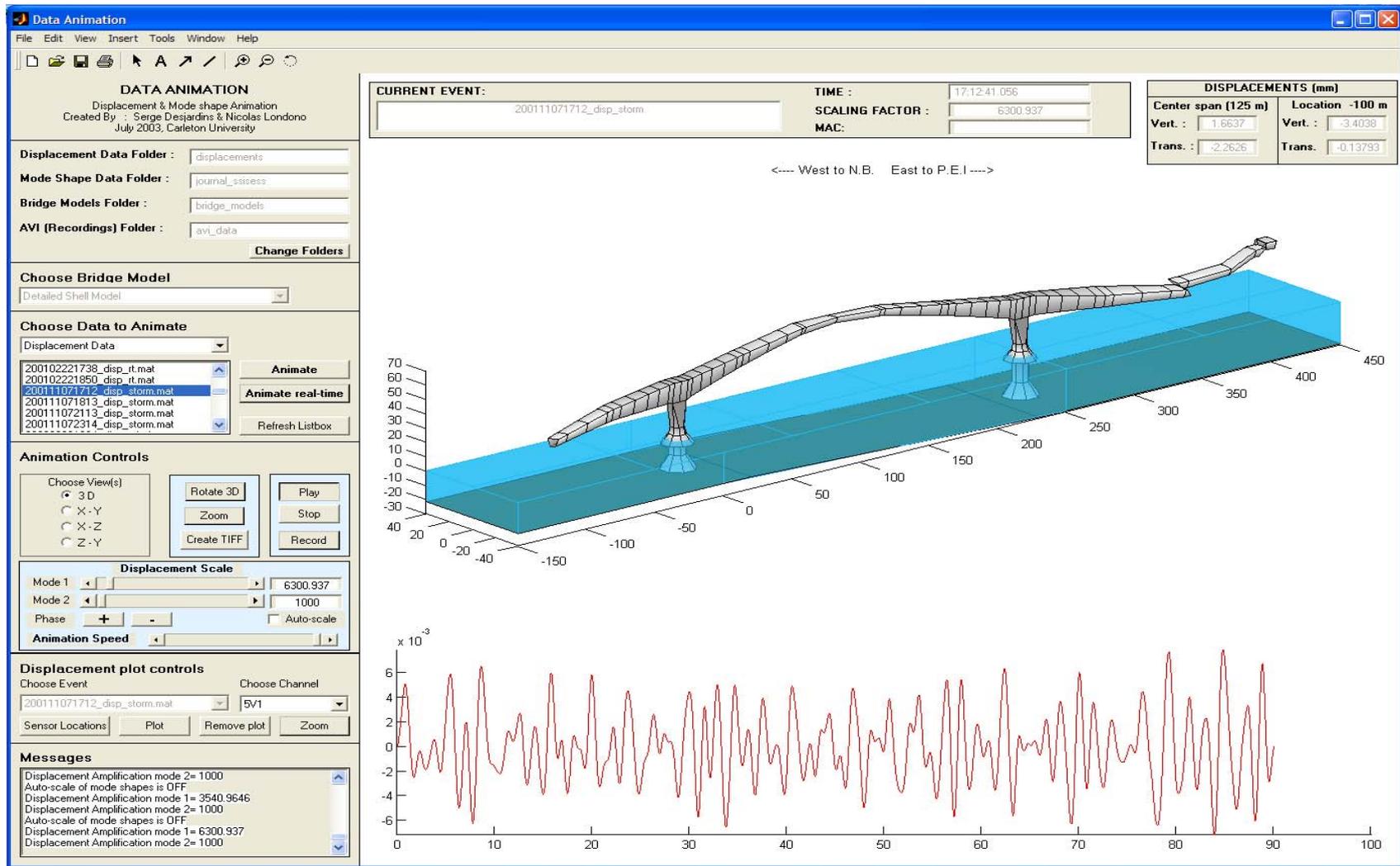


Figure 6: Visualisation des Réactions du Pont

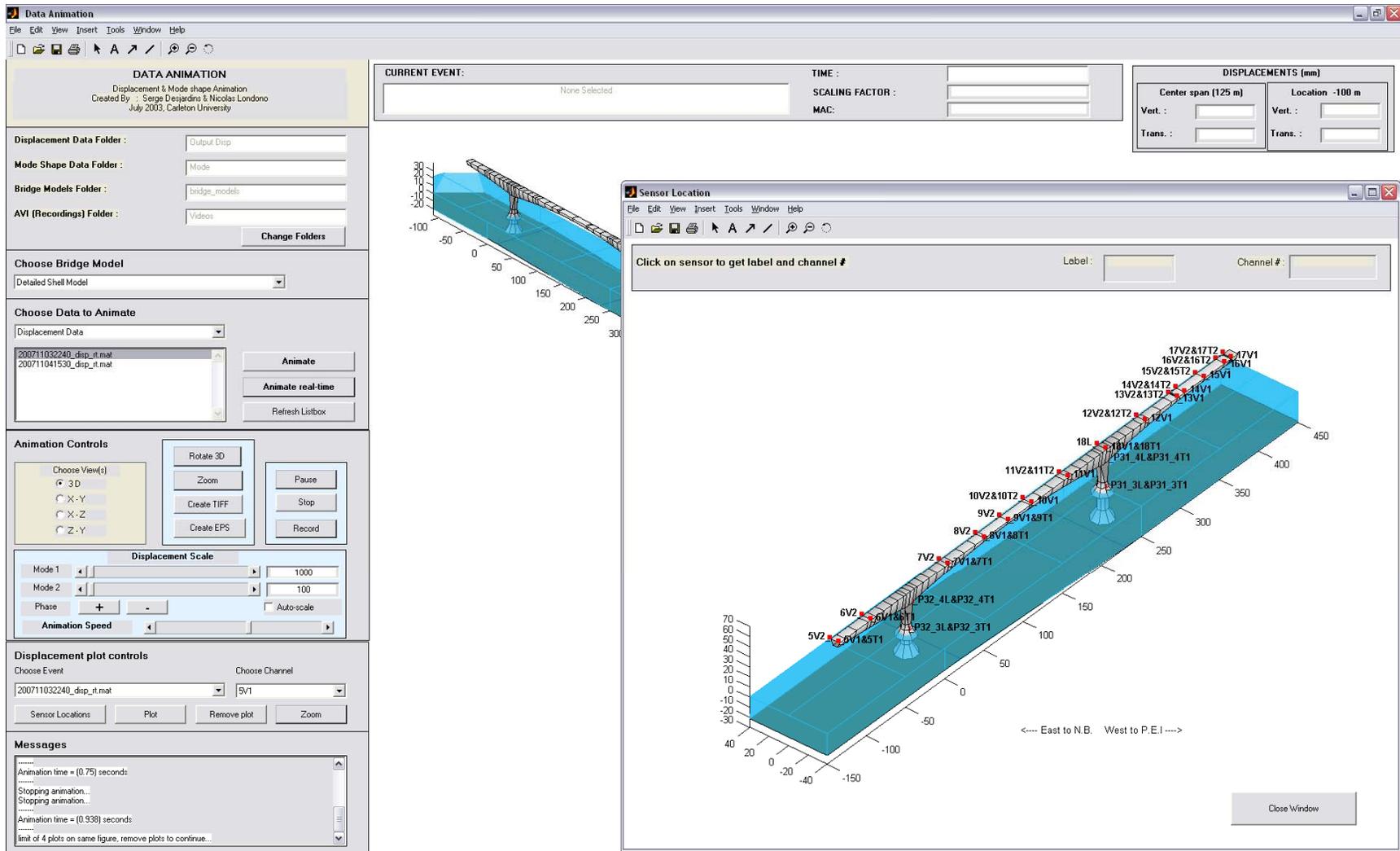


Figure 7: Localisation des Détecteurs

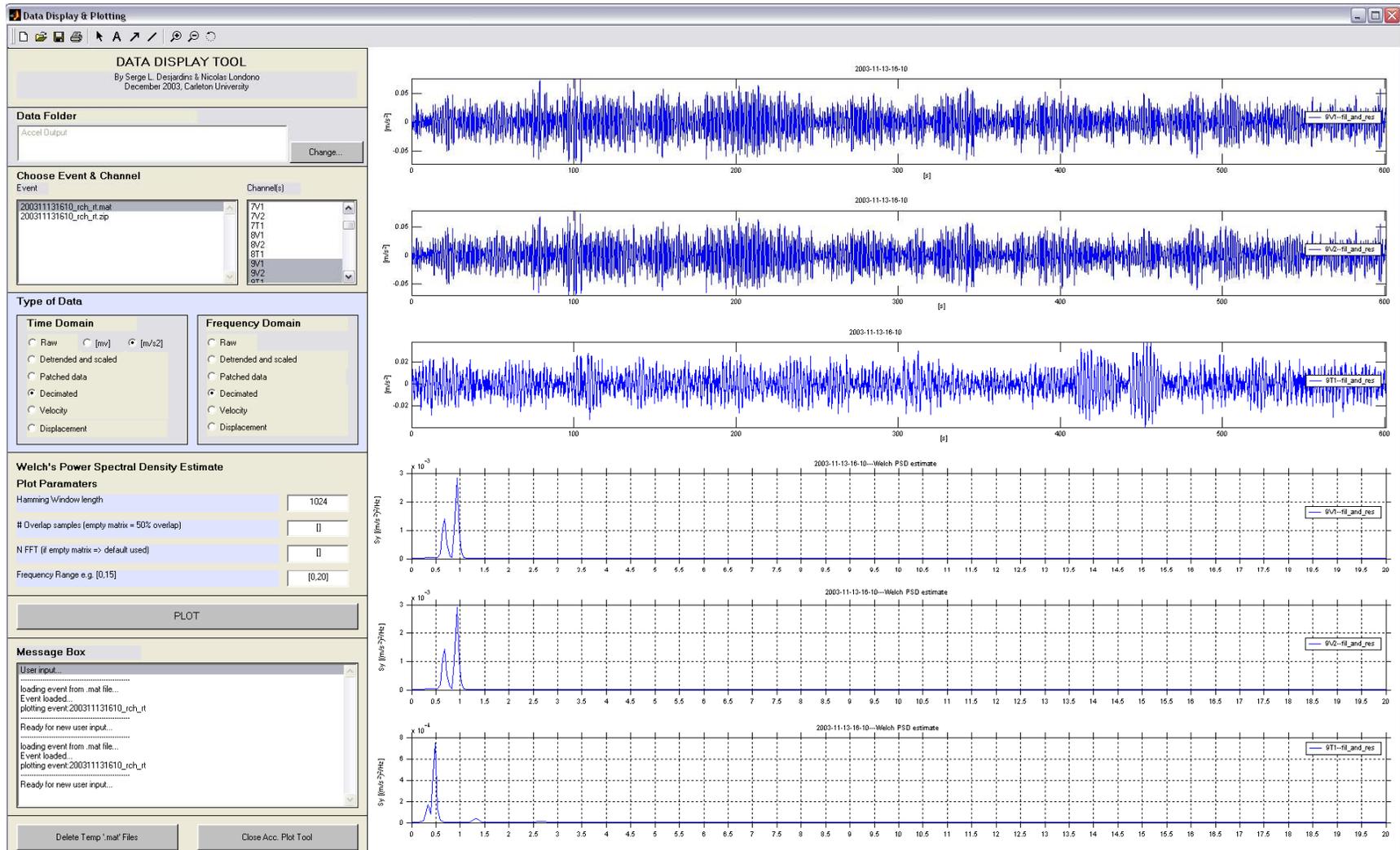


Figure 8: Affichage des Données et leurs Représentations Graphiques

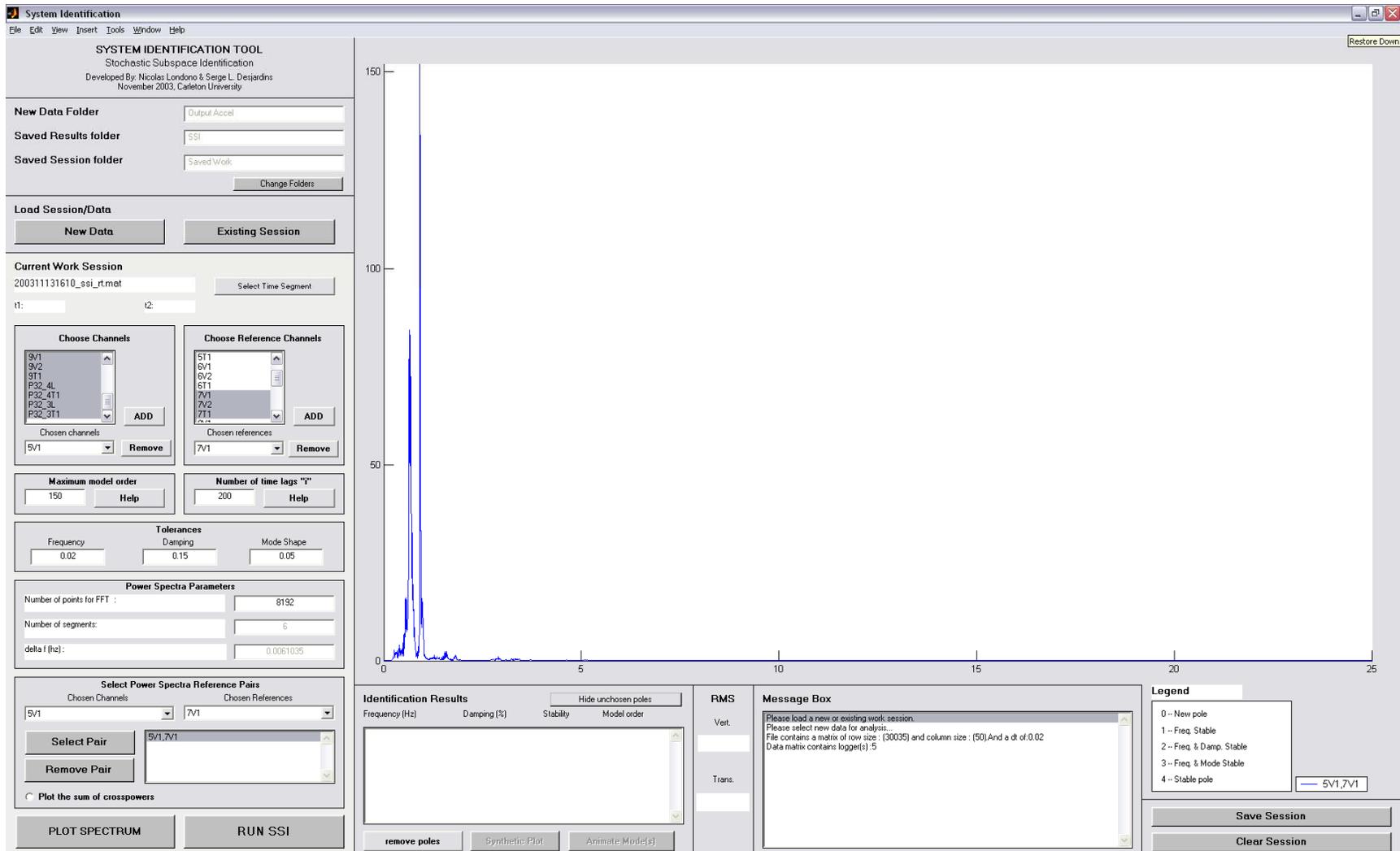


Figure 9: Exemple du Spectre de Puissance Croisé d'un Détecteur

6-5 Système de Condition et d’Avertissement Précoce

Après l’analyse des données, des messages d’avertissement peuvent être envoyés par messagerie texte aux téléphones cellulaires, ou par courriel aux personnels responsables si certains seuils pour les détecteurs, ou les paramètres structuraux ont été excédés. Des seuils à multiples degrés devraient être établis, le premier pour un avertissement de précaution, le second pour un avertissement nécessitant une action immédiate par les intervenants. Un exemple de ce système d’avertissement à multiples degrés est présenté dans la Figure 10, où un drapeau jaune est affiché pour un avertissement de précaution tandis qu’un drapeau rouge, indique un avertissement nécessitant une action immédiate. Ce module peut aussi incorporer des algorithmes de détections de dommages qui peuvent inclure une mise à jour en utilisant la méthode d’éléments finis, des réseaux neuraux, un index de dommages sur l’énergie de contrainte modale, des vecteurs de localisation de dommages etc.

6-6 Système de Diagnostic

Pour assurer la fiabilité des données de surveillance, un système d’autodiagnostic est très désirable. Un tel système, illustré dans la Figure 11, doit inclure le système de surveillance en entier pour être certain qu’il est complètement opérationnel quand un événement important se produit. Le système inclut la surveillance des sources d’électricité, le fonctionnement des détecteurs, la température des détecteurs et d’autres équipements de surveillance à l’intérieur du champ de fonctionnement permis et pour les ajustements des données de température, et la sécurité de l’équipement de surveillance.

Les sources d’électricité de toutes les pièces, détecteurs, enregistreurs des données, appareils de filtrage, et équipements informatiques peuvent être surveillés pour s’assurer que le voltage nécessaire est maintenu pour leur bon fonctionnement.

Les détecteurs du système peuvent être surveillés par plusieurs méthodes. Le changement relatif au niveau de référence du détecteur peut être surveillé pour s’assurer qu’il n’y a pas de déviation soudaine dans ses relevés, comme cela serait le cas dans un détecteur défectueux. La déviation standard des données récoltées peut être examinée pour déterminer si un détecteur ne fonctionne pas bien. Après une période initiale de calibration, un motif de la déviation standard sur la qualité des données peut être établi. Si les limites maximale ou minimale de ce motif sont excédées par de nouvelles données pendant une période de temps prolongée, le détecteur peut être possiblement déclaré défectueux, ou il y a un événement dynamique qui se produit. Si un analyste croit qu’un détecteur est défectueux, la transformée de Fourier des données peut être tracée graphiquement et comparée aux données d’un des détecteurs fonctionnels pour déterminer si il y a des différences entre les deux. Aussi, certains détecteurs sont dotés de capacités d’autodiagnostic incorporés par le manufacturier pouvant être intégrés dans le système de diagnostic du logiciel.

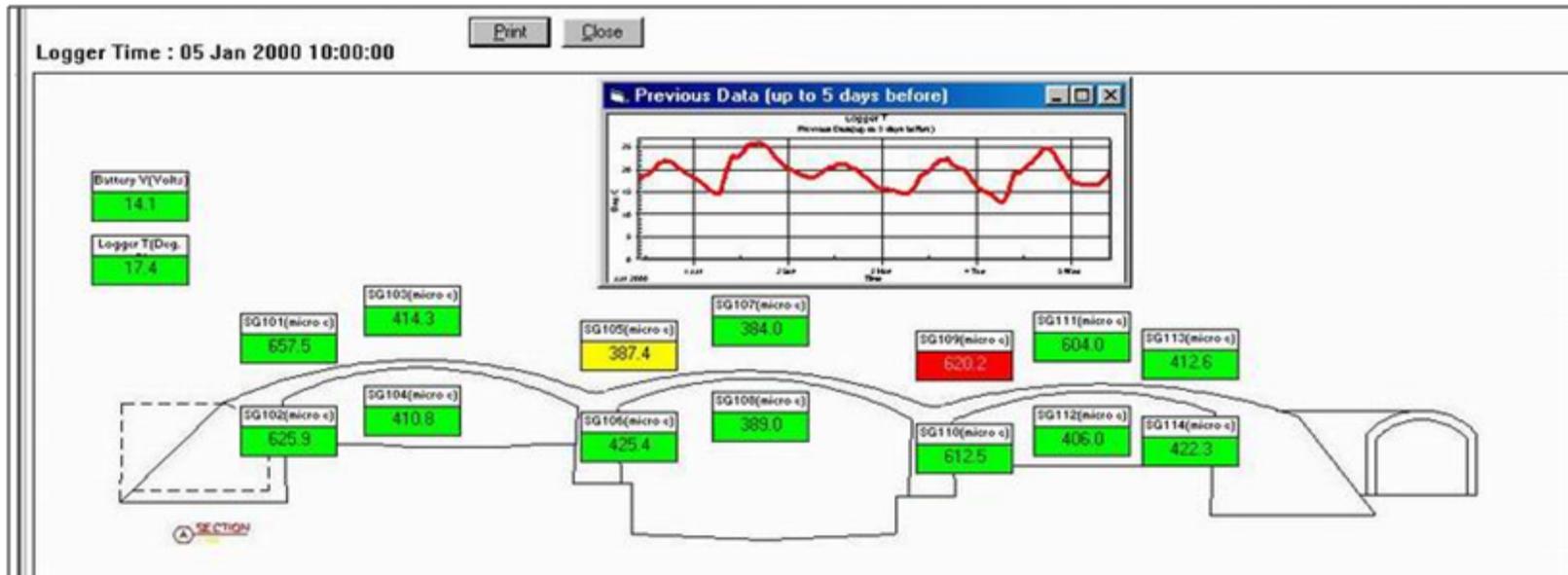


Figure 10: Système d'Avertissement

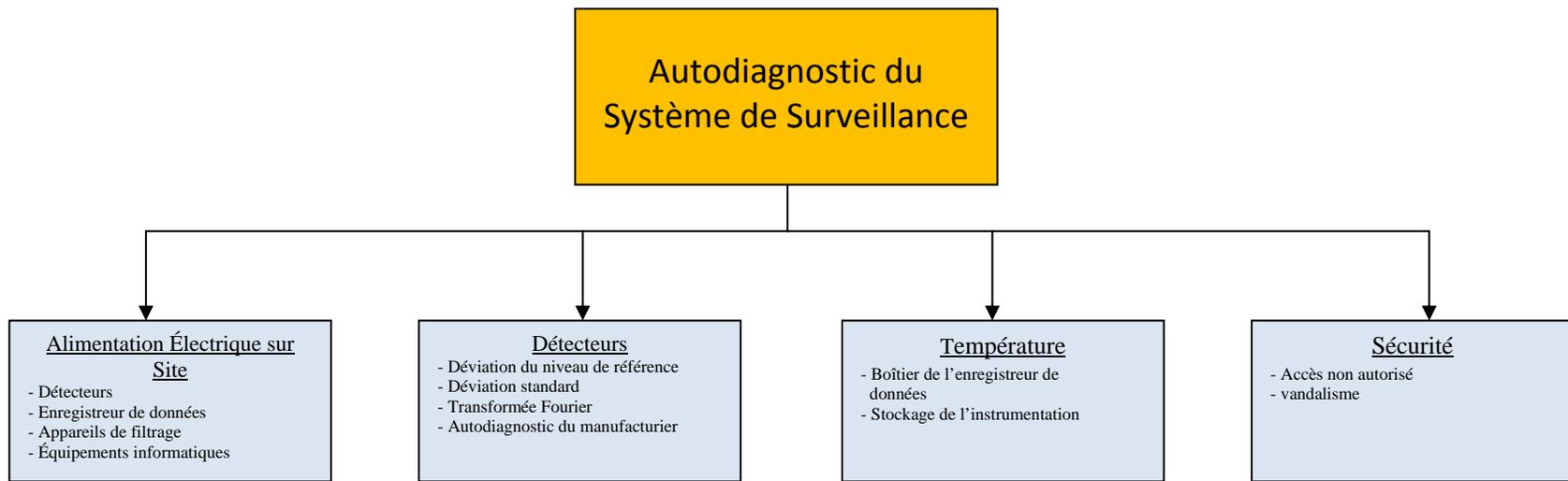


Figure 11: Diagnostic de Détecteur et de la Qualité des Données

Puisque les températures extrêmes, chaudes ou froides, peuvent empêcher le bon fonctionnement du système de surveillance, la température dans le placard d'instrumentation ainsi que la température des enregistreurs de données et de leurs boîtiers doivent être surveillées. Cela peut être facilement réalisé à travers l'incorporation des thermocouples dans des endroits nécessaires.

La sécurité du système peut être surveillée en installant des détecteurs sur les boîtiers des cabinets pour déterminer si un accès interdit ou si des charges à impacts considérables se sont produites, pouvant être causées par le vandalisme.

7 Plan de Travail pour le Développement du Logiciel

Un plan de travail exposé ci-dessous, est basé sur l'adaptation et le développement supplémentaires du logiciel de surveillance SPPLASH selon les critères et les spécifications du MTQ pour la surveillance électronique des ponts autoroutiers instrumentés. Le logiciel de surveillance des ponts MTQ-SPPLASH va être développé pour répondre aux critères de maniement des données de projets d'instrumentations des ponts sur l'Autoroute 30 (Section Ouest) ainsi que des données historiques d'anciens projets de surveillance des ponts instrumentés. Le développement du logiciel devrait se faire avec une étroite collaboration et l'échange d'informations entre l'équipe de développement et le personnel du MTQ. Approximativement, le projet d'adaptation et de développement du logiciel va durer 15 – 24 mois dépendant des critères et de la portée du travail. Le coût approximatif du logiciel est de 150000\$ à 300000\$ dépendant du nombre de modules de traitements et d'analyses de données qui doivent être inclus dans la version initiale du logiciel.

Table 1: Étapes Importantes du Projet et des Produits Livrables

Phase	Période	Étape Importante	Tâches Clés et Produits Livrables
1	4 mois	Rassemblement des critères et développement de la structure de l'adaptation et de la conception du logiciel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spécifications et critères opérationnels du logiciel 2. Spécifications du format des données informatiques et critères des metadonnées du pont
2	14 mois	Développement du logiciel prototype MTQ-SPPLASH	<ol style="list-style-type: none"> 3. Plan de développement d'outils et de modules 4. Démonstration d'un prototype de module et d'outils pour MTQ-SPPLASH
3	3 mois	Test bêta et sur le site du MTQ-SPPLASH	<ol style="list-style-type: none"> 5. Bêta du logiciel MTQ-SPPLASH 6. Essai sur le site du MTQ-SPPLASH avec une surveillance de données du pont en direct

8 Remarques Finales

À la suite de l'enquête sur les logiciels pour la surveillance électronique des ponts autoroutiers actuellement disponibles, il est clair que ces logiciels sont limités dans leur flexibilité et qu'ils manquent de capacité d'expansion nécessaire pour augmenter le nombre de nouveaux ponts instrumentés à l'avenir, ou quand le besoin de nouveaux types de mesures se fait sentir. En conclusion, la solution la plus appropriée et la plus efficace est d'adopter le MTQ-SPPLASH, un logiciel ouvert qui possède les caractéristiques d'adaptation et d'extensibilité pour satisfaire aux critères de traitements et d'analyses de données du MTQ pour leur plan d'instrumentation des ponts sur l'Autoroute 30 (Section Ouest) ainsi que des données historiques sur d'autres projets de ponts instrumentés.

9 Remerciements

Les auteurs de ce rapport remercient Mr. Guy Richard et Mr. Marc Savard du MTQ, et Mr. Martin Lelievre de Transports Canada de leur aide et de leur soutien.

Bibliographie du Projet de Surveillance du Pont de la Confédération

Cheung, M., Tadros, G., Brown, T., Dilger, W., Ghali, A., & Lau, D. (1997). Field monitoring and research on performance of the Confederation Bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering* , 24 (6), 951-962.

Cheung, M., Tadros, G., Brown, T., Dilger, W., Ghali, A., & Lau, D. (1997). Large scale field monitoring project on the Confederation Bridge. *Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering* , 141-150.

Desjardins, S. (2004). Real-time computer platform for vibration-based structural health monitoring of the Confederation Bridge. *PhD thesis, Department of Civil & Environmental Engineering*. Carleton University, Ottawa, Canada.

Desjardins, S., Londono, N., Lau, D., & Khoo, H. (2006). Real-time data processing, analysis and visualization for structural monitoring of the Confederation Bridge. *Advances in Structural Engineering* , 9 (1), 141-157.

Lau, D., & Cheung, M. (1998). Dynamic behaviour and monitoring of the Confederation Bridge. *Seismological Research Letters* , 69 (1), 80-81.

Lau, D., & Li, W. (1997). Dynamic monitoring of the Confederation Bridge. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering* , 167-176.

Lau, D., Brown, T., Cheun, M., & Li, W. (379-390). Dynamic modelling and behavior of the Confederation Bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering* , 31 (2), 2004.

Londono, N. (2006). Use of vibration data for structural health monitoring of bridges. *PhD thesis, Department of Civil & Environmental Engineering*. Carleton University, Ottawa, Canada.

Londono, N., & Lau, D. (2003). Verification of the dynamic properties of the Confederation Bridge. *Canadian Society for Civil Engineering* , 2003, 1026-1035.

Londono, N., Desjardins, S., & Lau, D. (2004). Use of stochastic subspace identification methods for post-disaster condition assessment of highway bridges. *13th World Conference on Earthquake Engineering* .

Montreuil, M., Lau, D., & Brown, T. (1998). Distributed data acquisition system for monitoring the Confederation Bridge. *Instrumentation in the Aerospace Industry: Proceedings of the International Symposium* , 44, 318-333.

Zhang, M., Lau, D., Cheung, M., & Li, W. (2000). Dynamic performance of the Confederation Bridge. *2000 Annual Conference Abstracts - Canadian Society for Civil Engineering* .

Références

- Chan, T., Ko, J., & Li, Z. (2001). Fatigue evaluation for Tsing Ma bridge using structural health monitoring data. *Proceedings of SPIE* , 4337, 335-346.
- DEWESoft. (2007). *DEWESoft*. Retrieved May 5, 2009, from DEWESoft website: www.dewesoft.org
- Hawk, H. (1999). BRIDGIT: User-friendly approach to bridge management. *International Bridge Management Conference* , 1.
- Kriviak, G. (1999). Bridge management system development for municipal-sized inventories in Western Canada. *8th International Bridge Management Conference* , 1.
- Lanslots, J., Rodiers, B., & Peeters, B. (2004). Automated pole-selection: proof-of-concept & validation. *Proceedings of ISMA* , 1005-1018.
- Li, H., Ou, J., Zhao, X., Zhou, W., Li, H., & Zhou, Z. (2006). Structural health monitoring system for the Shandong Binzhou Yellow River highway bridge. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* , 21, 306-317.
- Li, N., Zhang, X., Zhou, X., Leng, J., Liang, Z., & Zheng, C. (2008). Introduction of structural health and safety monitoring warning systems for Shenzhen - Hongkong western corridor bay bridge. *Proceedings of SPIE*, 6935.
- Londono, N. (2006). Use of vibration data for structural health monitoring of bridges. *PhD thesis, Department of Civil & Environmental Engineering*. Carleton University, Ottawa, Canada.
- MTQ. (2009). Instrumentation of a bridge as part of a public-private partnership and creation of a tool for analyzing measurements obtained from electronic surveillance of highway bridges.
- Peeters, B., Couvreur, G., Razinkov, O., Kundig, C., Van der Auweraer, H., & De Roeck, G. (2003). Continuous monitoring of the Oresund Bridge: system and data analysis. *Proceedings of IMAC XXI, A conference and exposition on structural dynamics* .
- Peeters, B., Van der Auweraer, H., Guillaume, P., & Leuridan, J. (2004). The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation? *Shock and Vibration* , 11, 395-409.
- Robert, W., Marshall, A., Shepard, R., & Aldayuz, J. (2003). Pontis bridge management system : state of the practice in implementation and development. *9th International Bridge Management Conference* , 49-60.

Speiran, K., Francis, J., Ellis, R., & Thompson, P. (2004). Implementation of a bridge management system in the province of Nova Scotia. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*. Quebec City.

Straininstall. (2005). *Bridge Monitoring*. Retrieved May 12, 2009, from Straininstall Web site: www.straininstall.com/bridge.html

Thompson, P., Ellis, R., Hong, K., & Merlo, T. (2003). Implementation of Ontario Bridge Management System. *9th International Bridge Management Conference* , 112-127.

USEngineering Solutions. (2008). *BridgeWatch*. Retrieved May 13, 2009, from USEngineering Solutions Web site: www.usengineeringsolutions.com/solutions/bridgewatch.html

Vienna Consulting Engineers. (2008). *About Brimos*. Retrieved May 5, 2009, from Brimos A Product of VCE Web site: www.brimos.com/Brimos

Wong, K. (2003). Structural identification of Tsing Ma bridge. *Transaction Hong Kong Institution of Engineers* , 38-47.

Wong, K., Lau, C., & Flint, A. (2000). Planning and implementation of the structural health monitoring system for cable-supported bridges in Hong Kong. *Proceedings of SPIE* , 3995, 266-275.