Du retour d'expérience en génie civil

Laurent PEYRAS[1], Daniel BOISSIER[2]

[1] *Cemagref*
Unité de recherche Ouvrages hydrauliques et Hydrologie
BP31, Le Tholonet, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1, FRANCE
damien.serre@cemagref.fr ; corinne.curt@cemagref.fr ; laurent.peyras@cemagref.fr

[2] *Université Blaise PASCAL – Clermont II*
Laboratoire de Génie Civil
24, avenue des Landais, BP206, 63174 Aubière Cedex, FRANCE
d.boissier@cust.univ-bpclermont.fr

RESUME. Le retour d'expérience revêt une importance particulière en génie civil, pour l'analyse des défaillances et de la sûreté des ouvrages et des sites et pour les politiques d'inspection, maintenance et réparation. Les données du retour d'expérience peuvent avoir des formats très différents selon les secteurs du génie civil : mesures expérimentales, informations expertes, observations visuelles, données d'auscultation... Ces formats vont donner logiquement autant de pratiques différentes de capitalisation du retour d'expérience, puis ensuite de traitement et enfin de valorisation des informations capitalisées pour le diagnostic, l'évaluation de la sécurité, l'analyse de risques ou encore la gestion des ouvrages et des sites. Le Groupement d'Intérêt Scientifique GIS MR-GenCi regroupe différents partenaires intéressés et susceptibles de faire avancer la connaissance dans le domaine de la maîtrise des risques en Génie Civil. Il vise à définir et à contribuer à des axes de recherche en matière de risque : définition de stratégies scientifiques pluridisciplinaires, évaluation des incidences des risques par les ingénieurs, analyse des problèmes complexes de maîtrise des risques, élaboration des solutions scientifiques et techniques… Le thème 4 du GIS MR-GenCi a consisté à dresser un panorama des pratiques en matière de retour d'expérience en génie civil. Il a réuni, à travers un groupe de travail, plusieurs acteurs du génie civil recouvrant des domaines très différents. Tout d'abord, cet article présente les pratiques du recueil du retour d'expérience. Il examine le format des données collectées et les moyens de capitalisation. Il propose ensuite une synthèse des approches de traitement des données du retour d'expérience. Enfin, il traite de la valorisation du retour d'expérience dans différents domaines du génie civil..

MOTS-CLÉS : génie civil, retour d'expérience, GIS MR-GenCI.

ABSTRACT. In civil engineering, feedback is of up most importance for the analysis of failures and works safety, inspection, maintenance and management. Feedback data can have very different formats according to the works and the field: experimental measurements, expert's information, visual observations, monitoring data... These formats logically lead to different practices of capitalization, treatment and valorisation of feedback. The goal is diagnosis, reliability assessment, risks analysis and risk management of the works. The GIS MR-GenCi included various partners interested in producing knowledge for risk evaluation in civil engineering: definition of scientific strategies, assessment of risk incidences by the engineers, analyzes of risk control problems, development of scientific and technical solutions... Topic 4 of GIS MR-GenCi has provided a panorama of the practices in using civil engineering feedback. This working group gathered several actors of civil engineering, covering different fields. This article first presents the practices of collecting feedback in civil engineering. Then it examines the format of collected data and means of capitalization. It indicates different approaches of processing feedback data. Lastly, it deals with feedback valorisation in various fields of civil engineering.

KEYWORDS: civil engineering, feedback, GIS MR-GenCI.

---

1. INTRODUCTION

A l'instar de nombreux domaines de l'industrie, le retour d'expérience revêt une importance particulière en génie civil, pour l'analyse des défaillances des systèmes de génie civil, pour la sûreté des ouvrages et des sites, mais aussi pour la gestion patrimoniale des ouvrages.

Les données du retour d'expérience peuvent avoir des formats très différents selon les secteurs du génie civil : mesures expérimentales, informations expertes, observations visuelles, données d'auscultation... Ces formats donnent logiquement autant de pratiques différentes de capitalisation du retour d'expérience, puis de traitement et enfin de valorisation des informations capitalisées.

Le Groupement d'Intérêt Scientifique « GIS MR-GenCi » regroupe différents partenaires oeuvrant dans le domaine de la maîtrise des risques en génie civil. Il vise à définir et à contribuer à des axes de recherche en matière de risque : définition de stratégies scientifiques pluridisciplinaires, analyse des problèmes complexes de maîtrise des risques, élaboration des solutions scientifiques et techniques… Le thème 4 du GIS MR-GenCi a réuni pendant 9 mois en 2003-2004 plusieurs acteurs du génie civil recouvrant des domaines très différents[1]. Il a dressé un panorama des pratiques en matière de retour d'expérience en génie civil. Cet article établit une synthèse de ce travail (Peyras *et al*, 2005).

Cette communication s'articule en trois parties. La première s'intéresse au recueil du retour d'expérience. Elle examine le format des données collectées et les différents moyens de capitalisation. La seconde partie propose une synthèse des différentes approches de traitement des données du retour d'expérience. On distingue les approches analytiques (traitements physique et fiabiliste) et les approches systémiques (traitement par les statistiques et par expertise). La troisième partie s'intéresse à la valorisation du retour d'expérience : diagnostic des défaillances des systèmes, évaluation de la sûreté (les niveaux de protection), prévision des évolutions des ouvrages dans le temps.

2. LE RECUEIL DU RETOUR D'EXPERENCE EN GENIE CIVIL

2.1. LE RECUEIL DU RETOUR D'EXPERIENCE BASE SUR L'EXPERIMENTATION DIRIGEE

Il s'agit là du moyen le plus naturel d'obtenir des informations relatives au retour d'expérience : à partir d'expérimentations dirigées, on collecte des données issues de ces essais, qui revêtent la forme d'observation et/ou de mesures. Ces expérimentations peuvent revêtir plusieurs formats correspondant à différentes échelles spatiales et temporelles : essais en laboratoire ou in situ concernant la structure réelle (ou partie de la structure) v/s essais sur modèles réduits ; essais en temps réel v/s en temps accéléré ; ou encore essais à partir de modèles et simulations numériques, expériences stochastiques...

[1] Le thème 4 du GIS MR-GenCi a réuni les organismes et leurs représentants suivants :
- Cemagref : Corinne CURT, Laurent PEYRAS
- CERIB : Etienne BOUCART
- CSTB : Aurélie TALON, Julien HANS
- ESIGEC - LOCIE : Nicole HENRIET, Etienne PERROTIN
- LCPC : Philippe LEPERT, Tristan LORINO
- SNCF : Gilles REBOUL, Jean François KERSALE
- Université Blaise PASCAL – CUST : Daniel BOISSIER, Marc SOLARINO
- Université Marne la Vallée : Katia LAFFRECHINE, Youssef DIAB

L'animation générale du thème 4 et la rédaction du rapport de synthèse ont été assurés par Daniel BOISSIER et Laurent PEYRAS, sachant que, chacun de ces membres ont contribué aux travaux.

L'approche expérimentale du retour d'expérience est utilisée de façon historique en génie civil. Elle concerne les produits du génie civil de fabrication standard ou de série (tels que les produits préfabriqués) ou encore les ouvrages à caractère unique qui peuvent être expérimentés sur site.

Elle est pratiquée dans le domaine des produits préfabriqués en béton : les poutres (rectangulaires, en I, à inertie variable – voir figure 1), les dalles alvéolées (extrudées et filées), les poteaux (rectangulaires et circulaires), des éléments de plancher nervuré et des éléments de dalle pleine. Des études expérimentales sont conduites sur ces éléments structuraux représentatifs de la production de produits de structures préfabriqués et les paramètres suivants sont mesurés : position des armatures, largeur des zones comprimées et des âmes, longueur et dimensions nécessaires au calcul du volume, poids de chaque élément, résistance du béton mesurée sur des carottes prélevées dans les produits. Dans une étude récente (CERIB, 03), les procédures de fabrication, d'essais et de mesures dans différentes usines européennes de préfabrication ont pu être comparées et ont permis d'identifier différents niveaux de qualité (par exemple sur la maîtrise de la géométrie des produits). Ainsi, une base de données générale sur les valeurs mesurées des géométries et des résistances (mesurées sur carottes ou sur éprouvettes moulées) a pu être constituée.

Une autre approche du recueil du retour d'expérience par l'expérimentation est pratiquée sur des ouvrages en montagne (les paravalanches, les pareblocs). Il s'agit là d'ouvrages à caractère unique, soumis à des sollicitations extrêmes liées à des aléas mal connus tels que les chutes de bloc ou les mouvements de terrains... Compte tenu de la nature très spécifique des sollicitations et du fonctionnement de ces ouvrages, l'approche retenue dans un tel contexte est l'expérimentation sur site du comportement de dalles de protection face aux chutes de blocs. Des essais en grandeur nature ont été réalisés et permettent de collecter des mesures d'endommagement (Mougin et al, 04).

Le recueil du retour d'expérience basé sur l'expérimentation est également mis en œuvre lors des essais en vieillissement accéléré. Le principe de ces essais est de « concentrer » l'environnement étudié (soit en nombre de cycles, soit en agressivité) pour qu'une durée réelle puisse être simulée sur une courte durée. Il est alors possible de suivre l'évolution des propriétés d'un matériau soumis à des sollicitations diverses et d'évaluer alors son aptitude à remplir une fonction donnée pendant certaine durée. Les essais en vieillissement accéléré les plus courants sont :

- les essais sous rayonnement ultraviolet (succession d'heures d'éclairement dans un Wezerométeur – ISO 4892) souvent utilisés pour les plastiques et les enduits de façade,
- les essais thermiques et hydriques (chaleur sèche en enceinte ventilée, chaleur humide, cycle séchage/humidité, cycle immersion/séchage) réalisés en enceinte contrôlée pour tout type de matériau,
- les essais mécaniques (usure, frottement) essentiellement pour les revêtements de sol.

2.2. LE RECUEIL DU RETOUR D'EXPERIENCE BASE SUR L'AUSCULTATION DES OUVRAGES EN SERVICE

2.2.1. Analyse systématique

Il s'agit de l'approche du recueil du retour d'expérience privilégiée dans les ouvrages de génie civil à grand linéaire, tels que les réseaux enterrés, les routes, les digues, etc. Les données du retour d'expérience sont obtenues par l'auscultation des ouvrages, organisée au moyen de l'observation visuelle ou de relevés instrumentaux et appuyée plus ou moins fortement par une part d'expertise, liée

le plus souvent à l'expérience de l'opérateur chargé des observations visuelles ou des manipulations techniques des instruments.

Cette approche est mise en œuvre sur le parc de chaussées en France (Bertrand *et al*, 98). Dans celui-ci, les données du retour d'expérience acquises sur site sont de deux natures :

- celles recueillies visuellement par des agents qualifiés (procédure de qualification renouvelée annuellement), selon une méthode formalisée qui s'appuie sur un catalogue précisant la définition des dégradations et de leurs niveaux de gravité (Lepert *et al*, 98) ; ces agents utilisent un ordinateur spécialisé, embarqué à bord de leur véhicule, qui leur permet de saisir leurs observations et positionne celles-ci grâce à un podomètre avant de les enregistrer dans un fichier ;

- celles mesurées par des appareils (Figure 1), telles que les propriétés de rigidités de la chaussée ou d'adhérence du revêtement (Lepert *et al*, 01) ;.

Deux niveaux de recueil de données (relevé et mesure) sont alors réalisés sur ces bases :

- le niveau « réseau » qui vise à évaluer l'état global d'un ensemble de routes et à préparer un programme d'actions d'entretien ; il combine relevés et mesures exécutés selon des procédures permettant de recueillir à bonne cadence des données agrégées ;

- le niveau « projet », qui vise à étudier une section en particulier pour définir précisément le type et le dimensionnement des travaux à y faire, et repose sur un recueil d'informations plus détaillé et à une cadence souvent beaucoup plus faible.

Figure 1 : Véhicule muni à l'avant d'un Transversoprofilomètre à Ultra-Sons

On retrouve une approche analogue dans les réseaux enterrés d'eau et d'assainissement. Les réseaux d'assainissement non visitables sont auscultés au moyen de caméras vidéo qui viennent filmer l'intérieur des conduites (Figure 2). L'opérateur réalise ensuite un relevé des désordres (cassures, fissures, effondrements...) consignés sur des rapports d'inspection vidéo. On a donc là des informations du retour d'expérience issues de l'auscultation vidéo des ouvrages (NF EN 752-7). Dans les réseaux d'eau potable, les données du retour d'expérience sont issues, soit des observations visuelles telles que des constatations de fuites directes sur le réseau, soit de mesures d'auscultation par des moyens plus sophistiqués (mesures des débits la nuit) ou encore sous forme de plaintes d'usagers (manque de pression, "eaux rouges", nuisances olfactives, etc.). (Alegre *et al*., 2000)

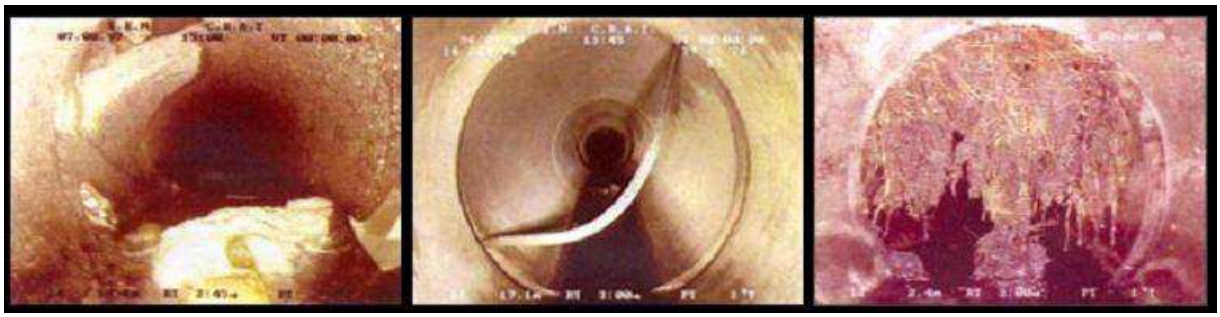

Figure 2 : Exemples de désordres rencontrés dans les réseaux d'assainissement non-visitables

Dans le domaine des digues, les données du retour d'expérience proviennent essentiellement des inspections visuelles des gardes-digues, consignés dans des rapports de visites. Elles peuvent être complétées par des méthodes d'auscultation à haut débit telles que les méthodes géophysiques sismique réfraction, électromagnétisme à émetteur, résistivité électrique (Lino *et al*, 99).

2.2.2. L'analyse experte

Le recueil du retour d'expérience basé sur l'expertise est une pratique traditionnelle en génie civil des ouvrages d'art. Il consiste à collationner des informations sur les incidents, les défauts ou les symptômes traduisant des détériorations par l'inspection visuelle d'experts ou de personnes formées à cette mission. Elle est pratiquée dans de nombreux domaines du génie civil avec une formalisation des inspections expertes plus ou moins élaborées, qui peut être prévue dans le cadre de la surveillance systématique des ouvrages ou dans le cadre d'anomalies ou d'accidents.

Cette approche correspond typiquement à celle qui est pratiquée dans le domaine des barrages (Peyras, 06). Ces ouvrages font l'objet de visites réglementaires lors desquelles l'inspection détaillée est réalisée par des ingénieurs spécialisés du domaine. Ces observations visuelles (Figure 3) sont consignées dans des procès-verbaux de visite rédigés par l'expert en charge de l'inspection.

Figure 3 : Symptôme visuel sur un barrage en remblai

On rencontre cette même approche de recueil du retour d'expérience sur le parc d'ouvrages gérés par la SNCF (tunnels, ponts, passerelles, ouvrages de soutènements). L'organisation du recueil est faite dans le cadre des visites périodiques des ouvrages par des agents chargé des inspections et formés à cet effet. Ces inspections visuelles, parfois complétées par de l'auscultation, permettent de détecter d'éventuelles avaries et désordres, qui sont ensuite consignés dans des procès-verbaux. L'inspection est complétée par une cotation de chaque ouvrage dans le but d'alimenter une base de données

générale à l'échelle du parc d'ouvrages. Dans cet exemple, il est important de préciser qu'un travail important de formalisation et de normalisation des avaries et désordres a été réalisé au moyen de documents réglementaires techniques propres chaque catégorie d'ouvrages, de procès-verbaux types et d'une formation spécifique des agents chargés des inspections.

Cette expertise peut aussi améliorer l'estimation des délais de réalisation des ouvrages de génie civil et limiter ainsi les risques de dérapages en coût et en délai. A titre d'exemple, le LGUEH de l'Université de Marne la Vallée a mis en place une méthode d'analyse du comportement du tunnelier par rapport au sol urbain rencontré. Cela a permis d'analyser en fonction du type du tunnelier (type de pression) et les paramètres du sol les plus déterminants, la méthode des fonctions d'adéquation entre les composants du tunnelier et les paramètres du sol. L'adéquation globale du tunnelier est obtenue en combinant les adéquations partielles du tunnelier. Cette adéquation est utile pour l'estimation de la performance de la machine et l'estimation de délais de réalisation. Toutes ces fonctions d'adéquation ont été élaborées à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous (AS Zeidan, 02).

3. TRAITEMENT DU RETOUR D'EXPERIENCE

3.1. APPROCHES ANALYTIQUES DU TRAITEMENT DU RETOUR D'EXPERIENCE

3.1.1. Traitement physique du retour d'expérience

Il s'agit de l'approche traditionnelle en génie civil du traitement du retour d'expérience. Les données expérimentales ou issues de l'auscultation, recueillies sur le système étudié, sont intégrées dans des modèles physiques d'analyse du comportement (modèles physiques, mécaniques, hydromécaniques, modèles couplés, etc.) ou des modèles d'états-limites (modélisation des pertes de fonctionnalité, des modes de ruine ou les pertes d'équilibres statiques). On a donc une approche physique (ou « mécaniste ») du traitement des informations, au moyen des équations régissant les états-limites du système ou son comportement (déplacements, déformations, contraintes).

Le traitement des informations expérimentales sur les ouvrages de montagne, tels que les paravalanches ou les pareblocs, illustre cette approche du traitement du retour d'expérience par approche physique (Mougin *et al*, 04). Les données collectées lors des expériences in situ de chutes de blocs sur les dalles en béton sont intégrées dans un outil de suivi numérique capable de décrire les dommages de la structure (Figure 4). Cela permet ensuite de caractériser les chocs (et donc l'aléa), de quantifier l'endommagement subit par l'ouvrage et de prévoir la résistance résiduelle. Cette approche ne peut être faite sans intégrer les outils numériques performants.

Cette approche physique du traitement du retour d'expérience est rendue possible dans la mesure où les lois de comportement du système étudié et les mécanismes en jeu restent suffisamment simples pour être modélisés par les équations de la physique. Le cas échéant, les données du retour d'expérience permettent alors d'élaborer des modèles physiques de comportement ou d'états-limites et de caler les paramètres inhérents à ces modèles.

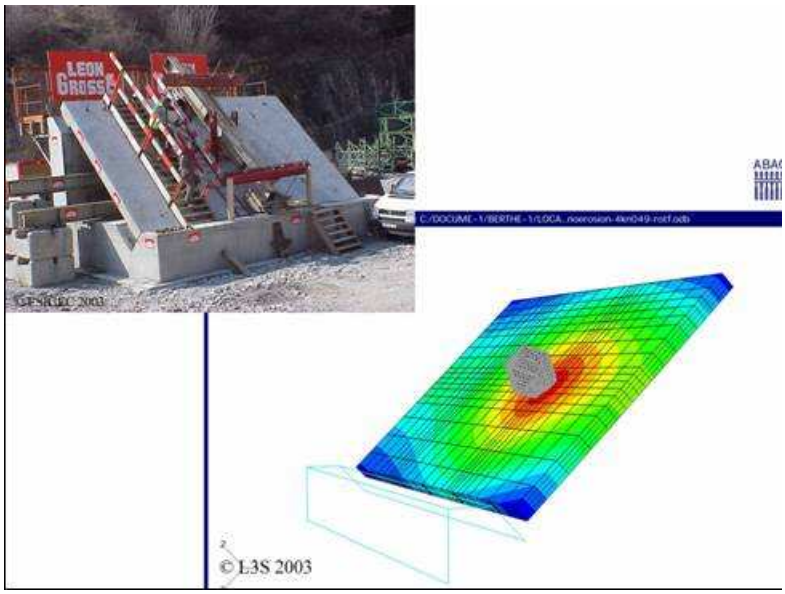

Figure 4 : Expérimentation LOCIE – Analyse Numérique L3S

3.1.2. Traitement fiabiliste du retour d'expérience

L'approche fiabiliste (probabiliste) du traitement du retour d'expérience constitue une extension particulière de l'approche physique vue précédemment. Sur la base de modèles physiques de comportement ou d'états-limites et à partir de données de retour d'expérience (données expérimentales, données issues de modélisation) abondantes, précises et complètes, il est possible d'utiliser une approche fiabiliste, basée soit sur la connaissance des facteurs aléatoires, soit sur la détermination des taux de défaillance des composants de l'ouvrage.

La démarche adoptée sur les ouvrages préfabriqués en béton illustre cette approche fiabiliste du traitement du retour d'expérience (CERIB, 02). Les données expérimentales collectées sur les structures préfabriquées permettent de constituer une base de données générale sur les valeurs mesurées des géométries et des résistances. L'analyse statistique de cette base permet de définir les coefficients de variation moyens pour la résistance du béton et pour le poids propre et d'autres paramètre statistiques (coefficient de passage entre résistance sur éprouvettes moulées et sur carottes, etc.). Ensuite, la calibration des coefficients partiels est effectuée à partir d'états limites sur les éléments préfabriqués. L'objectif est de trouver un ensemble de coefficients partiels tel que la valeur cible de l'indice de fiabilité soit approchée au plus près (méthode FORM).

Cette approche fiabiliste du traitement du retour d'expérience est rendue possible dans la mesure où l'on dispose, d'une part, de données abondantes, précises et complètes, d'autre part, de modèles d'états-limites peu complexes et faciles à modéliser physiquement. On les rencontre donc dans les ouvrages réalisés en grande série (tels que les structures préfabriquées) ou encore ceux pour lesquelles des modèles d'états-limites peu complexes existent et des essais expérimentaux abondants ont pu été réalisés, à l'instar de l'industrie offshore ou le génie civil du nucléaire (Crémona, 03).

3.2. APPROCHES SYSTEMIQUES DU TRAITEMENT DU RETOUR D'EXPERIENCE

3.2.1. Traitement du retour d'expérience par les statistiques

L'approche par les statistiques est déployée dans les secteurs du génie civil dans lesquels on dispose de données du retour d'expérience abondantes et bien documentés et pour lesquels il est

généralement difficile d'établir des modèles physiques ou fonctionnels de comportement des structures compte tenu de leur complexité. Dans ces situations, on va chercher à établir des corrélations entre les informations du retour d'expérience et un certain nombres de facteurs explicatifs. Une fois établie l'influence des principaux facteurs, il est alors possible de prévoir les défaillances d'une structure en fonction des paramètres qui lui sont propres (âge, composition, environnement).

Cette approche par les statistiques est rencontrée en particulier dans le génie civil des ouvrages à grands linéaires, tels que les réseaux enterrés ou les routes. Dans le domaine des réseaux d'eau (eau potable et assainissement), on recherche des corrélations entre les dysfonctionnements du réseau et des variables explicatives telles que la hauteur du remblai, la classe du trafic, la hauteur de la nappe, la position sous chaussée ou sous trottoir, etc. A ce titre, on peut citer les travaux sur les réseaux d'assainissement (Laffréchine, 99) et ceux sur les réseaux d'eau potable (Malandin, 99).

Les réseaux routiers en France permettent une illustration analogue de cette approche par les statistiques (Goux *et al*, 00). Pour les études au niveau « réseau », les données sont agrégées par tronçon de longueur prédéterminée (souvent 200 mètres), par calcul de moyenne ou d'autres indicateurs statistiques. Elles sont ensuite sauvegardées dans une base de données routières. Dans cette base, elles sont rapprochées d'autres informations sur la nature de la chaussée, son âge, son trafic, etc. Des logiciels spécifiques sont alors appliqués sur cette base, pour réaliser les calculs d'évaluation et de programmation en application de méthodes d'études formalisées. Pour les études au niveau « projet », les informations recueillies sont analysées soit sur des « schémas d'itinéraire » produits par un logiciel d'exploitation à partir des fichiers de relevés et de mesures, soit par un système expert. Une méthode d'étude spécifique décrit la procédure à suivre pour conduire ces études. Par aiilleurs, des travaux de recherche en cours visent à développer des approches purement statistiques. Il s'agit là d'établir des corrélations entre les défaillances des chaussées (déformations, fissurations) et des facteurs explicatifs tels que la composition de la couche de roulement, la classe de trafic (Courilleau, 97), (Reche, 04).

3.3. TRAITEMENT EXPERT DU RETOUR D'EXPERIENCE

L'approche experte est mise en œuvre dans des contextes d'ouvrages hétérogènes ou d'ouvrages homogènes en petit nombre, ou encore d'ouvrages mal connus où les données disponibles sont peu abondantes, incomplètes ou imprécises. Dans ces situations, il n'est pas possible de s'orienter vers des approches physiques, fiabilistes ou statistiques des données du retour d'expérience et une démarche experte est adoptée. Elle consiste à utiliser les informations du retour d'expérience comme référentiel, sur lequel les experts vont s'appuyer et s'aider pour réaliser leur mission : diagnostic, analyse de risques, évaluation des défaillances et de la sécurité.

Cette approche experte du traitement du retour d'expérience est mise en œuvre sur le parc d'ouvrages de la SNCF. Elle caractérise par les étapes suivantes :

- l'accumulation d'informations, sous forme de rapports de visite récapitulant les analyses des inspections détaillées et les cotations des ouvrages ;
- analyse bibliographique sur l'ouvrage et consultation des précédents rapports de visite ;
- la comparaison et l'analogie avec des cas antérieurs ;
- la préfiguration de l'évolution future de l'ouvrage (expertise) ;

- la prescription de travaux et ordre de priorité de réalisation.

Dans le domaine des barrages, des travaux de recherche en cours visent à apporter une aide à cette approche par expertise. Ils consistent à construire, d'une part une base de connaissances sur les mécanismes de vieillissements des barrages, d'autre part, des bases de données d'études de cas de barrages ayant connus des dégradations. Par référence à des ouvrages de même type soumis à des mécanismes analogues, ces bases de données sont destinées à aider les experts dans leur mission de diagnostic et d'analyse de risques (Figure 5).

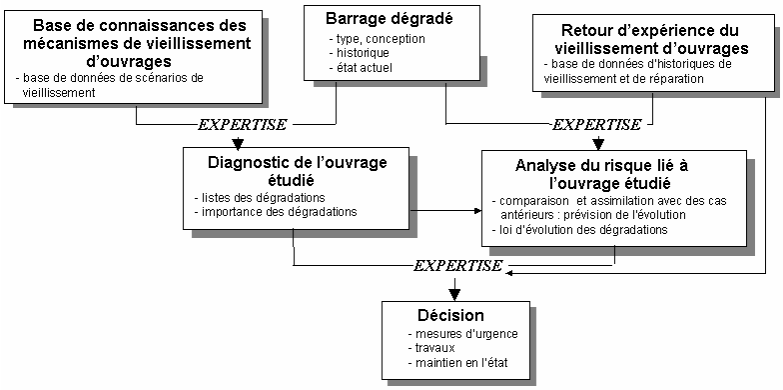

Figure 5 : Démarche d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques pur les barrages

3.4. UNE APPROCHE PAR HOMOGENEISATION DES INFORMATIONS DU RETOUR D'EXPERIENCE : LA FUSION DES DONNEES

Cette approche permet l'utilisation de toutes les informations du retour d'expérience et ensuite de les fusionner. Elle a été développée dans le domaine du bâtiment à des fins d'évaluation de la durabilité des produits de construction (Lair, 00). Elle comporte quatre étapes : la collecte des informations de durée de vie, l'évaluation de leur qualité, la procédure de fusion des données et l'exploitation des résultats.

La connaissance des experts, des industriels, les essais expérimentaux, les données issues de la modélisation et toutes autres sources d'informations issues du retour d'expérience peuvent être utilisés. Un point essentiel de la démarche est de conserver les informations complémentaires telles que la définition du produit, les conditions de sollicitation et d'usage, la qualité de la conception, de mise en œuvre, de maintenance … afin de pouvoir évaluer la qualité des données de durée de vie. Une méthode opérationnelle est désormais disponible et comprend : une base de données de durée de vie des produits du bâtiment et un outil de fusion des données. La base de données a été élaborée pour faciliter la recherche des informations et capitaliser la connaissance. Elle comprend actuellement 1900 données, issues essentiellement de la littérature internationale.

4. VALORISATION DU RETOUR D'EXPERIENCE

4.1. LE RETOUR D'EXPERIENCE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES

Il s'agit d'utiliser les données du retour d'expérience pour le diagnostic des défaillances d'un ouvrage du génie civil. Dans cette application, les données permettent de déterminer la (ou les) cause(s) de la défaillance d'un système (expertise de la défaillance). Dans cette application, le

diagnostic par l'utilisation du retour d'expérience peut être appliqué à l'échelle d'un ouvrage en utilisant les données relevant d'un parc ou d'un ensemble d'ouvrages, ou encore, à l'échelle d'un parc d'ouvrages en travaillant sur des échantillons représentatifs d'ouvrages ou sur l'ensemble du parc.

Cette utilisation du retour d'expérience pour le diagnostic des ouvrages est appliquée dans le domaine des barrages, dans les approches de diagnostic par expertise. A partir de leur connaissance générale sur la pathologie des barrages, connaissances relevant de manuels techniques et du retour d'expérience, les experts du domaine établissent le diagnostic des détériorations d'un barrage en service et déterminent le mécanisme en jeu à l'origine dans ces détériorations. Relevant encore du domaine de la recherche et développement, cette démarche de diagnostic des barrages par le retour d'expérience vise à être appuyé, à moyen terme, par des outils d'aide spécifiques. Il s'agit de mettre à disposition des experts une base de connaissances sur la pathologie des barrages, incluant les différents symptômes susceptibles d'être observés. Aidé par une telle base d'informations, l'expert dispose d'un outil d'aide au diagnostic, auquel il pourra se référer pour déterminer le mécanisme en jeu à l'origine des détériorations et prononcer un diagnostic des défaillances (Peyras, 03).

4.2. LE RETOUR D'EXPERIENCE POUR L'EVALUATION DE LA SURETE

Il s'agit d'utiliser les données du retour d'expérience pour l'évaluation de la sûreté (la sécurité d'un ouvrage, le niveau de protection, la durabilité ou l'état).

Cette démarche est mise en œuvre sur les ouvrages préfabriqués en béton. Les données du retour d'expérience sont utilisées pour évaluer la sécurité de ces structures et optimiser les coefficients partiels correspondant à un indice de fiabilité cible (CERIB, 03). Cette approche doit permettre au final une adaptation des réglementations du dimensionnement des structures au secteur de la préfabrication en béton.

Les données du retour d'expérience sont utilisées de façon analogue en évaluation de la sécurité pour les ouvrages en montagne (ouvrages paravalanches et pareblocs). Les données expérimentales issues d'essais in situ permettent par la suite d'évaluer la sécurité des ouvrages en service ou de dimensionner au mieux les ouvrages en projet.

Le retour d'expérience est également utilisé en évaluation de la sécurité dans le domaine des réseaux d'eau potable enterrés. Par traitement statistique des données du retour d'expérience, on a établi les corrélations entre les défaillances des réseaux (les fuites des conduites) et certains facteurs explicatifs (trafic, couverture, charge, composition...). Une fois ces corrélations établies, elles peuvent être utilisées dans le cadre de la gestion patrimoniale de ces réseaux dans le but de prévoir les défaillances (Eisenbeis *et al*, 04) ou encore pour aider les gestionnaires à établir des stratégies de réhabilitations, dans le domaine des réseaux d'assainissement (Le Gauffre, 01) ou encore des réseaux d'alimentation en eau potable (Le Gauffre *et al*, 04), (Poinard *et al*, 04).

Enfin, la fusion des données proposée sur les produits constructifs du bâtiment permet de considérer toutes les informations du retour d'expérience. La valorisation de cette fusion est une évaluation de la durabilité (durée de vie) des produits du bâtiment (Lair, 00).

4.3. LE RETOUR D'EXPERIENCE POUR LA PREVISION DES EVOLUTIONS

4.3.1. Le retour d'expérience pour l'analyse de risques

Les données du retour d'expérience peuvent être valorisées en analyse de risques. D'une part en prévoyant les évolutions futures des ouvrages dans le temps et les défaillances à venir, d'autre part en prévoyant les délais nécessaires pour atteindre ces défaillances (en y incluant éventuellement l'étude des conséquences potentielles), il est possible d'évaluer le risque lié à ces défaillances.

Cette approche de l'analyse de risques est utilisée par les experts des barrages. Par référence à leur vécu professionnel ou par référence aux informations du retour d'expérience issues de la littérature, les ingénieurs spécialisés sont à même de faire des prévisions des détériorations futures d'un barrage et de prévoir les délais nécessaires pour atteindre ces détériorations, compte tenu de la cinétique du mécanisme en jeu. Relevant encore du domaine de la recherche et développement, cette démarche d'analyse de risques des barrages par le retour d'expérience vise à être appuyé, à moyen terme, par des outils d'aide spécifiques. Il s'agit de mettre à disposition des experts une base de données d'historiques de vieillissement des barrages (c'est-à-dire une base d'études de cas de barrages ayant connus des détériorations). Aidé par une telle base d'informations, l'expert dispose d'un outil d'aide à l'analyse de risques, auquel il pourra se référer pour déterminer les évolutions prévisibles et la cinétique du mécanisme à l'origine des détériorations sur le barrage en cours d'étude. Par la suite, des méthodes qualitatives d'évaluation du risque sont proposées (Peyras *et al*, 06).

Dans le contexte du bâtiment, les connaissances et le retour d'expérience des experts sont valorisés à plusieurs niveaux. Ils permettent de modéliser le comportement fonctionnel du produit en exploitation, d'identifier et de caractériser les scénarios de défaillances courants, de rechercher ceux qui sont moins connus mais dont les conséquences peuvent être graves et enfin de quantifier temporellement l'évolution de chaque dégradation constituant les scénarios de défaillances. Relevant du domaine de la recherche et du développement, cette démarche d'évaluation des risques de dysfonctionnement des produits de construction vise à être une aide à la conception auprès des fabricants, des entrepreneurs, des maîtres d'ouvrage, etc. et une aide à la gestion de la maintenance auprès des gestionnaires de bâtiments. Cette démarche consiste en une modélisation structurelle et fonctionnelle du comportement du produit dans son environnement, lors de son exploitation, en tenant compte des dégradations qu'il a pu subir lors de son processus de construction (Talon *et al*, 04). Cette modélisation permet l'identification des dégradations (en termes de mode, de cause et de conséquence) des composants du produit, et de leurs enchaînements conduisant à la défaillance du produit (scénarios de défaillance). L'évaluation de la criticité de ces scénarios en termes d'occurrence, de gravité et de détectabilité) et la détermination des cinétiques de dégradations permettent d'identifier les scénarios les plus critiques et de prévoir leurs apparitions.

4.3.2. Le retour d'expérience pour la gestion patrimoniale

Les données du retour d'expérience sont utilisées en gestion patrimoniale dans certains parcs d'ouvrages du génie civil. En prévoyant les évolutions futures des ouvrages dans le temps (par approche statistique ou traitement par expertise), il est possible d'anticiper les dégradations à venir à l'échelle d'un ouvrage ou à l'échelle d'un parc d'ouvrages et d'intervenir au moment optimum, au moment où la réparation présentera le ratio technico-économique le meilleur.

On trouve plusieurs illustrations à cette valorisation du retour d'expérience dans la gestion patrimoniale. Ainsi dans le parc d'ouvrages de la SNCF, le traitement expert des données du retour d'expérience est utilisé pour établir les politiques nationales de maintenance, à l'échelle de l'ouvrage par le traitement des rapports d'inspection ou à l'échelle du parc par le traitement de la cotation.

Une valorisation analogue est réalisée sur le parc de chaussées en France où les données du retour d'expérience, après traitement statistique, permettent aux gestionnaires une aide pour bâtir leur politique d'entretien en réalisant une optimisation de l'emploi de leur crédit sur une longue période (10 ans, à terme 15 ou 20 ans). Les objectifs pris en compte relèvent généralement des qualités d'usage (sécurité, confort) et de préservation des infrastructures (gestion du patrimoine). Ces données permettent la mise en œuvre de cette politique, notamment à travers des programmes annuels d'actions d'entretien (Programme GiRR « Gestion intelligente des Réseaux Routiers » du LCPC-SETRA).

On retrouve une valorisation similaire dans le domaine des réseaux enterrés. Ici, les données du retour d'expérience, après traitement statistique, sont utilisées pour l'aide à la prise de décision et la définition des programmes de renouvellement des conduites (Vasconcelos *et al*, 2004).

5. SYNTHESE

Dans cet article, on établit une synthèse du retour d'expérience en génie civil. Les trois étapes suivantes sont examinées : i) le recueil des données ; ii) le traitement des données ; iii) la valorisation du retour d'expérience.

En ce qui concerne le recueil des données du retour d'expérience, on a mis en évidence une classification selon la nature de l'information. On distingue :

- les données du retour d'expérience basées sur l'expérimentation (essais en laboratoire ou in situ, sur ouvrages réels ou modèles réduits, modélisation numériques et simulations). Elles sont obtenues dans les contextes d'ouvrages produits en série (produits préfabriqués) ou, a contrario, d'ouvrages à caractère unique soumis à des sollicitations extrêmes (ouvrages en montagne) ;

- les données du retour d'expérience basées sur l'auscultation (visuelle ou instrumentée). Elles sont obtenues par analyse systématique (les réseaux à grands linéaires : chassées, réseaux enterrés) ou par l'analyse experte qui consistent en inspections visuelles réalisées par des agents spécialisés (les ouvrages d'art : parc de la SNCF, barrages).

Le traitement du retour d'expérience est réalisé de façon différente selon les domaines du génie civil. Les paramètres qui déterminent le type de traitement sont liés aux données du retour d'expérience qui vont être analysées : leur quantité (informations abondantes ou pas), leur qualité (complétude/incomplétude et précision/imprécision des informations). On distingue deux approches de traitement du retour d'expérience : i) les approches analytiques, incluant les traitements physique et fiabiliste ; ii) les approches systémiques, incluant les traitements par les statistiques et expert.

L'approche physique consiste à intégrer les données du retour d'expérience (données issues de l'expérimentation ou de l'auscultation instrumentée) dans des modèles physiques de comportement ou d'états-limites. Il s'agit de l'approche traditionnelle en génie civil, qui est illustrée par la pratique dans le domaine des ouvrages de montagne (expérience et traitement dans un modèle d'endommagement).

L'approche fiabiliste du retour d'expérience est un traitement particulier de l'approche physique. Elle nécessite des données abondantes, complètes et précises, et des modèles physiques des ouvrages relativement simples. Elle est illustrée par la pratique dans le domaine des structures préfabriquées en béton ou encore des ouvrages Offshore et du génie civil nucléaire. Dans cette rubrique, indiquons que le génie civil bénéficie de quelque 30 années de retour d'expérience appliquées à la justification des ouvrages d'art et des bâtiments par les méthodes semi-probabilistes.

L'approche par les statistiques est déployée dans les secteurs où les données sont abondantes, mais où il est difficile d'obtenir un modèle physique de comportement du système. On recherche alors les corrélations entre les données du retour d'expérience et des facteurs explicatifs. Cette approche est adoptée dans les ouvrages à grands linéaires, tels que les chaussées ou les réseaux enterrés.

L'approche experte est mise en œuvre dans des contextes d'ouvrages hétérogènes, mal connus présentant peu d'informations. Par référence aux données du retour d'expérience, l'expert est à même alors d'obtenir une aide pour réaliser ces missions. Le domaine des barrages et des ouvrages de la SNCF illustrent bien cette approche.

Enfin, la fusion des données est une approche homogénéisation des informations du retour d'expérience, qui va permettre de prendre en compte tout type d'informations (expertise, industrielle, expérimentale...), d'évaluer leur qualité et de les fusionner. Elle est mise en œuvre dans le domaine de la gestion de projets de génie civil et de l'analyse de cycle de vie de produits du bâtiment pour l'évaluation de leur durée de vie. Cette approche permet d'intégrer dans les processus de décision des données qualitatives, quantitatives entachés d'incertitudes, incomplétudes et imprécisions.

Nous avons classé la valorisation du retour d'expérience selon un axe temporel correspondant à la vie d'ouvrage de génie civil, donnant trois domaines d'application : le diagnostic, l'évaluation de la sûreté et la prévision des évolutions. Un autre choix de classification non adopté ici aurait consisté à distinguer les approches performentielles et patrimoniales.

En diagnostic, les données du retour d'expérience vont permettre de déterminer l'origine des défaillances d'un système. Cette démarche est mise en œuvre dans le domaine des barrages et dans le cadre d'une approche experte.

En évaluation de la sûreté, les données du retour d'expérience visent à évaluer la fiabilité, le niveau de protection ou encore d'apprécier l'état d'un ouvrage. On rencontre différents domaines du génie civil où les données du retour d'expérience sont utilisées à ces fins. Ainsi, dans le secteur des produits préfabriqués en béton, les données du retour d'expérience permettent d'obtenir directement la fiabilité des structures, compte tenu de la complétude et de la précision des informations disponibles. Dans le domaine des ouvrages en montagne, on recherche à évaluer quantitativement, par approche physique, les endommagements suite aux chocs, et donc par cela même, la sécurité intrinsèque des ouvrages. Dans les réseaux d'eau potable enterrés, le traitement par les statistiques des données permettent une prévision de l'état des canalisations.

Enfin en prévision des évolutions, on trouve deux domaines d'application : la gestion patrimoniale ou l'analyse de risques. Là aussi, le traitement des informations (statistique ou expertise) est directement lié aux données disponibles : abondantes ou pas, complètes ou incomplètes, précises ou imprécises. On constate que les approches statistiques sont utilisées dans la gestion patrimoniale des

ouvrages, à l'instar des parcs de chaussées ou des réseaux enterrés. Les approches expertes sont plus réservées à l'analyse de risques, à l'instar des barrages.

Cette synthèse met en évidence une tendance générale à la formalisation des informations du retour d'expérience dans le but de capitaliser les données. Pour certains organismes à l'instar de la SNCF, du CSTB et du Cemagref, les pratiques constatées visent en outre à pérenniser le savoir et le savoir-faire des experts seniors, ceux qui ont conçu les ouvrages qu'il s'agit maintenant de gérer dans les meilleures conditions de sécurité et au meilleur coût.

6. BIBLIOGRAPHIE

Alegre H., Hirner W., Baptista J.M., Parena R. (2000), *Performance indicators for water supply services*. Manual of Best Practice Series, IWA Publishing, London, ISBN 1 900222 18 3.

As Zeidan. (2002). *Démarche d'estimation des délais de réalisation d'un tunnel en site urbain*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée.

Bertrand L., Lepert P. (1998), *Méthode de relevés des dégradations de surface des chaussées*. Méthode LCPC, 38.2.

CERIB (2003), *Optimisation des coefficients de sécurité pour les produits préfabriqués en béton*. ISSN 0249-6224. IBSN 2-85755-131-2

Cremona C. Dir. (2003), *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Paris : Ed. Presse ENPC.

Eisenbeis P., Poulton M., Laffrechine K. (2004), *Technical Indicators for Rehabilitation: failure forecast and hydraulic reliability tools.* Water Intelligence Online © IWA Publishing 2004 - ID: 200405006

Goux M.T., Lepert P. (2000), *Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers*, SETRA-LCPC.

Norme ISO 4892 (1999). Plastiques – Méthodes d'exposition à des sources lumineuses de laboratoire.

Laffrechine K. (1999). *Base de données urbaine pour la gestion des réseaux d'assainissement non visitables*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I.

Lair J. (2000), *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - CSTB.

Le Gauffre P., Laffrechine K., Baur R., Poinard D., Haidar H., Schiatti M. (2004). *Aide multicritère aux décisions de réhabilitation d'un réseau d'eau potable*. XXIIèmes Rencontres de l'AUGC, 3 & 4 juin 2004, Marne-la-Vallée, 8p.

Le Gauffre P., Gibello C., Joannis C., Breysse D. (2001). *Gestion patrimoniale et réhabilitation des réseaux d'assainissement non visitables. Action 2 de l'opération 5/6 du Projet National RERAU*. XIXèmes rencontres universitaires de Génie Civil – COSS'2001, p 214-219.

Lepert P., Siffert M. (1998), Catalogue de dégradations de surface de chaussées, Méthode LCPC, 52.

Lepert P., Martin J.-M. (2001), *Mesure et interprétation du profil en travers*, Méthode LCPC, 49.

Malandain J. (1999). *Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Etude du patrimopine de l'agglomération de Lyon*. Thèse de doctorat - INSA.

Mougin J.P., Perrotin P. Mommessin M., Tonnelo J., Agbossou A. (2005), *Rock fall impact on reinforced concrete slab: an experimental approach*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 31 (2005). p. 169-183.

Peyras L., Royet P., Boissier D. (2006). Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgment, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, pp. 169-186.

Peyras L., Boissier D. (2005). *Retour d'expérience : diagnostic, sûreté, risque et gestion des ouvrages et des sites.* Annales du BTP, Vol. 5. Sous presse

Poinard D., Le Gauffre P., Laffréchine K., Haidar H. (2004). *Utilisation d'un modèle de Markov pour l'étude du vieillissement des réseaux d'eau – Application sur le patrimoine du Grand Lyon.* XXIIèmes Rencontres de l'AUGC, 3 & 4 juin 2004, Marne-la-Vallée.

Reche M. (2004). *Effets des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées*, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal – LCPC.

Talon A., Boissier D., Chevalier J.L., Hans J. (2004). *A methodological and graphical decision tool for evaluating building component failure*. CIB World Building Congress. Toronto, Ontario, Canada. 2-7 mai 2004.

Vasconcelos E., Breysse D., Desmulliez J-J. (2004). *Démonstrateur d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine réseaux d'assainissement non visitable.* XXIIèmes Rencontres de l'AUGC, 3 & 4 juin 2004, Marne-la-Vallée, 8 p.