

SURVEILLANCE DE SANTÉ STRUCTURALE LA DÉMARCHE DU PROJET S3

Christian CREMONA
MEEDDAT - CGDD

1. INTRODUCTION

Les infrastructures civiles, qui incluent notamment les ponts et les bâtiments, sont de manière constante et continue soumises à des environnements agressifs, au vieillissement de leurs éléments ou de leurs matériaux constitutifs, à des évolutions ou à des conditions exceptionnelles d'exploitation. Ces facteurs amplifient l'effet de toute erreur de conception ou de construction ou d'endommagements accidentels : ils fournissent ainsi l'espace à de nouvelles ou de plus rapides dégradations structurales. C'est ainsi que la combinaison de défauts, de détériorations et d'endommagements constituent la cause première de perte de résistance structurale des ouvrages. Durabilité et durée de vie effectives en sont fortement réduites. Mais toute action de maintenance, de réparation, de réhabilitation, de limitation d'exploitation ou d'arrêt d'exploitation n'a de pertinence que si l'on dispose de manière adaptée et pertinente de procédures et de méthodes pour évaluer la capacité de résistance résiduelle, et l'aptitude au service.

Afin d'améliorer l'évaluation de la performance des ouvrages, ou à défaut d'en avoir une vision objective et correcte, il est important de pouvoir caractériser de manière pertinente le comportement réel de l'ouvrage. La connaissance de l'intégrité d'un ouvrage en terme d'âge et d'usage, et de son niveau d'aptitude au service à supporter des actions non fréquentes mais d'intensité élevée (convois exceptionnels, séismes, effets thermiques, cyclones, ouragans) est essentielle et nécessaire, notamment dans un environnement évolutif lié aux conséquences du changement climatique. Ce processus de détermination, de suivi et d'évaluation de cette aptitude au service est le principe même de ce que l'on appelle la Surveillance de Santé Structurale (S3). Cet article décrit le programme de recherche débuté en 2007 en présentant certains des résultats obtenus à ce jour.

Le groupement de recherche du projet S3, piloté par le LCPC, est constitué de sociétés (Syrokko, Sites, Advitam, AVLS, Geonumeric, Getec), de laboratoires publics (LCPC, CETE Lyon, CETE Sud-Ouest), d'universités (Université de Clermont-Ferrand, Université de Bordeaux) et de gestionnaires d'ouvrages (EDF, SNCF).

2. QUELQUES DEFINITIONS

2.1. Performance

Afin de conceptualiser la santé d'un ouvrage, il est nécessaire de préciser ce que représente la **performance**. Les fonctions d'un ouvrage décrivent en général les exigences auxquelles il doit répondre. La capacité d'une structure à remplir ces exigences est alors dénommée performance. La plupart des textes officiels regroupent ces exigences (comme la Directive Européenne 89/106 relative aux produits de construction ou l'Eurocode EN1990) en exigences de sécurité ou d'intégrité (notion décrite dans les sections précédentes), d'aptitude à l'emploi ou au service et de durabilité.

Un ouvrage doit être en mesure de résister à toutes les actions qu'elle aura à subir pendant sa construction et son utilisation prévue en situation normale (exigence de **sécurité structurale**). Cela sous-entend la capacité des matériaux constitutifs de la structure à assurer l'équilibre statique aux sollicitations de situation normale, l'absence de dommages irréversibles ou cumulatifs. Un comportement satisfaisant à des sollicitations non prévues doit être également attendu. Dans ce dernier cas, l'ouvrage doit être capable de conserver sa forme générale et sa stabilité. Dans ces situations exceptionnelles, des déformations importantes, des dommages irréversibles sont acceptables

dans la mesure où la sécurité des usagers n'est pas mise en question. La remise en service de l'ouvrage sera cependant dépendante des conclusions d'une inspection détaillée et des réparations mises en œuvre.

L'exigence d'**aptitude au service** recouvre celles nécessaires au maintien de l'exploitation de l'ouvrage. Leur non-respect entraîne rarement une remise en cause de la sécurité des usagers, mais peut engendrer des coûts directs ou indirects liés à l'exploitation de l'ouvrage. Il s'agit dans la plupart des cas d'exigences sur la déformabilité de l'ouvrage vis-à-vis d'actions permanentes (fluage...) et d'actions variables (flèches...), d'effets dynamiques (résonance et confort...) mais aussi d'exigences liées à la sécurité des usagers de la structure ou de l'environnement proche de la structure.

L'exigence de **durabilité** est souvent difficile à définir et plusieurs sens lui sont donnés en pratique. Une définition satisfaisante consiste à relier la durabilité aux deux autres concepts de performance que sont la sécurité structurale et l'aptitude au service : la durabilité représente l'aptitude d'une entité (structure ou élément) à demeurer en état d'accomplir ses performances de sécurité structurale et d'aptitude au service dans des conditions données d'utilisation et de maintenance sur une durée de service définie. C'est le sens qui est notamment donné par les Eurocodes. Il convient de rappeler que la durabilité n'est pas la garantie d'une durée de vie infinie à la structure, mais un objectif de qualité orientant aussi bien la conception de l'ouvrage que celle du matériau. Cette réflexion permet l'identification de deux concepts distincts vis-à-vis de la durabilité : celle du matériau et celle de la structure. La durabilité du matériau se vérifie à partir de sa capacité de conserver ses caractéristiques et son intégrité pendant la durée de vie prévue pour la structure. La durabilité de la structure dépend bien évidemment de celle du matériau, mais elle ne se résume pas exclusivement à la qualité du matériau employé. C'est pourquoi la durabilité de la structure (complète ou d'un élément) consiste dans l'accomplissement de ses performances de sécurité structurale et d'aptitude au service dans des conditions prévues d'utilisation.

Comme pour le risque, la notion de performance n'a d'intérêt que si elle est quantifiable, donc caractérisée par une ou plusieurs mesures. Ces mesures de la performance sont nombreuses suivant la nature de la structure et de ces fonctions. Ce sont en réalité des exigences qui décrivent des états de fonctionnement de l'ouvrage. La séparation entre le domaine des états de fonctionnement possibles (c'est-à-dire susceptibles de se produire) et le domaine des états de fonctionnement à éviter est alors décrit par des états dits limites. Les actions de sécurité auront alors pour objectifs de s'assurer que les états de fonctionnement possibles n'atteignent pas les états de fonctionnement non désirés. Les critères d'états limites visent à prémunir la construction des états de dysfonctionnement au travers de marges de sécurité. Plusieurs approches sont possibles : coefficients de sécurité, coefficients partiels, probabilités de défaillance.

L'issue critique liée à la définition de la performance est la formulation d'**indicateurs de performance** capables d'intégrer les données accumulées tout le long de la surveillance d'un ouvrage. En d'autres termes, il faut d'une part que les modèles puissent utiliser au mieux cette information et l'appréhender dans sa globalité, avec ses incertitudes et ses formats de données différents. En effet, le flux de données en grand nombre provenant de capteurs, d'échantillonnages différents..., acquises sous des conditions variables, requiert non seulement de normaliser ces données pour extraire les variations environnementales des variations structurales, mais aussi de les fusionner. La **fusion de données** consiste à intégrer des données provenant de sources disparates. Ces techniques ont pour objectif l'analyse groupée de données provenant de plusieurs types de capteurs afin de procurer un système de décision robuste et efficace. La mission des techniques de fusion de données est donc d'intégrer des données issues de multiples capteurs avec pour objectif final une prise de décision plus robuste et plus fiable que celle provenant de l'analyse individuelle de chaque capteur.

2.2. Santé

La performance d'un ouvrage est mesurée au travers d'un ensemble d'indicateurs qui apprécient la capacité de la structure à répondre à des exigences données. A ces valeurs de performance, il convient d'ajouter des informations plus subjectives comme celles données par les cotations permettant d'appréhender l'état général d'un ouvrage. Ces indicateurs d'état en conjonction avec les indicateurs de performance contribuent à définir la santé de l'ouvrage, plus ou moins bonne selon que l'on est éloigné ou non d'un état de dysfonctionnement. La **santé d'un ouvrage** est donc caractérisée par l'ensemble de ces indicateurs, qui fournissent des informations hétérogènes par nature et par qualité.

2.3. Dégradations, endommagements

Une **dégradation** dans un système structural ou mécanique sera définie comme un changement intentionnel ou non pour le matériau et/ou ses propriétés géométriques (y compris les changements des conditions aux limites) affectant la performance actuelle ou future du système. Ainsi, une fissure qui se développe dans une section d'ouvrage produit un changement qui altère la rigidité de l'élément. Suivant la dimension et la localisation de ce défaut et des charges appliqués, les effets de la dégradation (ou endommagement) seront immédiats ou altéreront la performance future. En terme de dimensions spatiales, tous les endommagements se développent au niveau du matériau, puis, sous l'effet des conditions de chargement, progresseront de l'élément aux sous-systèmes à des vitesses plus ou moins différentes. En terme d'échelle temporelle, l'endommagement peut se cumuler sur de longues périodes, comme dans le cas de la fatigue ou de la corrosion. Des endommagements surviennent également à des échelles temporelles plus courtes, liés à des événements discrets prévus comme des surcharges, ou imprévus comme des impacts de véhicules.

2.4. Surveillance de Santé

La **surveillance de santé** est l'observation et la cotation des indicateurs formant la "mesure" de cette santé à partir d'inspection visuelles ou détaillées, de données mesurées et de simulations analytiques conjuguée avec une expérience heuristique d'expert. Le résultat final est l'élaboration d'un profil de santé, constitué des profils de performances et d'état, de sorte que la santé future (performance et état) puisse être pronostiquée. La distinction fondamentale entre la surveillance de santé et une évaluation détaillée typique réside dans la manière dont les mesures sont conçues et mises en application pour qu'elles soient utilisables conjointement avec des simulations analytiques qui permettront d'effectuer cette prédiction. La surveillance de santé structurale ne se limite donc pas à la seule instrumentation d'un ouvrage et à l'acquisition de données, mais vise également l'extraction de caractéristiques (indicateurs) et leur analyse pour déterminer l'état actuel (**diagnostic**) ou future (**pronostic**) de la structure. La Figure 1 illustre la relation entre surveillance, surveillance de santé, diagnostic et pronostic.

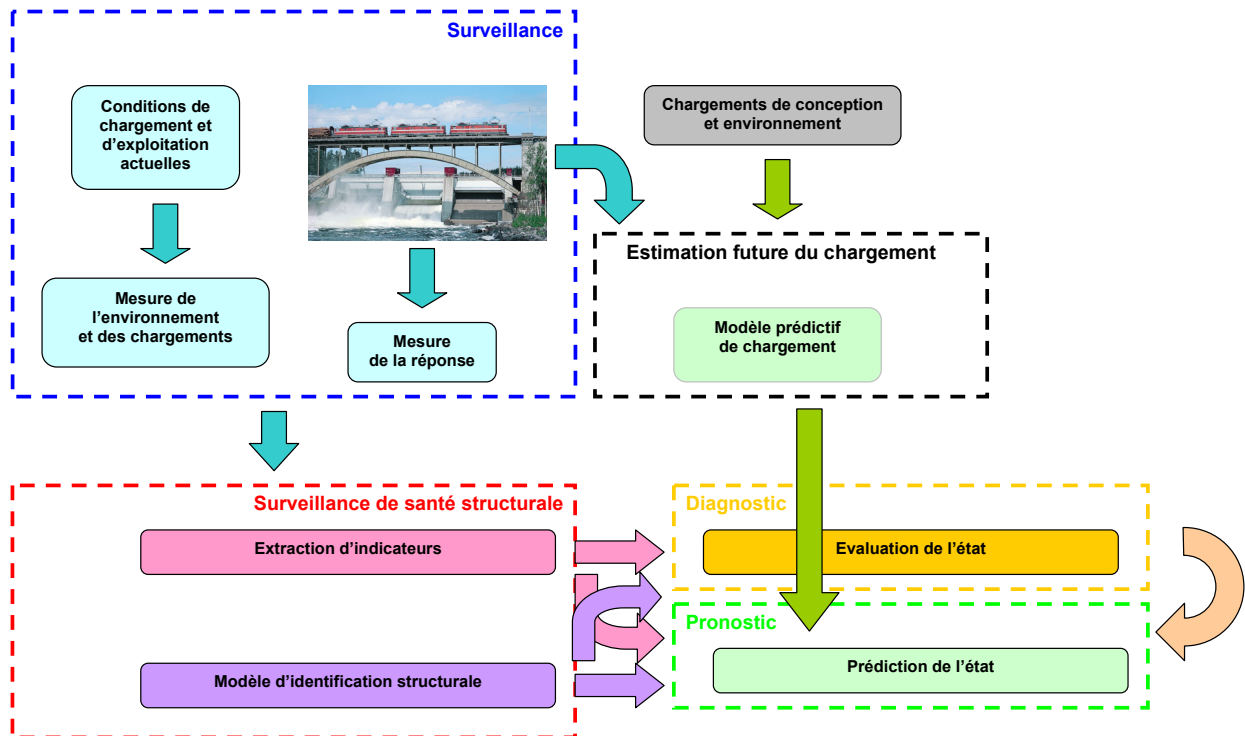


Figure 1 : Relations entre surveillance, surveillance de santé, diagnostic et pronostic

Un système de surveillance peut fournir des éléments essentiels à l'appréciation de la santé d'un ouvrage. Ce système dit de **d'évaluation de la santé structurale**, peut être basé sur un système général de cotation permettant à l'opérateur de l'ouvrage d'effectuer l'exploitation et la maintenance de manière structurée et pertinente. Le système d'évaluation de la santé structurale – à distinguer du système de surveillance – recevra l'information relative aux événements structuraux archivés dans la base de données d'événements. Ces événements peuvent provenir de données mesurées par le système de surveillance mais aussi de résultats d'inspections visuelles et/ou détaillées. La note du composant structural surveillé sera archivée dans le système de gestion, avec affichage à la demande. Cet outil de surveillance de santé doit également intégrer un système de planification de la maintenance afin d'évaluer les actions à mener. Il est recommandé de faire fonctionner ce système d'évaluation de santé structurale avec celui de la surveillance du trafic pour la planification des travaux de maintenance afin de minimiser la gêne à l'usager.

2.5. Identification Structurale

L'**identification structurale** est le développement d'une conceptualisation analytique menant à un modèle numérique d'une structure à partir de mesures, validé en corrélant les simulations numériques avec les informations expérimentales. Elle sert de point de départ et de noyau à la surveillance de santé. Les applications de l'identification structurale fournissent la façon la plus fiable de caractériser un ouvrage. Elle devrait guider les ingénieurs en déterminant le nombre minimum de mesures requises et caractériser complètement un ouvrage de sorte que sa santé (performance et état) puisse être évaluée. L'identification structurale fournit la façon la plus objective et la plus fiable de comprendre le comportement mécanique global d'un système structural et d'évaluer son état, sa durabilité, sa vulnérabilité, sa robustesse, son entretien et les besoins de modifications (renforcement)... Elle offre une compréhension de tous les mécanismes critiques de flexibilité, de dissipation d'énergie et d'inertie, l'appréciation des résistances et des points chauds. Cette information est essentielle pour évaluer et identifier les capacités disponibles de performance.

Les six étapes nécessaires à l'identification structurale sont :

- rassembler l'information disponible, la conceptualiser et développer un modèle a priori pour représenter au mieux la connaissance existante sur le comportement de l'ouvrage ;
- concevoir des études expérimentales sur la base de comportement analytique a priori (analyse de risque) ;
- réaliser des mesures pour identifier, vérifier et évaluer le comportement local et global de la structure. Ces mesures peuvent s'associer à d'autres données comme celles issues des inspections visuelles ou détaillées du pont (essais non destructifs par exemple) ;
- pré-traiter et conditionner les données expérimentales résultantes pour atténuer toute erreur, assurer leur fiabilité et les incertitudes associées ;
- ajuster les modèles analytiques au travers des propriétés des matériaux, des conditions aux limites pour refléter le comportement mesuré ;
- utiliser le modèle calibré comme base de prédiction.

3. LES ENJEUX DE LA SURVEILLANCE DE SANTÉ

Les Journées IREX « Auscultation, Diagnostic et Evaluation des Ouvrages », organisées les 25-26 novembre 2003, ont montré l'enjeu du diagnostic des ouvrages du Génie Civil dans la maîtrise des coûts de maintenance et l'effort important à consentir pour répondre à la demande de la maîtrise d'ouvrage. Aujourd'hui, l'évaluation des ouvrages est généralement conduite de manière visuelle (à l'exception des ouvrages exceptionnels ou innovants) et est décrite par des indicateurs subjectifs. De nombreux ouvrages sont cotés suivant les mêmes modèles idéalisés avec des procédures voisines de celles utilisées pour leur conception. Une telle approche permet très difficilement de caractériser l'aptitude au service et l'intégrité structurale en incorporant l'état et le comportement actuels de ces ouvrages. L'état de la pratique, en dépit des remarques précédentes, semble cependant montrer qu'elle qu'il a procuré des résultats satisfaisants, au moins en terme de sécurité du public. Certes, un certain nombre d'ouvrages ont souffert de dommages sérieux ou d'effondrements suite à des inondations, des accidents ou des affouillements..., mais cela reste de l'ordre des probabilités acceptables. Le problème se situe ailleurs et porte sur la gestion d'un patrimoine vieillissant. A l'opposé, l'essor rapide de la construction, de qualité souvent imparfaite pour de pas dire médiocre, dans les pays émergents, semble se traduire déjà par des problèmes d'entretien, avec une augmentation rapide sur un horizon d'une vingtaine d'années.

La modification de la performance d'un ouvrage (en termes de durabilité, d'aptitude au service ou d'intégrité structurale) entraîne des actions de maintenance pour y remédier. Ces actions jouent un rôle essentiel dans la maintenance de certaines structures de génie civil dès lors qu'il s'agit d'une perte de production (centrales électriques...). Pour d'autres, l'évolution de la performance conduit à une perte d'accessibilité (ponts, tunnels...), et donc à des pertes financières, directes dans le premier cas, indirectes (temps d'attente, détour...) ou directes (pertes de droits d'entrée de péage) dans le second. Lorsqu'une structure assure enfin un rôle de sécurité (digue, barrage non destiné à la production, murs de soutènement...), la perte de performance revêt deux conséquences différentes : une perte matérielle et une perte immatérielle, cette dernière étant par définition difficilement quantifiable.

La complexité croissante, les dimensions, les incertitudes et le caractère interdisciplinaire de nombreuses structures, accentuée par l'avancée rapide de technologies de l'information et de la communication, de nouveaux capteurs de petite dimension et intelligents offrent de nouvelles perspectives pour le suivi des ouvrages de génie civil. Le génie civil est en effet l'un des rares secteurs de l'ingénierie qui n'introduit pas de manière intégrée et raisonnée les composantes « électronique » et « nouvelles technologies » dans le suivi du comportement des ouvrages, pour former, à l'instar de ce qui existe en mécanique avec la mécatronique, en aéronautique avec l'avionique, une discipline nouvelle : la **civionique**. Ce nouveau concept, déjà largement développé dans l'enseignement supérieur au Canada et aux Etats-Unis, pose trois enjeux globaux :

- **sociétal** : la notion de construction durable ne se réduit pas aux seuls aspects environnementaux pour les ouvrages neufs. Elle se prolonge dans les ouvrages existants en leur permettant de fonctionner et de rendre des services plus longtemps et plus efficacement. Dans ce contexte, l'exigence de performance et le contrôle de cette performance participent au développement effectif de ce concept.
- **éducatif** : l'introduction de nouvelles technologies, de capteurs, et à terme de l'émergence de la civionique, affecteront l'enseignement du génie civil, comme l'avionique a modifié l'enseignement de l'aéronautique. Ce nouveau paradigme éducatif aura autant d'impact que l'introduction de sciences molles a eu dans le cursus des ingénieurs.
- **organisationnel** : la généralisation des concessions d'infrastructures, leur privatisation et leur productivité sont des enjeux stratégiques pour améliorer la performance des infrastructures. Elles devraient à terme permettre de concevoir des systèmes cohérents intégrant conception/maintenance/organisation.

La plupart des experts internationaux (Cf. rapport FHWA-DTH61-01-P-00347) s'accordent sur les quatre grandes thématiques suivantes avant de bénéficier pleinement des avantages d'une gestion patrimoniale efficace des infrastructures de transport :

- a) **Nature du système**. Les éléments géotechniques, les chaussées et les éléments structuraux (c'est-à-dire construits), en association avec les éléments d'exploitation (personnels, trafic, accidents, incidents, sécurité, lois & contrôles, organisationnels...) doivent former un système socio-technico-économique en

interaction avec les systèmes naturels (climat, vieillissement, dégradations & endommagements liés aux aléas et aux causes naturelles) ;

- b) **Mesures de diagnostic et d'évaluation.** La connaissance du comportement de ce méta-système précédent implique de disposer de mesures ou d'indicateurs observables, objectivement mesurables et pouvant être tracés pour chaque élément de ce méta-système, qu'il soit pleinement ou partiellement contrôlable. Ceci est donc particulièrement vrai pour les éléments construits (ouvrages) ;
- c) **Performance et modélisation.** La gestion des ouvrages est aujourd'hui conduite en grande partie sur deux niveaux : les actions de routine et les actions correctives. La première consiste à appliquer une maintenance légère visant à résoudre les petits problèmes détectés durant les inspections visuelles ou détaillées. La seconde intervient lorsqu'un problème grave est détecté, conduisant souvent à des interventions lourdes. Afin de les atténuer, il est indispensable de pouvoir suivre le comportement des ouvrages avant tout problème (maintenance préventive). Ceci implique qu'avant toute implémentation d'une approche de gestion patrimoniale, il est essentiel de disposer de données et d'indicateurs fiables sur la performance et l'état des ouvrages, et de pouvoir projeter et prédire l'évolution de cette performance pour la prise de décision ;
- d) **Données sur l'état et maintenance.** L'existence d'une base de données fiable de l'état du patrimoine et d'une base de connaissance, reposant sur des données factuelles et scientifiques, sur l'efficacité des maintenances et des réparations sont deux conditions essentielles pour la mise en place de stratégies de gestion.

La gestion des ouvrages se décrit habituellement comme la formalisation des procédures de décision pour accomplir de manière optimale l'investissement de fonds publics (et de plus en plus privés) dans les infrastructures neuves ou existantes. Ces décisions de gestion ont des implications significatives tant sur le plan économique que sur la sécurité du public ; les prises de décision doivent donc reposer sur des données et des indicateurs fiables et robustes. Alors qu'un nombre de plus en plus important d'ouvrages ou de structures ont fait l'objet d'instrumentations parfois très poussées, peu a réellement été accompli pour développer des méthodes d'acquisition et de traitements efficaces de données pour fournir de manière intégrée et cohérente des éléments décisionnels sur le comportement des ouvrages. Ce n'est qu'à cette condition, que des analyses économiques réalistes, des scénarii et des analyses de coûts de cycle de vie crédibles pourront être menées.

4. LE PROGRAMME DE RECHERCHE S3

Les enjeux précédents mettent en évidence l'importance pour les maîtres et gestionnaires d'ouvrages de disposer d'ouvrages hautement durables et de durée d'usage accrue. Ils dureront donc non seulement plus longtemps, mais devront l'être dans des conditions de demandes d'entretien bien inférieures. De plus, ils pourront être modifiés pour s'adapter à des changements rapides d'exploitation. Pour cela, les systèmes de gestion de pont dans le futur devront être basés sur la meilleure information, la meilleure connaissance, la meilleure technologie, et les meilleurs outils de support de décision. Ces systèmes procureront aux décideurs la possibilité de choisir la ligne de conduite optimale pour un pont ou une population des ponts à un point quelconque de leur vie et pour n'importe quel horizon de planification.

Idéalement, la surveillance de santé consiste à identifier, par des moyens appropriés de mesure et des analyses, la localisation et la sévérité d'une modification structurale (considéré comme un endommagement ou une dégradation par rapport à un état de référence), et à permettre un contrôle des coûts de maintenance. La surveillance de santé des ouvrages peut donc être définie comme la mesure des conditions d'exploitation et des réponses d'une structure afin de suivre et d'évaluer les symptômes d'incidents opérationnels, d'anomalies et/ou de dégradations qui peuvent affecter l'intégrité, l'aptitude au service et l'exploitation. Le retour sur investissement d'une surveillance de santé intégrée dans le contexte d'exploitation et de gestion d'un ouvrage peut donc être significatif. Cette surveillance de santé est à comparer avec la surveillance de santé chez l'homme pour constituer la colonne vertébrale d'un programme intégré de gestion d'infrastructure. Le rapprochement entre santé humaine et santé structurale n'est pas neutre et vise à promouvoir, par analogie avec le secteur de la santé chez l'homme, à la définition de véritables politiques de santé structurale. Il ne s'agit plus alors de réparer (politique de soin) lorsqu'un endommagement est détecté, mais de mettre en place des stratégies de prévention (politique de santé), démontrant ainsi tout l'intérêt d'une démarche préventive de la maintenance.

La Surveillance de Santé Structurale (S3) se décompose en trois thématiques :

- la surveillance proprement dite, ou **surveillance opérationnelle** qui englobe l'instrumentation, la mesure et la gestion de l'information ;
- le **diagnostic** qui est constituée du traitement des données (activité pouvant être partagée avec la surveillance), de la définition d'indicateurs d'endommagements, de tests de discrimination (seuils d'alerte) ;
- l'**identification structurale** dont l'objectif est de fournir des informations prédictives sur le comportement de l'ouvrage (résistance, durée de vie...) intégrées dans le système de gestion.

Le but ultime de cette démarche est donc l'implémentation d'une approche globale et intégrée de la gestion et de l'exploitation des ouvrages. Ce n'est qu'à ce prix(!) qu'un investissement dans un système de surveillance de santé se justifiera. Par exemple, ponts et murs de soutènement, chaussées, contrôle de trafic et systèmes de sécurité sont des composants interconnectés d'un système agrégé de transport. Ces composants sont eux-mêmes en interaction avec d'autres systèmes, organisationnels ou sociétaux. In fine, la surveillance de santé structurale (S3)

doit conduire à l'amélioration de la sécurité des ouvrages, à l'utilisation optimale de leur performance, et à des conditions d'exploitation facilitées et des actions de maintenance équilibrées.

Le projet porte donc sur les trois composantes précédentes de la Surveillance de Santé Structurale. Il a donc pour ambition de traiter le corpus technique de la surveillance de santé dans sa globalité et de définir des scénarii d'applications possibles.

Les enjeux et les objectifs scientifiques du projet ont pointé que la Surveillance de Santé Structurale nécessitait aujourd'hui un investissement important sur les plans conceptuels, technologiques, techniques et opérationnels. L'absence de recommandations ou de guides sur le sujet pour recenser et acquérir des informations objectives sur les tous les aspects de la performance et du comportement des ouvrages, reste un frein dans la généralisation de la pratique chez les maîtres d'ouvrages. Les exigences de recherche portent donc autant sur le développement de méthodes et d'outils scientifiques et techniques que sur l'établissement de principes méthodologiques.

Pour cela, le projet S3 est divisé en 5 groupes de travail (GT) dont la coordination et le fonctionnement sont assurés par le comité de pilotage du projet :

- Groupe de travail GT1 : Corpus technologique de la surveillance opérationnelle
- Groupe de travail GT2 : Corpus technique du diagnostic
- Groupe de travail GT3 : Corpus technique de l'évaluation structurale
- Groupe de travail GT4 : Scénarii d'applications
- Groupe de travail GT5 : Recommandations

5. GROUPE DE TRAVAIL N°1 : CORPUS TECHNOLOGIQUE DE LA SURVEILLANCE OPÉRATIONNELLE

Les ingénieurs n'ont pas attendu le début du XXI siècle pour introduire une démarche de surveillance de santé structurale. Ils ont appliqué, depuis de nombreuses années, des formes heuristiques de surveillance de santé, au travers notamment de leurs inspections visuelles. Parallèlement, des technologies de systèmes intelligents de transport et l'investissement dans les circuits de vidéo-surveillance, de capteurs, de hardwares et de softwares pour la surveillance opérationnelle de l'exploitation des infrastructures ont fait leur apparition. Mais l'intégration de ces systèmes utiles à l'exploitation, et de systèmes de surveillance structurale de la santé n'a jamais été réellement menée, y compris sur des ouvrages exceptionnels. L'objectif de transformer la pratique courante en une démarche rationnelle et efficace, par intégration de la surveillance opérationnelle et de la surveillance structurale, doit permettre de fournir au gestionnaire un flot de données objectives, cohérentes, précises et compréhensives pour servir de bases à des évaluations, des prédictions et des prévisions fiables et pertinentes. Un handicap inévitable est alors le volume considérable de données à gérer et la difficulté de traiter des données disparates en format et en valeur. Il y a donc un enjeu important à cette mise en forme – on parle de fusion – de ces données pour générer des résultats exploitables pour l'ingénieur et le gestionnaire.

5.1. Action GT1-1 : Fusion de données

Le flux de données en grand nombre provenant de capteurs, d'échantillonnages différents..., acquises sous des conditions variables, requiert non seulement de normaliser ces données pour extraire les variations environnementales des variations structurales, mais aussi de les fusionner. La **fusion de données** consiste à intégrer des données provenant de sources disparates. Introduite par les systèmes de défense, ces techniques ont pour objectif de déterminer des situations de bataille, mais les champs d'application se sont étendus dans le cadre de l'analyse groupée de données provenant de plusieurs types de capteurs afin de procurer un système de décision robuste et efficace. La mission des techniques de fusion de données est d'intégrer des données issues de multiples capteurs avec pour objectif final une prise de décision plus robuste et plus fiable que celle provenant de l'analyse individuelle de chaque capteur. Cette fusion de données peut être réalisée de diverses manières, soit au moyen de méthodes statistiques, soit au moyen de réseaux neuronaux par exemple. Cette fusion de données peut se faire sur les mesures directement enregistrées sur l'ensemble des capteurs, ou sur des données déjà issues de la fusion de plusieurs capteurs. Le travail de l'action GT1-1 se prolonge sur les activités du groupe de travail GT2 du projet où plusieurs indicateurs d'endommagement seront définis puis comparés. Leur comparaison (ou fusion) peut alors être réalisée avec les mêmes techniques que celles développées dans l'action GT1-1.

Si la fusion est l'assemblage de données disparates en vue d'une prise de décision, le **data mining** est l'extraction de connaissances nouvelles à partir de grand volume de ces données fusionnées. La choix pris dans le projet S3 est d'effectuer cette extraction de connaissances à partir d'individus considérés à différent niveau de généralité et décrits par des variables prenant en compte la variation : c'est ce que l'on nomme **analyse des données symboliques** (ADS). Résumer des données importantes, à l'aide de « concepts » sous-jacents (essais, capteurs...), afin de mieux les appréhender et d'en extraire de nouvelles connaissances nouvelles constitue une question cruciale et abordable grâce à l'ADS.

Ces concepts, considérés comme nouvelles unités statistiques, sont décrits par des données plus complexes que celles habituellement rencontrées en statistique. Elles sont dites « symboliques », car en exprimant la variation interne inéluctable des concepts et en tenant compte des spécificités structurelles par des relations de la base de données, elles ne peuvent pas être manipulées uniquement par des variables numériques ou qualitatives. En effet, elles nécessitent l'utilisation de variables à valeur intervalle, histogramme, lois, ensemble de valeurs parfois pondérées et munies de règles et de taxonomies. Cette démarche a été appliquée avec succès sur deux

problèmes très différents. Le premier est la détection de modifications structurales sur un pont ferroviaire, le second celui de la mise en place d'un indicateur combinant plusieurs variables de dégradation des tours de refroidissement de centrales nucléaires. Dans ce dernier cas, les données considérées sont des fichiers de mesure sur une tour du parc de production d'EDF. Le suivi de ces ouvrages est réalisé principalement par trois types de mesures : le nivellement, le contrôle géométrique et l'inspection visuelle. La question posée est d'établir des corrélations entre ces trois types de données. Les concepts et les variables sont :

- 10 concepts créés à partir de 10 classes de hauteur en mètres,
- 17 variables symboliques ou classiques provenant de fichiers de contrôle géométrique et de variables d'inspection visuelle.

Chaque variables est représentée par un histogramme. La Figure 2 donne un aperçu de la matrice de données symboliques obtenue. Chaque histogramme exprime la fréquence de chaque classe dans l'intervalle de hauteur qui lui correspond. Chaque intervalle associé à une variable exprime l'écart entre la plus petite et la plus grande valeur rencontrée pour cette variable dans l'intervalle de hauteur qui lui correspond (barre de couleur). Il est positionné par rapport au min des min et au max des max (rectangle de cadre noir) de tous les intervalles associés à la variable considérée. On représente également sur chaque intervalle la moyenne des milieux (point noir) et l'intervalle moyen des intervalles associés à cette variable. Cet intervalle moyen est représenté par une barre noire qui relie la moyenne des min et la moyenne des max de tous les intervalles associés à la variable pour les différents intervalles de hauteur. Pour une variable donnée, seule la barre de couleur diffère d'une ligne à l'autre.

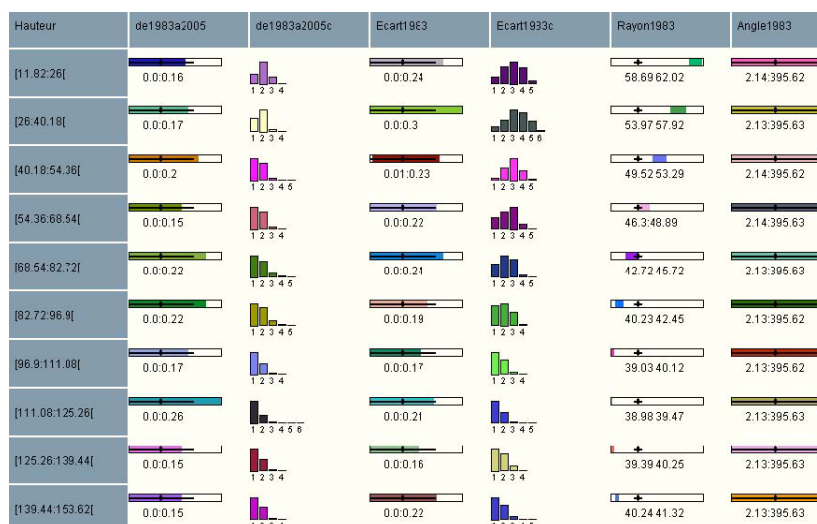


Figure 2 : Visualisation de la matrice de données symboliques (Syrokko)

L'application de la méthode des nuées dynamiques a pour objectif d'obtenir une partition d'un ensemble de concepts (ici les 10 classes de hauteurs caractérisées par les variables sur les contrôles géométriques et visuelles) en un nombre de classes dites « clusters », défini à l'avance. Le principe de l'algorithme consiste à partir d'une partition au hasard, d'en déduire un prototype pour chaque classe puis de créer une nouvelle partition en affectant chaque individu à la classe dont le prototype est le plus similaire. Ayant obtenu cette partition nouvelle, on peut itérer le processus jusqu'à convergence d'un critère d'inertie qui décroît à chaque itération. Les prototypes sont des vecteurs d'histogrammes et/ou d'intervalles représentatifs de chaque classe de la partition trouvée (Figure 3). La classification en 2 classes nous montre qu'il y a une différence de comportement entre le bas de la tour et le reste de la tour. Le module STAT développé par SYROKKO permet également de visualiser un tableau croisant deux variables histogrammes sous la forme d'un BiPlot. Ainsi, la Figure 4 croise les modalités des histogrammes des longueurs de fissures en ordonnée et avec les écarts géométriques entre 1983 et la théorie en abscisse. A l'intérieur de chaque case le produit de la fréquence d'une modalité de la première variable avec celle d'une modalité de la seconde variable (dit « croisement ») est donnée pour chacune des classes de hauteurs représentées par des barres de couleur. Les longues fissures sont bien présentes en majorité vers le milieu-haut de la tour, là où les écarts géométriques sont plus faibles. En partie basse de la tour les écarts géométriques sont plus élevés et les fissures moins longues. Très peu de fissures très longues en bas de la tour.

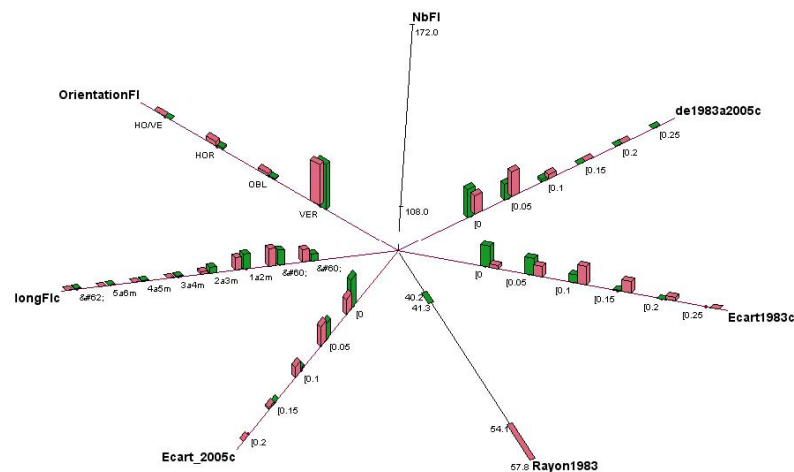


Figure 3 : Représentation de 2 classes de hauteur regroupées par classification automatique (classe des hauteurs basses en rouge, classe des hauteurs hautes en vert-Syrokko)

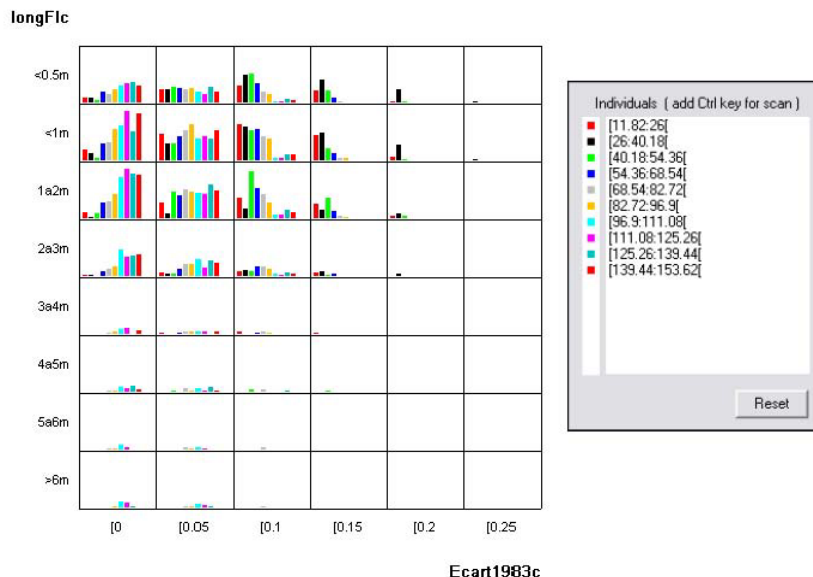


Figure 4 : Exemple de visualisation des corrélations par BiPlot (Syrokko)

5.2. Action GT1-2 : Outils d'information

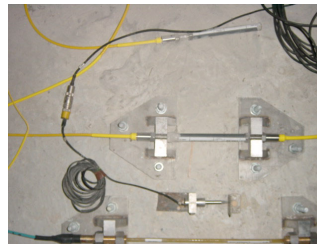
Il existe de nombreux types de capteurs et/ou sondes disponibles pour mesurer presque n'importe quel paramètre. En outre, les chercheurs continuent à développer de nouvelles technologies et des techniques qui permettent des mesures plus fiables, plus précises pour un coût réduit. Afin de choisir et d'évaluer les capteurs parmi tous ceux disponibles dans le commerce, quelques rappels terminologiques de base sont nécessaires. Une compréhension fondamentale des critères à considérer lors du choix de la métrologie est également nécessaire. L'action GT1-2, placée sous la responsabilité de la société SITES et faisant intervenir les laboratoires, organismes ou sociétés partenaires du projet oeuvrant dans l'instrumentation des ouvrages (LCPC, CETE, AVLS, ADVITAM), est de faire d'une part le bilan des outils métrologiques et de communication existants, et d'autre part de préciser leur cadre d'utilisation.

La plupart des capteurs peuvent se caractériser par un certain nombre de critères qui facilitent leur choix. La première étape en choisissant la métrologie pour une application particulière est de caractériser les paramètres d'entrée et l'environnement dans lequel ils seront mesurés. Cela inclut :

- l'identification des variables à mesurer,
- les valeurs nominales et les amplitudes attendues,
- les propriétés spatiales et temporelles des variables (statique, dynamique, local, global),
- la précision recherchée,
- les conditions environnementales dans lesquelles les mesures seront effectuées (humidité, température, interférences électromagnétiques, sels corrosifs,...),
- la durée de mesure (jour, semaine, mois, année...).



Accéléromètres



Fibres optiques
Capteurs de déplacement



Cordes vibrantes

Figure 5 : Exemples de capteurs en surveillance de santé structurale

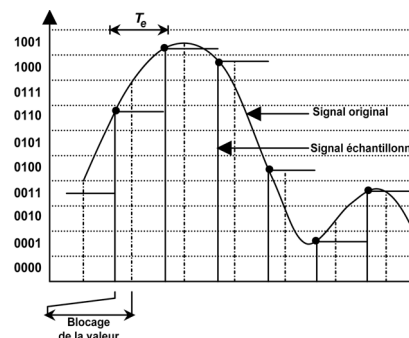
Après avoir définis ces exigences, un éventail de **capteurs** (Figure 5) peut être identifié. Afin de choisir les différents capteurs, il y a plusieurs critères importants qui doivent être considérés. Ces critères peuvent être répartis en trois catégories: les caractéristiques de performance du capteur, les contraintes environnementales et les considérations économiques. L'objectif en évaluant ces critères est de choisir la métrologie qui sera la plus compatible avec les variables identifiées et les contraintes environnementales. Ceci assurera que les capteurs choisis maximisent la fiabilité et l'efficacité des mesures tout en réduisant au minimum l'incertitude.

Les caractéristiques de performance d'un capteur décrivent sa manière de se comporter dans des conditions typiques d'utilisation (statiques et dynamiques). Les caractéristiques de base sont la sensibilité, la résolution, la discrimination, l'étendue, la linéarité, les hystérésis, la précision, la répétabilité, la stabilité, le temps de réponse, et la réponse en fréquence. Les contraintes environnementales qui doivent être considérées en choisissant les capteurs plus incluent souvent la température, l'humidité relative, la dimension, l'isolation, et les effets thermiques. Les considérations économiques les plus importantes sont: le coût, la disponibilité, la fiabilité, la facilité d'installation, et les besoins associés d'acquisition de données.

L'**acquisition de données** est le processus par lequel l'information produite par les phénomènes physiques est rassemblée, traitée et transmise pour l'analyse et l'interprétation. Les capteurs produisent des signaux numériques ou analogiques qui représentent les variables physiques mesurées ou surveillées. Les systèmes d'acquisition de données rassemblent les signaux produits par les capteurs, les conditionnent et les convertissent sous forme appropriée, et les transmettent à une centrale d'acquisition (ordinateur). La plupart des systèmes d'acquisition de données partagent les trois composants primaires suivants: acquisition de données, périphériques d'acquisition de données, logiciel d'acquisition de données. Il y a un certain nombre de critères à considérer en choisissant des systèmes d'acquisition de données pour surveiller un ouvrage. Ils incluent habituellement des critères subjectifs et objectifs. Les critères subjectifs seront les considérations de dimension et de fiabilité du fabricant, de la disponibilité de soutien technique, de la facilité d'utilisation... Les critères objectifs à considérer sont l'architecture, le convertisseur, la vitesse, la résolution, la précision... Il y a trois types d'architectures d'acquisition de données à considérer: dispositifs portatifs, systèmes de type PC, systèmes autonomes. Les signaux produits par la plupart des capteurs exigent habituellement une certaine forme de traitement électrique de sorte qu'ils soient compatibles avec le convertisseur. Les conditions de traitement de signal peuvent typiquement inclure: l'amplification ou l'atténuation des signaux, le filtrage des composants non voulus de signal, de l'isolation des signaux, et des fonctions d'interface. Un convertisseur analogique-numérique change une tension analogique en nombre numérique (Figure 6). Le type de convertisseur utilisé affectera la vitesse et la précision des mesures. La vitesse est la rapidité d'acquisition de données; elle devrait être compatible avec la vitesse à laquelle les mesures varient avec le temps. Cette caractéristique est typiquement indiquée comme fréquence maximale d'échantillonnage. Elle dépend habituellement du type de convertisseur qui est employé et de la configuration des entrées. La résolution est une propriété déterminée par le convertisseur du système d'acquisition de données. Elle définit le plus petit changement mesurable dans le signal d'entrée et est un facteur qui détermine la précision de la mesure. Cette dernière est affectée par beaucoup de facteurs. La résolution est un facteur important, mais d'autres sont à considérer comme le gain, l'erreur d'offset, l'erreur de linéarité, la dérive et le bruit. Il y a enfin un certain nombre de caractéristiques d'entrée à considérer en choisissant un système d'acquisition de données: configuration d'entrée, amplitude d'entrée et impédance d'entrée.



Cartes d'acquisition



Echantillonnage et quantification

Figure 6 : Matériel d'acquisition et principe de quantification

Pour les plus grands systèmes de surveillance de santé où des mesures distribuées et l'étude de plusieurs phénomènes sont exigées, il est souhaitable d'avoir un **réseau** discret et distribué de capteurs et de systèmes d'acquisition connectés et contrôlés de manière centralisée. Un système modulaire et réparti est alors capable d'évoluer. Il est crucial dans cette perspective de disposer d'une plateforme cohérente et uniforme de transfert de données pour assurer l'interconnectivité, l'interopérabilité et la disponibilité des données. Les données numériques doivent être en général disponibles, communiqués et transférés par diverses interfaces de communication avec leurs protocoles correspondants. La transmission des données et la communication exigent l'utilisation d'une plateforme capable de se connecter par interface à divers systèmes.

Les **câbles** sont un composant nécessaire de n'importe quel système de surveillance de santé en particulier quand les capteurs sont répartis sur un réseau. La conception de ce câblage est importante. Une conception structurée d'épine dorsale est recommandée pour fournir une plateforme flexible, précise qui facilitera une communication fiable entre les divers composants. Il y a deux options de base disponibles : les câbles classiques (cuivre) et les fibres optiques. Les câbles de cuivre peuvent être utilisés sur n'importe quel système. Les fibres optiques le plus souvent sont employées pour des applications de gestion de réseau. Enfin, les dispositifs sans fils sont largement disponibles dans des applications de communication et de réseau. La plupart des dispositifs sans fils laissent actuellement des vitesses maximales de transfert de 10-11 Mbps. La géographie locale, la topographie et d'autres caractéristiques d'emplacement déterminent l'efficacité d'un raccordement sans fils. Une enquête d'emplacement est exigée pour déterminer si la performance est possible pour une application donnée.

N'importe quelle mesure à un capteur est le résultat d'une interaction entre ce capteur et son environnement. En raison de cette interaction, un capteur est potentiellement un dispositif à entrées multiples et à sorties multiples. Un programme complet de **calibration** est recommandé pour n'importe quelle application afin d'identifier et d'évaluer les sources d'erreur possibles. Un tel programme exigera la calibration et la vérification des différents composants d'acquisition du capteur et des données dans des conditions connues, la calibration et la vérification du système intégré de mesure (capteurs, acquisition de données et communication) dans des conditions connues, et la calibration et la vérification du système intégré de mesure sur la structure réelle.

Une mesure pour laquelle la **précision** est complètement inconnue n'a aucun intérêt. Il est donc nécessaire de savoir comment estimer la fiabilité des données expérimentales. Les erreurs de mesure sont divisées en deux types : erreurs systématiques et erreurs aléatoires. Les erreurs systématiques sont les mêmes pour chaque observation avec une installation et une méthode de mesure données, ou sont fonction de la valeur de la quantité observée. Ces erreurs sont souvent dues à la conception imparfaite de l'installation de mesure et les approximations faites par rapport à la situation réelle. Les erreurs de manipulations sont également des erreurs systématiques. Les erreurs aléatoires sont des variations dues à un certain nombre de variables non contrôlées. Les observations successives de la même quantité devraient former une épreuve aléatoire. On assume souvent que des erreurs aléatoires suivent une distribution normale. Les processus statistiques de contrôle de qualité sont une nécessité pour traiter les systèmes complexes avec nombreux composants et une grande quantité de points d'observations. Une description détaillée du système de mesure et des caractéristiques de l'instrumentation doit souvent accompagner la présentation préliminaire du procédé de mesure. Une réponse typique mesurée par un capteur et son système d'acquisition de données inclura cinq composants : erreurs liées au capteur, erreurs liées à la chaîne de mesure, erreurs systématiques, réponse structurale apparente, et réponse structurale réelle.

Les régimes d'acquisition de données et les scénarios de contrôle sont basés sur les caractéristiques exigées des phénomènes pour être capturés et sur les limitations du système de mesure. En général un système de surveillance devrait capturer des effets basses fréquences/longue durée, hautes fréquences/courte durée, effets environnementaux et incidents. Les composants de contrôle d'acquisition de données devraient être flexibles pour l'analyse de phénomènes à long terme à des vitesses souhaitées tandis que les événements à court terme peuvent être surveillés selon un balayage programmé.

C'est la **collecte des données** et le contrôle qui déterminent la quantité et la qualité des données, qui influencent le choix des méthodes d'analyse, de stockage, d'accès et d'interprétation. Une conception qui incorpore une commande centralisée des composants de système d'acquisition de données est recommandée pour la surveillance à long terme de structures principales. La collecte et l'**archivage des données** sont des aspects importants du système d'acquisition de données. Il y a trois étapes principales impliquées dans le processus de collecte de données : stockage provisoire de données, traitement et stockage de données. Les caractéristiques de collecte de données du système d'acquisition de données présenteront souvent certaines caractéristiques qui affecteront les données elles-mêmes: disponibilité des données rassemblées pour l'analyse par certaines méthodes notamment. Les caractéristiques temporelles et spatiales des données, l'ordre de collecte de données, les retards dus au système, les approches de méthodologie et de synchronisation utilisées doivent être clairement comprises et précisées. La méthode de réduction de données dépend également des phénomènes mesurés et de l'information. Les données rassemblées doivent être stockées localement ou transférées dans un stockage approprié.

Des **techniques de réduction** et de **traitement de données** sont souvent utilisées pour extraire l'information désirée à partir de cet ensemble de données. Des techniques informatiques sont également fréquemment employées pour identifier divers modèles ou pour extraire certaine information incluse dans les données. Les outils de traitement devraient être soigneusement choisis suivant le but et l'information qui doit être extraite à partir des données. Quand des données sont rassemblées sur plusieurs périodes ou à haute fréquence, la dimension des enregistrements informatiques peut être conséquente. Le volume de données est une question particulièrement importante en termes d'effort exigé pour l'identification et l'extraction des caractéristiques désirées. L'application de

techniques de réduction de données, de ré-échantillonnage aide à réduire la taille des données disponibles. Cependant il est impératif de maintenir les propriétés de base des données suivant le procédé de réduction de données. L'analyse de données symboliques (ADS) peut être d'un secours certain dans ce processus de réduction de données, pour ne conserver que les informations pertinentes. Une analyse préliminaire est nécessaire.

5.3. Action GT1-3 : Principes de surveillance opérationnelle

Les objectifs du groupe de travail GT1 sont in fine de définir les conditions opérationnelles de la surveillance de santé, et d'en préciser les outils de traitement de l'information utilisables. Les objectifs sur la surveillance opérationnelle viseront à traiter :

- des critères économiques et sociaux qui justifient la surveillance,
- de la nature de la méthode expérimentale à suivre (géométrie, dynamique, statique, localisée, court/long terme, variation lente/rapide...),
- de la définition des endommagements pour le système surveillé,
- des conditions, opérationnelles et environnementales, sous lesquels le système fonctionne,
- des limitations d'acquisition dans l'environnement opérationnel.

Bien que spécifique à chaque application, des principes généraux doivent être trouvés et une méthodologie globale de sélection du type de surveillance la plus appropriée doit être recherchée et définie. Placée sous la responsabilité de la société ADVITAM, avec l'aide du LCPC, de SITES et de SIROKKO, le travail mené dans cette action doit pouvoir conduire à définir les principes et les méthodes de la surveillance opérationnelle.

Les champs d'application de la surveillance de santé structurale pour un ouvrage portent respectivement la vérification, la sécurité, l'entretien et la maintenance ; les systèmes de surveillance visent donc à aider :

- l'exploitation des ouvrages,
- la maintenance et la gestion.

Ces deux modes d'exploitation du système de surveillance exigeront dans la plupart des cas des personnels différents et seront activés dans situations différentes. Alors que le contrôle de l'exploitation sur la plupart des grandes infrastructures s'effectue en temps réel, 24 h/24, exigeant ainsi une surveillance continue, l'apport d'un système de surveillance pour l'entretien et la maintenance constituera un outil de gestion permettant la planification des inspections, des budgets d'entretien... et aura des intervalles de scrutations pouvant aller de quelques heures jusqu'à plusieurs décennies. Le même principe s'applique à l'identification structurale (pronostic) car cette fonction est généralement réservée à des spécialistes en analyse de structure, s'effectuant souvent **off-line**.

Ces deux types de besoins se confondent dans le cas de la gestion des événements. Un **événement** correspond à l'avertissement d'une anomalie, d'une panne, d'un accident, de dommages structuraux, d'incident imprévu, d'intrusion, de sabotage... par la production d'une **alarme**, et par toutes les **activités** qui influenceront la sécurité, le trafic ou la durabilité de la structure. La gestion des événements fournira une évaluation de l'impact de l'événement sur la structure : plus précisément, l'impact sur le niveau admissible du service sera évalué. Sur cette base, un programme prioritaire sera assigné au traitement de chaque événement.

Pour l'exploitation d'un ouvrage, chaque événement sera surveillé par le système qui fournira une alerte ou une alarme, qui doit permettre d'identifier, de localiser et d'informer l'opérateur de la source l'événement. Une décision sera alors prise par l'opérateur, selon la nature de l'événement. Toute l'information collectée sur chaque événement doit être archivée (localisation, étendue, date et heure, évolution...). Le système visualisera en temps réel toute l'information liée aux événements, de manière la plus appropriée afin d'obtenir une représentation immédiate et efficace (cartes, tables, videos). La gestion des événements graves, tels que les événements naturels, les actions humaines, les dommages structuraux... fournira les informations nécessaires à l'évaluation des conséquences et à la planification des interventions, des évacuations, de la coordination de équipes, de l'attribution des ressources...

Les données fournies par le système de surveillance doivent s'intégrer dans le système de gestion des ouvrages, ce qui implique que ces données collectées soient formatées pour s'intégrer dans le système de cotation existant. Cette information codifiée fournira une base utile pour la hiérarchisation, la planification et l'évaluation des coûts d'entretien pour les éléments structuraux primaires et secondaires. Leur corrélation avec les résultats d'inspection, visuelle par exemple, est fondamentale. Cependant, les niveaux d'information et de collecte étant très différents, l'utilisation de techniques de fusion de données ad hoc est nécessaire.

Plusieurs **erreurs** peuvent entacher l'implantation d'un système de surveillance, conduisant à des performances médiocres, des coûts prohibitifs... On peut citer les erreurs classiques :

- la copie à l'identique d'un système de surveillance et d'intervention établi pour un autre ouvrage sans tenir compte des différences dans les facteurs externes et spécifiques,
- des choix décisionnels uniquement basés sur des considérations économiques,
- la substitution de la connaissance et de l'expérience au profit de la technologie,
- des choix et des ressources technologiques non durables,
- la sous-estimation des services professionnels pour la configuration, la mise en service, l'exploitation, et l'entretien du système.

Le **système de gestion d'ouvrage** (SGO), employé par le concessionnaire, l'exploitant ou le maître d'ouvrage, doit pouvoir incorporer les résultats de la surveillance. Pour les ouvrages exceptionnels, ce système de gestion est généralement spécifique, et il est encore plus essentiel que le système de surveillance et le système de gestion soient développés simultanément. Le SGO doit inclure un système de cotation basé sur l'inspection et la surveillance (notamment structurale) réalisée. L'absence d'un tel système de cotation rend la hiérarchisation des

actions d'exploitation et de maintenance sinon impossibles, tout au moins difficiles. L'une des lacunes rencontrées réside souvent dans l'absence de lien en SGO et système de surveillance structurale. Sur la base des résultats des diverses inspections (de routine ou détaillées) et du système de surveillance structurale, il est attendu que les inspections supplémentaires ou que les actions de maintenance soient lancées de manière préventive.

Le système de cotation doit être conçu pour s'assurer que les mesures nécessaires seront prises à temps afin de maintenir la sécurité des structures. De telles actions incluent la réparation et le renforcement mais aussi la protection de l'ouvrage vis-à-vis d'actions environnementales. La cotation des composants pour la gestion et la maintenance peut être influencée par de nombreux facteurs : l'aptitude au service et la sécurité structurale (capacité portante), la durabilité (maintenance optimale pendant toute la durée de service), la sécurité des usagers (risque et confort). La Figure 7 donne un exemple d'intégration d'un système de surveillance dans un système de gestion en parallèle des procédures d'inspection. La gestion d'un ou de plusieurs ouvrages peut tirer largement bénéfice des systèmes de surveillance dans la planification à long terme de l'entretien préventif et dans la maintenance corrective quotidienne. Il faut cependant souligner qu'il ne convient pas de se fonder uniquement sur les données et les résultats d'un système de surveillance mais sur la combinaison de cette surveillance avec les inspections et l'analyse faite par des experts.

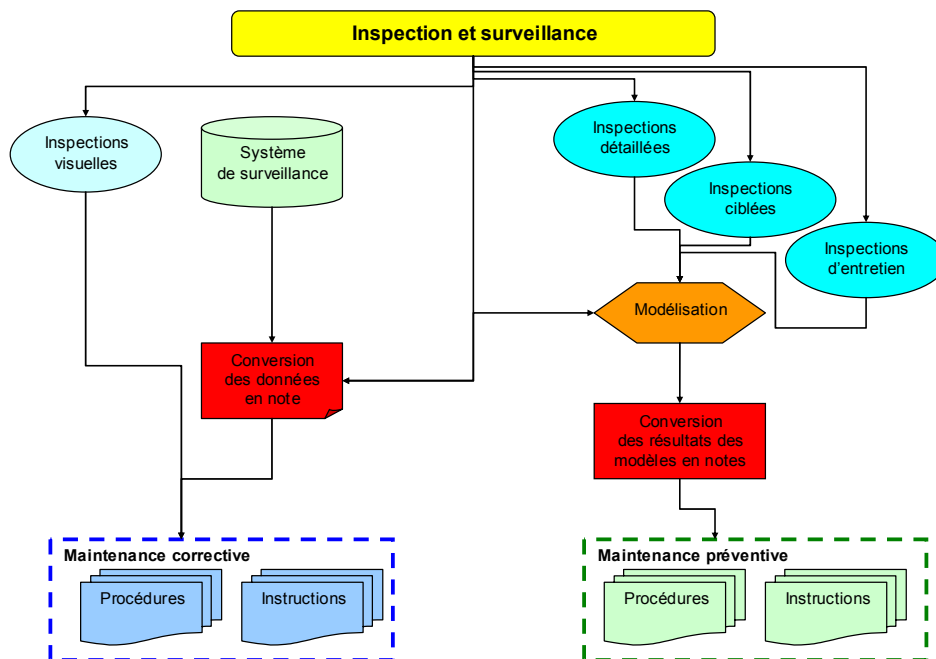


Figure 7 : Programme d'inspection intégré

6. GROUPE DE TRAVAIL N°2 : CORPUS TECHNIQUE DU DIAGNOSTIC

Le paradigme de la surveillance de santé structurale repose sur l'introduction d'indicateurs fiables et robustes permettant de détecter, de localiser, de quantifier et de prédire un endommagement. Une telle démarche est totalement innovante par les outils qui peuvent être mis en œuvre, bien qu'elle trouve son origine dans le concept de signature vibratoire bien connu des opérateurs de machines. Elle reste pourtant l'un des domaines les moins bien étudiés et pour lequel un effort de recherche doit être mené.

Le secteur de la surveillance de santé structurale qui retient le plus d'attention dans la littérature est sans nul doute celui de l'extraction de données. Les données extraites sont souvent des données « basiques » (déplacements, vitesses, accélérations...) et rarement exprimées en termes d'information utile pour l'ingénieur, ou relatives aux endommagements à détecter. L'extraction doit être un processus d'identification de propriétés sensibles vis-à-vis d'endommagements, déduites des mesures et devant faciliter la discrimination entre les états sains et les états endommagés. Ces indicateurs sont souvent adaptés au problème à traiter, et doivent être d'entropie minimale pour optimiser la prise de décision. Deux problématiques seront traitées dans le projet : la définition d'indicateurs fiables et performants, et la compression et la condensation des données, pour estimer leur degré de confiance (statistiques) et leur comparaison sur la durée de vie de l'ouvrage.

6.1. Action GT2-1 : Extraction d'indicateurs de surveillance

L'action GT2-1, placée sous l'animation du LCPC et faisant intervenir la société Syrokko, la SNCF et les CETE de Lyon et Sud-Ouest, tente d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- quels sont les indicateurs les plus appropriés pour exprimer la santé structural globale d'un ouvrage, en corrélation avec son intégrité structurale et son aptitude au service?
- quelle est la sensibilité de ces indicateurs aux différents types d'endommagements?
- est-il possible d'évaluer un endommagement sans état de référence?
- comment intégrer diverses approches expérimentales (géométrique, dynamique, statique) et métrologiques dans le diagnostic des ouvrages?
- quelles sont les stratégies et les conditions minimales d'utilisation de ces approches expérimentales et de ces indicateurs?

Ces réponses devraient permettre de mieux appréhender la liste des qualités intrinsèques des indicateurs. Le projet n'aura cependant pas la prétention de répondre à toutes les problématiques, mais à définir la procédure de sélection (critères, pertinence, robustesse, sensibilité...) des indicateurs. Cette démarche est validée sur des cas particuliers (ponts, tours de refroidissements). Le recours aux techniques de fusion de données abordées au GT1-1 est largement favorisé. La partie de surveillance de santé structurale qui a reçu le moins d'attention dans la littérature technique est très certainement celle de la discrimination des indicateurs. Il s'agit de développer des modèles statistiques pour séparer les valeurs des indicateurs liées à une modification structurale de celles qui ne le sont pas. Aucune étude n'a sérieusement été menée à ce jour sur l'introduction de modèles statistiques de discrimination. Or, ces modèles sont indispensables dans l'apprentissage des seuils de détection d'anomalie, problématique rencontrée systématiquement par les gestionnaires de grands ouvrages. L'objectif est de quantifier le dommage sur la base des indicateurs déterminés précédemment par des algorithmes de reconnaissance de forme. On s'intéressera en particulier à deux familles de techniques de discrimination :

- apprentissage supervisé : lorsque un état de référence existe, il s'agit de comparer les nouveaux états ou les états successifs à cette référence pour détecter tout changement. Le recours à des techniques statistiques (surface de réponse, tests de Fisher) ou à des méthodes neuronales ou génétiques peuvent être employées ;
- apprentissage non supervisé : il se réfère à une classe d'algorithmes qui sont appliqués à des données ne contenant pas d'exemples d'états de référence. Les tests d'hypothèses ou les méthodes neuronales peuvent alors être utilisées.

Le travail de l'Action GT2-1 est de développer de tels algorithmes de discrimination et de les appliquer sur des cas concrets. Ainsi, les premières applications réalisées sur des mesures dynamiques d'un pont ferroviaire rigidifié par serrage des bielles d'appui permettent d'apprécier l'apport d'une analyse de données symboliques par rapport une étude grossière des décalages fréquentiels liés aux modification structurales. L'analyse permet non seulement de discriminer les enregistrements en trois « clusters » optimaux (Figure 8 ; avant, pendant et après resserrage) et d'associer un enregistrement à la classe avant ou après. Ce classement facilite le suivi au cours du temps de l'efficacité du resserrage (Figure 9) et de positionner le comportement comme proche de la situation « resserrée (après) » ou proche de la situation « non resserrée (avant) ».

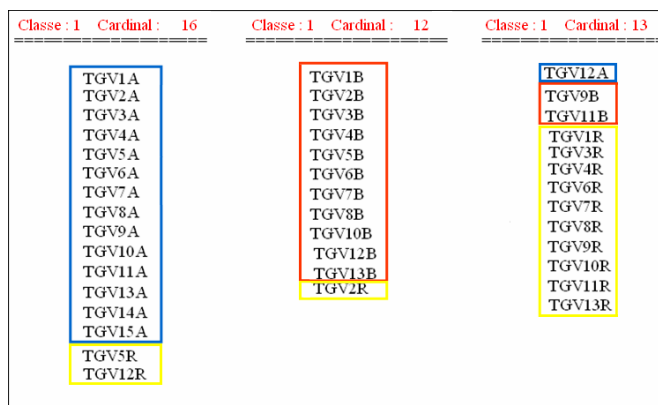


Figure 8 : Classification en 3 « clusters » des enregistrements de passage de TGV à partir des 4 premières fréquences identifiées

Essai (phase de resserrage)	Cluster
TGV3R (Phase 1)	Avant
TGV9R (Phase 3)	Après
TGV5R (Phase 2)	Non discriminé
TGV10R (Phase 4)	Après
TGV4R (Phase 2)	Avant

Figure 9 : Classification d'enregistrement en phases de resserrage sur les clusters « avant » et « après »

6.2. Action GT2-2 : Influence des conditions environnementales

L'influence des conditions environnementales sur la surveillance de santé structurale est de deux ordres : métrologique lorsqu'elle agit sur la mesure délivrée par les capteurs eux-mêmes, structurale lorsqu'elle influe sur le comportement mécanique. La respiration des ouvrages sous l'effet de ces conditions environnementales (température, hygrométrie...) a pour effet de polluer la capacité des indicateurs de diagnostic à mettre en évidence des modifications structurales. En effet, la mise en œuvre d'indicateurs de diagnostic (ou comme dans le GT3 de méthodes d'actualisation de modèles) implique de savoir distinguer ce qui est inhérent à une modification structurale (ou à une mauvaise modélisation) de ce qui est lié à d'autres sources. En particulier, des changements sur la valeur d'un ou plusieurs indicateurs peuvent provenir de variations de conditions climatiques ou d'erreurs de mesures. Ce problème a été étudié par la société Géonuméric sur la base de son expérience (Figure 10). Elle devrait se poursuivre dans l'établissement de lois de correction sur données expérimentales et de couplages thermomécaniques pour appréhender cette influence et la discriminer (en lien avec l'activité du groupe de travail GT3).

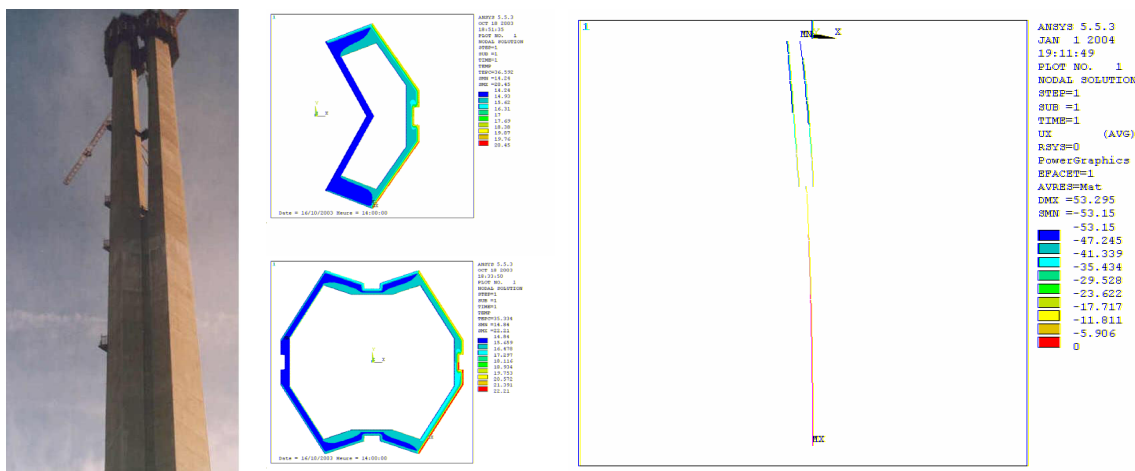


Figure 10 : Couplage thermo-mécanique dans la surveillance en construction du viaduc de Millau

7. GROUPE DE TRAVAIL N°3 : CORPUS TECHNIQUE DE L'ÉVALUATION STRUCTURALE

La définition de l'évaluation (ou identification) structurale est de quantifier les paramètres d'un modèle analytique à partir de données expérimentales. Une plus large définition peut en être donnée : il s'agit d'un corpus théorique et technique visant à conceptualiser, à modéliser, à concevoir des expériences pour mesurer et quantifier le comportement structural aussi bien que les phénomènes, afin de prendre des décisions. Les étapes d'une approche par identification structurale sont proches de celles du processus scientifique : hypothèses, conception d'expériences, validation. Mais l'identification structurale peut également aider à identifier des phénomènes qui ne sont pas complètement compris ; elle peut également être étendue à l'identification d'interactions entre issues légales, politiques, économiques et techniques. Par exemple, elle peut être employée pour identifier l'interaction entre phénomènes agissant sur la réponse d'un bâtiment, comme les interactions entre la performance de sous-systèmes de l'infrastructure, comme les ponts, les chaussées, le trafic... et le gestionnaire. Ceci fait de l'identification structurale, non pas un outil de validation de modèle seulement, mais également un cadre général d'intégration des données de gestion et de maintenance d'une exploitation. De nombreux problèmes, que tentera d'aborder le projet, se posent à la mise en place de cette démarche.

Un challenge important dans la surveillance de santé structurale réside dans la capacité du système à détecter, localiser des endommagements et à prédire leurs évolutions. Une telle démarche implique une approche intégrée qui couple surveillance et modélisation. Il est important de définir ce que l'on attend d'une telle approche. Une analyse de risque permet notamment d'identifier les sources des dommages potentiels et les techniques à utiliser pour évaluer et quantifier ces endommagements.

Pour chaque mode de défaillance potentiel, trois catégories de dommages peuvent être identifiées. La première est celle de dommages progressifs, comme la corrosion ou la fatigue. La seconde catégorie est celle des événements discrets éventuels, comme les surcharges ou les périodes de grand vent. Enfin, la troisième catégorie est celle des événements discrets exceptionnels, comme les séismes, les impacts de véhicule, le feu.

Après avoir identifiés les sources des endommagements, il est essentiel de déterminer les techniques qui pourront être utilisées pour les évaluer. La première question posée est celle de la manière dont l'évaluation doit être menée : en temps réel, en quasi-temps réel ou off-line à périodicité prédéfinie. Ceci influencera le

dimensionnement du système d'acquisition, les périodes d'échantillonnage mais aussi les besoins en calcul numériques.

Enfin, les techniques d'évaluation sont généralement classées en **méthodes paramétriques** (ou **physiques**) ou en **méthodes non paramétriques** (ou **informatives**). Des combinaisons sont évidemment possibles. Les techniques paramétriques utilisent des modèles mathématiques représentant la physique des phénomènes étudiés. Ces évaluations permettent une réutilisation pour des simulations sous d'autres conditions d'exploitation ou pour prédire l'évolution de l'endommagement de manière physique. Cependant, ces techniques imposent des coûts de calculs élevés.

Les techniques non paramétriques reposent sur les seules données de mesure pour évaluer l'état du système. Elles mettent en œuvre des techniques statistiques de régression ou de reconnaissance de forme comme les réseaux neuronaux ou les machines à vecteurs supports. Si elles peuvent capables de prédire une évolution, elles se comportent de manière médiocre pour classer la nature du changement observé. Il est donc courant d'utiliser des modèles paramétriques pour entraîner des modèles non paramétriques afin de reconnaître les cas d'endommagements. Cet équilibre entre méthodes dépend évidemment du volume de données disponibles et du niveau de confiance dans les modèles physiques (Figure 11).

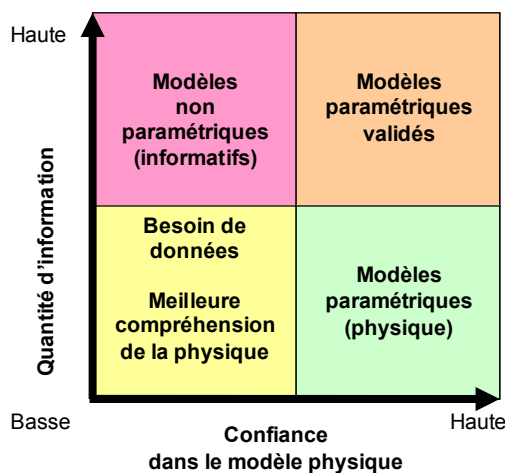


Figure 11 : Modèles pour la surveillance de santé

Selon qu'un modèle physique ou informatif sera utilisé, la nature et le volume de données nécessaires pour les calibrer ou les ajuster seront différents. En particulier, l'intérêt d'un modèle physique réside dans sa capacité à être utilisé pour calibrer les besoins en capteurs (positions, étendue, sensibilité, résolution...) car directement liés aux variables physiques. La Figure 12 donne un exemple d'échange d'information entre le modèle physique et les données acquises. Dans ce processus, l'interrogation du système de surveillance condense les données numériques et se limite à extraire les caractéristiques (rainflows) utiles : un tel processus s'appelle **fusion de données** et peut prendre des formes diverses. Il conviendra cependant de distinguer sur le modèle physique ou informatif sert uniquement à détecter et/ou localiser un changement structural, ou s'il est utilisé pour prédire le comportement futur. Suivant le cas, le besoin en termes de complexité de modélisation et de traitement de l'information sera très différent, et la manière, dont les données seront traitées conjointement avec la modélisation, diffèrera.

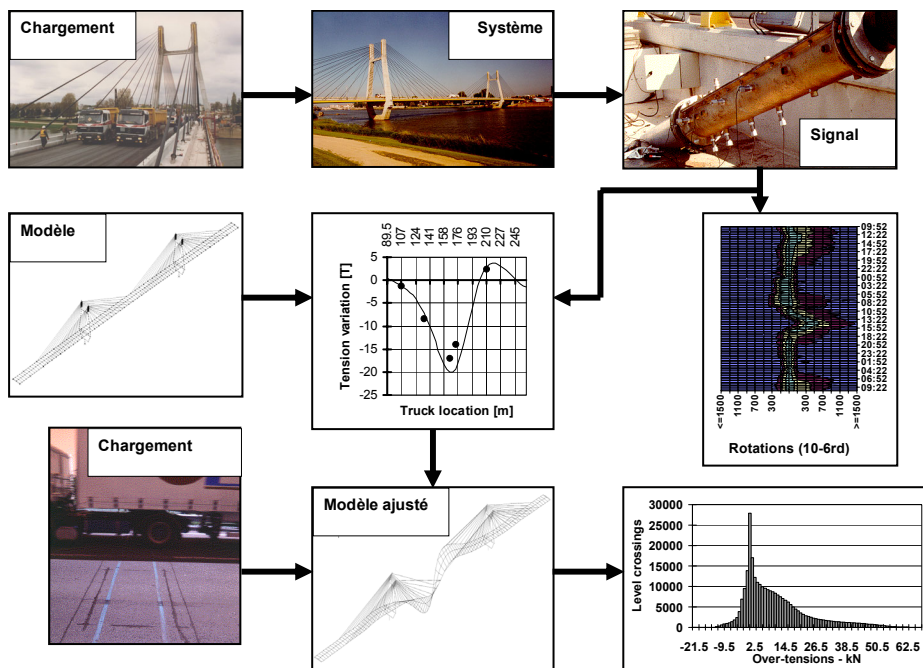


Figure 12 : Approche intégrée entre données acquises et modèle prédictif

Dans le cas de modèle aux éléments finis de grande taille, l'**actualisation** sur la base de données de surveillance peut se faire de deux familles de méthodes : les méthodes globales et les méthodes locales. Les **méthodes globales** sont basées sur la correction des matrices de rigidité du modèle (statique), de masse et d'amortissement (dynamique) ; elles peuvent conduire à des modèles fort peu significatifs bien que se calant bien aux données expérimentales, et nécessitent des investigations dynamiques avec excitation contrôlée. Les **méthodes locales** sont alors souvent préférées parce qu'elles offrent l'avantage de localiser les régions mal modélisées ou modifiées du modèle, et de sélectionner les variables physiques d'importance pour la mise à jour du modèle. Les méthodes consistent à réduire au minimum les écarts entre les données modales expérimentales et numériques en ajustant les inconnus du modèle. Développés pour l'analyse modale, ce sont les écarts dans les modes propres qui sont généralement minimisés, ce qui permet d'utiliser ces méthodes dans le cadre de procédures expérimentales non contrôlées, c'est-à-dire pour lesquelles l'excitation n'est pas mesurable (vent, trafic...).

D'autres indicateurs, plus simples mais basés sur une approche paramétrique ou physique du phénomène observée, existent et sont utilisables dans des procédures d'identification de dommages, mais ne permettent pas le diagnostic (c'est-à-dire l'identification de la source de la modification structurale) et encore moins la prédiction du comportement futur. Les flèches appartiennent à cette famille d'information comme les fréquences ou les déformées modales. Ces indicateurs sont souvent considérés comme primaires car leur faible sensibilité aux endommagements les rend peu à même d'être utilisés en pratique, sauf pour des niveaux d'endommagement élevés. Ces indicateurs ne permettent pas de localisation. Une alternative classique consiste à recourir aux courbures de déformées statiques ou modales, directement ou les faisant intervenir au travers d'indicateurs divers (flexibilité, énergies de déformation...).

Signalons enfin que de nombreuses techniques, comme celles de l'**analyse de données symboliques**, présentent le grand avantage de traiter directement l'information, de la fusionner sans faire appel à un modèle physique.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La surveillance des ouvrages se réduit trop souvent à la mise en place d'un programme d'instrumentation sans réelle coordination avec les besoins des maîtres d'ouvrages, des ingénieurs, des opérateurs... Dans l'ensemble, les instrumentations en phase de construction sont relativement bien conçues car le besoin est identifié et l'exploitation réalisée par le bureau d'études en général. Pour la validation a posteriori, le problème est encore binaire posé, mais l'exploitation tend à se diluer dans le temps. Enfin, l'utilisation de la surveillance pour la maintenance reste encore le grand perdant car ni le besoin, ni les moyens d'exploitation ne sont souvent clairement définis. Or, c'est très certainement à ce niveau que la surveillance peut présenter un intérêt majeur pour l'exploitant d'un ouvrage, car c'est la période la plus longue dans le cycle de vie de l'ouvrage et certainement celle qui est la plus entachée d'incertitudes.

De nombreux pays commencent à faire le nécessaire pour formaliser la surveillance des grands ouvrages. Si l'exploitant est souvent avare dans l'immobilisation du temps d'une ou de plusieurs personnes dans l'exploitation des données mesurées, il est aussi de la responsabilité des sociétés spécialisées dans l'instrumentation de fournir des produits et des services cohérents et répondant aux besoins du maître d'ouvrage ou de l'exploitant.

L'une des demandes récurrentes des bureaux d'ingénierie ou des opérateurs en charge de l'évaluation et de la gestion des ouvrages est celle de pouvoir disposer du profil de performance réel de leurs ouvrages ou de l'ouvrage concerné. Disons le clairement : ce n'est pas par la simple instrumentation, sauf pour des problèmes bien cernés, que la réponse à cette question sera donnée. Elle n'a de sens que si elle est liée à de la modélisation, qu'elle soit paramétrique ou non paramétrique. Elle ne sera également pertinente que si les données acquises sont traitées dans cette optique.

Les diverses sections de ce rapport montrent l'importance d'avoir une vision intégrée de la surveillance, allant de l'instrumentation au traitement de l'information. Plusieurs technologies émergentes permettent de disposer à court et moyen termes d'une telle démarche intégrée.

La première porte sur les **systèmes de mesure**. Un effort actuel porte sur le développement à grande échelle de réseaux de capteurs noyés dans les ouvrages. Ces études visent à fournir des capteurs sensibles, bon marché pouvant fonctionner avec l'énergie ambiante. L'application de ces capteurs intégrés est fortement liée à la physique du problème étudié.

L'**inférence statistique** pour le diagnostic de dommages met en œuvre des algorithmes qui analysent la distribution des caractéristiques extraites de la mesure afin de prendre des décisions. Les algorithmes utilisés dans le développement de modèles statistiques sont respectivement les méthodes de classification, les analyses de régression, et les détections d'anomalies. L'algorithme approprié au problème dépendra de la capacité d'exécuter un apprentissage supervisé ou non. L'apprentissage supervisé se rapporte au cas où des exemples de données relatives à des endommagements sont disponibles, en parallèle avec des comportements intègres. L'apprentissage non supervisé se rapporte au cas où les données disponibles ne concernent que la structure intacte. Le succès de la prise de décision peut être évalué par le taux global de mauvais classements (fausses détections, fausses alarmes, fausses positives...), les courbes opérationnelles de récepteur (ROC) et les intervalles de confiance sur la prévision. Un des challenges de cette prise de décision est celle de l'établissement de valeurs seuils pour la prise de décision. En particulier, des statistiques de valeurs extrêmes peuvent être utilisées pour l'établissement de ces critères afin de réduire au minimum les taux de mauvais classement. L'inférence statistique est souvent fondée sur l'hypothèse que la loi fondamentale des données est gaussienne. Cependant, l'acceptation de l'hypothèse de normalité conduit à des résultats erronés sur les valeurs extrêmes des données. Comme le problème de l'identification de dommages se concentre spécialement sur ces queues de distributions extrêmes, l'acceptation de la normalité est susceptible de fournir des erreurs dans la prise de décision. L'interprétation physique justifiant cette attention particulière est que les valeurs extrêmes sont susceptibles d'être influencées par des non-linéarités.

L'**identification des chargements** est également un besoin fort, notamment afin de simuler le comportement réel d'une structure dégradée. Cette démarche, très utilisée dans l'aéronautique ou la mécanique, est généralement omise dans la surveillance des ouvrages d'art. Or les techniques existent et permettent de détecter des changements dans les actions et d'identifier ces chargements. Une meilleure connaissance des sollicitations appliquées est garante d'une appréciation plus fine de la performance et de la fiabilité.

La **vérification** et la **validation des modèles** est essentielle dans une stratégie visant à prédire l'évolution de la performance. Un défi significatif est ici de valider les modèles non-linéaires.

Enfin l'**analyse en fiabilité** pour la prise de décision est l'un des enjeux majeurs de la surveillance. La prise de décision se fonde sur l'évaluation de la fiabilité pour décider de la ligne de conduite à prendre. Cette analyse commence par identifier les modes de défaillance et les variables aléatoires qui contribuent à ces modes de défaillance. Une telle démarche peut reposer sur une **analyse de risque**. Diverses méthodes sont alors disponibles pour calculer la probabilité de dépassement d'une exigence donnée pour un critère précis. L'analyse de fiabilité est particulièrement utile pour estimer la performance des systèmes en fonction des incertitudes sur les variables.

Toutes ces technologies et approches émergentes impliquent une **intégration** au niveau de la problématique (**approche globale**) mais aussi une intégration au sein même des éléments sensibles (**capteurs**). Ceci implique de rechercher des solutions robustes mais il est certain que l'avenir de la surveillance de ouvrages passera par cette démarche globale afin de prédire la performance des ouvrages au cours du temps, et d'optimiser au mieux la prise de décision en termes de gestion, d'exploitation, de maintenance, d'entretien et de réparation. La nature multidisciplinaire de la **surveillance de santé structurale**, telle que présentée dans ce rapport, se trouve encore dans un état embryonnaire de développement, mais son potentiel énorme pour la sécurité des biens et des personnes, pour un développement durable des infrastructures, devrait former le défi des ingénieurs de demain.

REMERCIEMENTS

Les recherches et les résultats rapportés dans cet article bénéficient de l'aide apportée par la Région Ile de France et par la Mission Génie Civil et Construction du Commissariat Général au Développement Durable (Direction de la Recherche et de l'Innovation/Service de la Recherche).