



techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

**La télésurveillance
des ouvrages d'art
sous haute surveillance**



Les collections du LCPC

Le libre accès à l'information scientifique est essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés, l'Université Gustave Eiffel a fait le choix de numériser et de mettre à disposition en téléchargement gratuit, l'intégralité des ouvrages publiés dans les collections du LCPC de 1969 à 2014, du fait de son caractère patrimonial.

La collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées »

Issus de l'expertise du réseau scientifique et technique (RST), les ouvrages publiés dans la collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées » ont été conçus et rédigés en vue des applications sur le terrain par les professionnels du BTP. La collection se décline en deux séries : guide technique et méthode d'essai.

- La série « guide technique » réunit des synthèses de connaissances, fruits de groupes de travail nationaux associant partenaires publics et privés. Ces guides n'ont pas de valeur normative mais servent de support au développement des techniques.
- La série « méthode d'essai » réunit des méthodes à caractère normatif ou de recommandations. Les méthodes font l'objet d'une qualification par le service qualité du LCPC.

La collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées »

La collection ERLPC « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées » se décline en 8 séries thématiques : construction routière, environnement et génie urbain, géotechnique et science de la terre, mécanique et mathématiques appliquées, ouvrage d'art, physique chimie, sécurité et exploitation routières, sciences de l'ingénieur. Des mémoires de thèses ou d'habilitation à la direction de recherche, des résultats d'études générales et d'expérimentations en laboratoire et *in situ* ont été notamment publiés dans cette collection.

La collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées »

De 1969 à 1990, les travaux de recherche les plus significatifs du LCPC ont été publiés dans la collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées ». Cette collection historique a ensuite laissé la place à la collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées ».

La collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées »

Les ouvrages de la collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées » regroupent les communications présentées par les intervenants à l'occasion de manifestations scientifiques organisées ou co-organisées par le LCPC.

Les ouvrages des collections du LCPC sont diffusés sous la licence Creative Commons CC BY-NC-ND. Cette licence ne permet que la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, les documents peuvent être copiés, distribués et communiqués par tous moyens et sous tous formats.



 Attribution — Vous devez créditer l'œuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Université Gustave Eiffel vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

 Pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

 Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

La télésurveillance des ouvrages d'art sous haute surveillance

Guide technique

Septembre 2005



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été élaboré par un groupe de travail composé de :

- ◀ Patrick Chagneau (LRPC de Clermont-Ferrand),
- ◀ Christian Crémona (LCPC),
- ◀ Didier Duval (LRPC de Strasbourg),
- ◀ Gilbert Fauchoux (LRPC d'Angers), *Responsable du groupe de travail*,
- ◀ Bruno Godart (LCPC),
- ◀ Bernard Guyet (LRPC de Nice),
- ◀ Michel Harran (LRPC de Toulouse),
- ◀ Jacques Lemoine (LRPC de Rouen),
- ◀ Jean-Michel Passelaigue (CECP d'Angers),
- ◀ Bruno Saintot (LRPC d'Autun),
- ◀ Bernard Tonnoir (LRPC de Lille),

Rédaction finale :

- ◀ Gilbert Fauchoux (LRPC d'Angers),
- ◀ Jean-Louis Chazelas (LCPC),
- ◀ Vincent Le Cam (LCPC).

Pour commander cet ouvrage :

**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
DISTC-Diffusion des Éditions**

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15

Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 25 Euros HT

En couverture : Surveillance acoustique du pont d'Aquitaine.

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général
(ou de ses représentants autorisés)

© 2005 - LCPC
ISSN 1151-1516
ISBN 2-7208-0409-6

Sommaire

5	Préambule
7	CHAPITRE 1. Organisation générale d'une opération de (haute) surveillance par télémessure
7	1.1 Définitions
7	1.2 Décider une haute surveillance par télémessure - Avantages et risques
8	1.3 Schéma général du déroulement d'une télésurveillance
9	1.4 Fonctions et intervenants dans la haute surveillance par télémessure
11	CHAPITRE 2. Conception et télésurveillance - Postulats et principes
11	2.1 Les deux critères de faisabilité : « surveillabilité » - « instrumentabilité »
12	2.2 Postulat fondant la pratique de la télésurveillance
12	2.3 Premier principe : les actions sur l'ouvrage doivent être clairement indentifiées
13	2.4 Deuxième principe : le fonctionnement de la structure doit être présumé
13	2.5 Troisième principe : les paramètres à surveiller doivent être définis dans une perspective de modélisation du comportement
16	2.6 Quatrième principe : l'instrumentation doit être organisée en « sections »
16	2.7 Cinquième principe : les seuils doivent être définis à partir de l'expertise et de modèles préalablement mis au point et adaptés au niveau de connaissance du fonctionnement de l'ouvrage
20	2.8 Sixième principe : les processus décisionnels en cas d'alerte et d'alarme doivent être établis
21	2.9 Septième principe : une télésurveillance doit être mise à jour
22	2.10 Synthèse des étapes de mise en place d'une haute surveillance par télémessure

23	CHAPITRE 3. Instrumentation de l'ouvrage
23	3.1 Préambule
24	3.2 Choix des capteurs de mesure
29	3.3 Implantation des capteurs sur l'ouvrage - Vérifications et redondance
30	3.4 Organisation de la chaîne de capteurs
35	3.5 Le superviseur
36	3.6 Fiabilité de l'installation de télésurveillance
39	CHAPITRE 4. Traitement de données - Modélisation du comportement - Fixation de seuils
39	4.1 Phases techniques de gestion et d'exploitation des données issues de télémessure
41	4.2 Analyse des données
45	4.3 Méthodes d'établissements des seuils
51	CHAPITRE 5. Exemples d'application des principes de ce guide à différents types d'ouvrage
51	5.1 Télésurveillance d'un pont caisson à voussoirs en béton précontraint
54	5.2 Télésurveillance d'un pont multi-arches en maçonnerie
56	5.3 Télésurveillance d'un appui d'un pont suspendu
58	5.4 Télésurveillance d'un pont cantilever en béton armé
61	5.5 Télésurveillance d'un VIPP constitué transversalement de cinq poutres
63	5.6 Télésurveillance des appuis d'un pont en maçonnerie pendant des travaux de renforcement des fondations
65	5.7 Télésurveillance d'un viaduc ferroviaire en maçonnerie
67	5.8 Télésurveillance d'un pont suspendu
70	Références bibliographiques

Préambule

*La surveillance des ouvrages gérés par l'État, est organisée et codifiée par l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979. À ce titre, la première partie de l'Instruction technique précise que : **Lorsque des désordres constatés sur un ouvrage paraissent susceptibles de mettre en cause la sécurité ou la tenue de l'ouvrage, le directeur peut décider de le placer sous haute surveillance de manière à assurer, en cas de danger imminent, le déclenchement immédiat de contre-mesures définies à l'avance.***

La seconde partie de cette instruction, révisée en décembre 1995, comporte le fascicule 03 « Auscultation - Surveillance renforcée - Haute surveillance - Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde » publiée en décembre 1998 ; celui-ci distingue trois niveaux de surveillance allant de la simple visite de routine jusqu'à la mise sous haute surveillance.

Pour les Ouvrages d'art non gérés par l'État, les procédures de surveillance et d'entretien sont définies par des textes locaux : il arrive cependant qu'en raison des désordres constatés, la même mise sous surveillance (ou haute surveillance d'un ouvrage) soit appliquée par les autorités gestionnaires.

Le présent guide est destiné d'abord aux maîtres d'œuvre et aux responsables de laboratoire qui sont chargés de concevoir l'opération de surveillance comme cela est précisé ci-dessous. Ce guide est également destiné aux donneurs d'ordre, exploitants des ouvrages et maîtres d'ouvrage afin de les aider dans la formalisation de la commande et dans le contrôle de la qualité des prestations. Il couvre essentiellement le champ de la haute surveillance, mais il est possible de l'appliquer à la surveillance renforcée en allégeant certaines des dispositions préconisées dans le présent document [5].

L'objectif de la (haute) surveillance peut être de maintenir l'ouvrage endommagé en état de service (restreint ou non), de différer une réparation ou un renforcement, ou de détecter un endommagement irréversible. Elle ne peut être mise en œuvre qu'après avoir effectué une expertise complète de l'ouvrage, celle-ci faisant appel à une panoplie de moyens parmi lesquels les inspections détaillées, les techniques d'auscultation, les programmes de calcul.

D'une manière générale, il sera supposé dans ce guide qu'une expertise technique portant sur l'état de l'ouvrage a déjà été réalisée.

Chapitre 1

Organisation générale d'une opération de (haute) surveillance par télémesure

1.1 Définitions

Sans vouloir imposer de distinctions inutiles, mais pour lever des ambiguïtés et des confusions, la *télé-surveillance* est définie dans le présent guide comme l'ensemble des processus mis en œuvre pour la mise sous haute surveillance d'un ouvrage par télémesure, le terme *télémesure* étant réservé à l'ensemble des processus qui permettent de réaliser une mesure à distance (de la mise en place du capteur sur site jusqu'au stockage au centre de gestion des données distant, en passant par les matériels et les protocoles de transmission).

1.2 Décider de réaliser une haute surveillance par télémesure - Avantages et risques

L'utilisation de la télémesure dans le cadre de la surveillance présente de nombreux avantages dont le premier est celui de la *sécurité*. En effet, en assurant une surveillance continue, la télémesure accroît la sûreté d'exploitation. La fixation de seuils d'alarme et d'alerte constitue souvent une condition indispensable pour autoriser la mise sous haute surveillance plutôt que la fermeture de l'ouvrage au trafic.

Le deuxième avantage est d'ordre *économique*. La télétransmission des résultats de mesures permet le suivi à distance d'un ouvrage et évite le déplacement répétitif d'une équipe de surveillance sur le site. Outre la récupération à distance des mesures, la télé-surveillance facilite la modification des paramètres de surveillance en évitant aussi d'autres déplacements sur le site.

Le troisième avantage est d'ordre *technique*. Dans certains cas, l'évolution d'un ouvrage est difficilement perceptible par l'œil et le recours à des mesures s'avère indispensable pour pouvoir suivre finement l'évolution des paramètres représentatifs de la dégradation de l'ouvrage (suivi de l'ouverture d'une fissure, suivi de l'inclinaison d'une pile, etc.). Elles constituent ainsi parfois le seul moyen de réaliser une gestion prévisionnelle des risques et de prévenir toute défaillance prématurée d'un ouvrage.

Si la télémesure présente des avantages indéniables en matière de surveillance, il convient cependant de noter que celle-ci ne doit en aucune manière se substituer à la *surveillance visuelle des ouvrages qui reste la base de la surveillance*. En effet, un ouvrage de génie civil est généralement placé dans un milieu où l'on ne peut contrôler toutes les actions qui s'exercent sur lui, et l'évolution accidentelle d'un paramètre extérieur non envisagé ou d'une sollicitation non prévue peut toujours survenir sans que le système de mesure ne puisse le détecter. De plus, il est toujours possible qu'un nouveau désordre apparaisse dans une zone non surveillée. Outre le risque d'aboutir à une illusion de surveillance pour le personnel chargé de la maintenance des ouvrages, le recours exclusif à une instrumentation automatique peut aussi engendrer une certaine démotivation de ce personnel.

1.3 Schéma général du déroulement d'une télésurveillance

Le déroulement d'une télésurveillance obéit généralement à une succession de trois étapes :

◆ L'expertise préalable spécifique

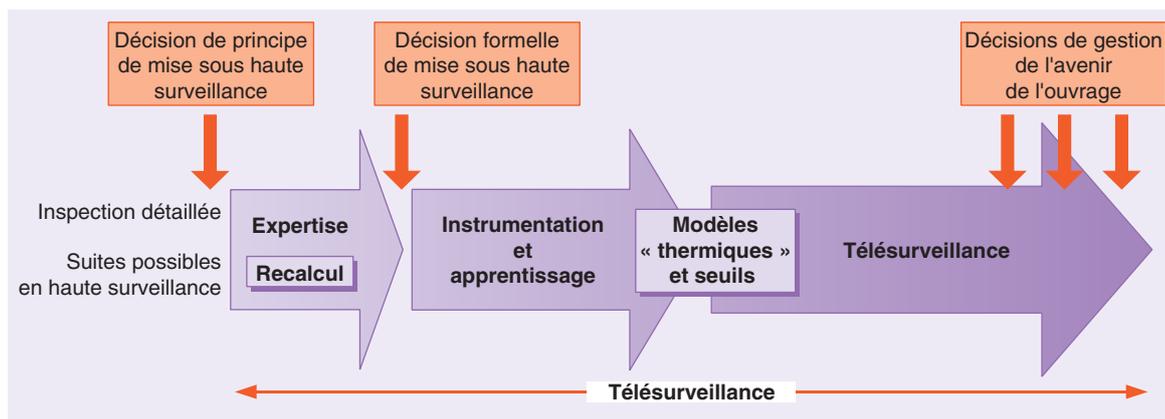
Cette expertise doit fournir les schémas de ruine les plus probables compte tenu des conditions d'exploitation de l'ouvrage et vérifier qu'ils ne conduisent pas à une rupture fragile (cf. paragraphes 2.1 et 2.4). La décision de mettre en œuvre une télésurveillance ne peut donc être prise qu'à l'issue de cette première phase.

◆ La mise en place de l'instrumentation et l'apprentissage

- ▶ Choix des sections à instrumenter et des grandeurs à mesurer (cf. paragraphe 2.6).
- ▶ Choix de la chaîne de mesures depuis chaque capteur jusqu'au superviseur (appelé également centrale de mesure, cf. paragraphe 3.5).
- ▶ Choix d'une organisation de la surveillance (cf. paragraphe 2.7.3).
- ▶ Mise en place d'un système de seuils d'alerte de première phase, tenant compte de la connaissance limitée du fonctionnement de l'ouvrage et d'un système de décision d'alertes et d'alarmes (cf. paragraphe 2.7.4 et paragraphe 2.7.5).
- ▶ Mise en place de l'environnement de gestion des alertes et alarmes : surveillance et maintenance du matériel, gestion des urgences, information de la maîtrise d'ouvrage et du public (cf. paragraphe 2.8).
- ▶ Enregistrement des données sur une période dite d'apprentissage.

◆ L'exploitation de la phase d'apprentissage et gestion de la surveillance opérationnelle (Fig. 1)

- ▶ Modélisation du fonctionnement de l'ouvrage sous l'effet des actions cycliques (cf. paragraphe 4.2.2) et définition des modèles numériques des grandeurs surveillées en fonction des actions cycliques.
- ▶ Recalage des seuils d'alerte (cf. paragraphe 4.3).
- ▶ Lancement de la télésurveillance de routine, surveillance permanente des données, recalage des modèles et des seuils (cf. paragraphe 2.9).



■ FIGURE 1
SCHÉMA GÉNÉRAL
DU DÉROULEMENT
D'UNE TÉLÉSURVEILLANCE.

La figure 1 constitue un résumé synoptique de ces étapes et montre qu'elles correspondent à des moments de décision. Le chapitre 2 présente les principes de conception d'une haute surveillance par télémessure. On y retrouvera cette présentation organique beaucoup plus détaillée.

1.4 Fonctions et intervenants dans la haute surveillance par télémessure

Une haute surveillance peut faire intervenir un nombre important d'organismes et d'entreprises. La répartition des responsabilités et des tâches peut être très diverse d'une opération à l'autre, compte tenu de l'organisation administrative locale, de la répartition de la technicité et des choix et de la spécialisation plus ou moins poussée de chaque intervenant. Il est donc ni possible, ni souhaitable de fixer un mode de répartition des tâches et responsabilités. C'est à partir de la définition des différentes fonctions à assurer - et des responsabilités qui s'y attachent - qu'il est possible de choisir les intervenants qui pourront au mieux assurer les fonctions qui leur seront confiées. On distinguera les fonctions suivantes :

◆ Les fonctions de la maîtrise d'ouvrage de l'opération de haute surveillance

- ▶ *La maîtrise d'ouvrage*, en tant que propriétaire de l'ouvrage, est responsable de son ouvrage vis-à-vis des usagers et des tiers ; elle prend la décision de mise sous haute surveillance, en fixe les objectifs et la durée et en assure le financement.
- ▶ *L'exploitation de l'ouvrage* assure la gestion technique de cet ouvrage pour le maître de l'ouvrage : cette fonction assure le suivi et la maintenance de l'ouvrage et son exploitation pour assurer le niveau de service prescrit par le maître d'ouvrage. Elle peut être amenée à signaler un comportement anormal de l'ouvrage. Elle doit participer à rendre compatible l'exploitation de l'ouvrage et l'installation de suivi.
- ▶ *Le management de l'opération de télésurveillance* : cette fonction met en place, orchestre l'intervention de l'ensemble des intervenants et décide de l'organisation technico-administrative de l'opération de mise sous télésurveillance. Par la répartition des rôles qu'il décide, il a une influence déterminante sur la répartition des responsabilités.

◆ Les fonctions de maîtrise d'œuvre de l'opération de haute surveillance

- ▶ *L'expertise* qui comporte l'analyse du comportement signalé, le recalcul de l'ouvrage pour tenter de comprendre l'origine du comportement signalé, la proposition de la mise sous surveillance, la vérification de l'absence de risques de rupture fragile et, *in fine*, l'interprétation en terme de fonctionnement structurel des données issues de la mise sous surveillance.

- ▶ *La conception de la télésurveillance* dont le rôle est de définir les sections à instrumenter, les méthodes de mesure et les matériels, les moyens d'enregistrement et de transmission.
- ▶ *L'exploitation des données* : une fois le matériel mis en place, cette fonction doit assurer la gestion des données (collecte, stockage), leur exploitation permanente (cohérence, détermination des modèles thermiques de l'ouvrage, la proposition de seuils et la surveillance de leur évolution éventuelle).

◆ **Les fonctions d'exécution**

- ▶ *La fonction d'instrumentation* qui comporte l'installation, le suivi de l'ensemble de la chaîne météorologique et de télétransmission et qui en assure le suivi et la maintenance dans le temps.
- ▶ *La fonction d'intervention sur alerte* : que ce soit dû à un dysfonctionnement des capteurs, du système d'enregistrement ou du système de communication, ou à un dysfonctionnement provoqué par du vandalisme, il faut intervenir pour rétablir le bon fonctionnement de tous les éléments du système. Cette gestion des alertes avec les protocoles de relance sont fondamentaux pour assurer qu'une évolution défavorable de l'ouvrage n'est pas passée inaperçue pendant l'interruption.

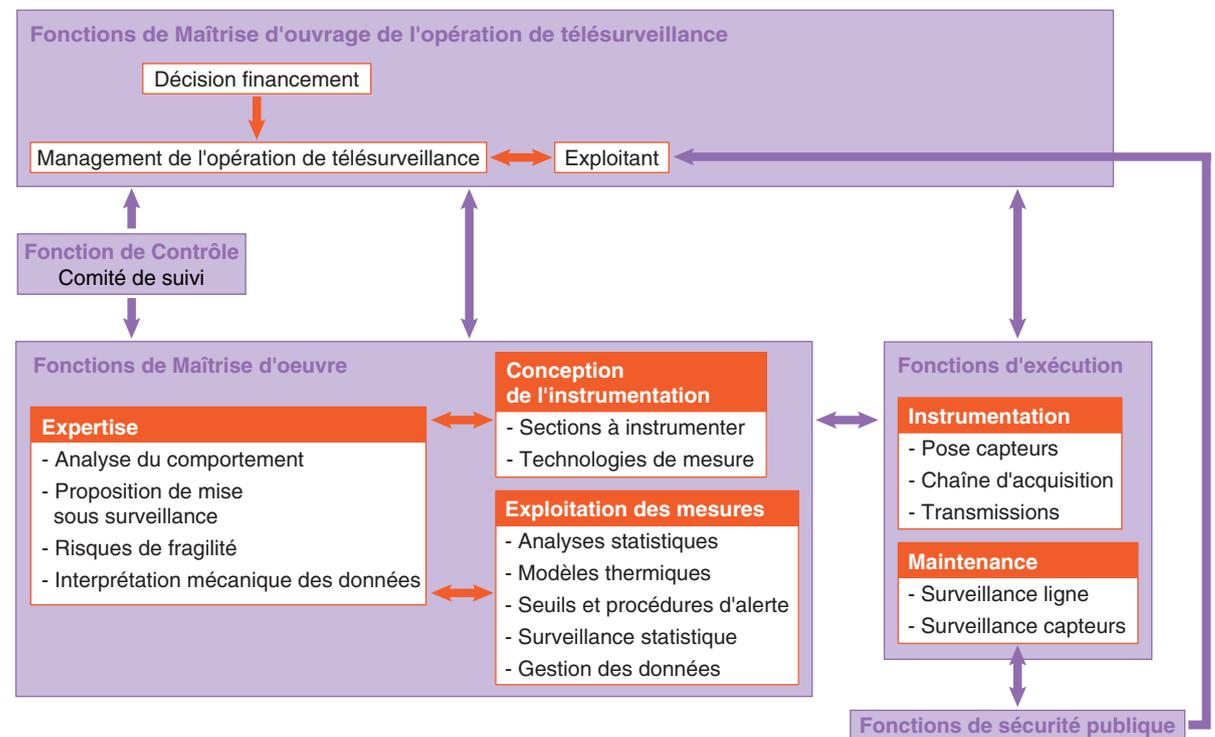
◆ **La fonction de sécurité publique**

Il s'agit d'assurer les interventions sur alarme. Elle est assurée en première instance par les autorités de police (cf. différence entre alerte et alarme au paragraphe 2.7).

◆ **La fonction de contrôle**

Elle est assurée par le Comité de suivi tel que défini dans l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979. Au-delà du contrôle de la pertinence de la conception de la mise sous haute surveillance et de l'organisation qui accompagne cette activité, le Comité de suivi est l'organe qui permet au maître d'ouvrage de s'assurer que les décisions que lui propose la maîtrise d'œuvre en toutes matières (mise sous haute surveillance, instrumentation, seuils, évolution du système, etc.) ne sont pas celles d'un homme seul mais sont partagées par une communauté des meilleurs experts.

La figure 2 synthétise ces différences fonctions et met leurs relations en évidence.



■ **FIGURE 2**
SCHÉMA
ORGANIQUE DES
FONCTIONS COMPOSANT
UNE OPÉRATION DE
HAUTE SURVEILLANCE
SUR OUVRAGE D'ART.

Chapitre 2

Conception d'une télésurveillance - Postulats et principes

2.1 Les deux critères de faisabilité : « surveillabilité » - « instrumentabilité »

PAGE

11

Tous les ouvrages ne peuvent faire l'objet d'une mise sous haute surveillance et *a fortiori* d'une surveillance par télémessures : il convient de s'interroger d'abord sur sa faisabilité.

De façon générale, cette faisabilité ne peut être établie que sur la base de la connaissance que l'on peut avoir de l'ouvrage après complète expertise. Elle est fondée sur le respect de deux critères : *surveillabilité* et *instrumentabilité*.

La vérification du critère de *surveillabilité* consiste à vérifier au moment de l'expertise :

- ▶ l'admissibilité des sollicitations calculées à l'instant t de l'expertise ;
- ▶ la capacité de l'ouvrage à conserver un comportement ductile à long terme au regard des mécanismes de ruine les plus probables que l'on puisse envisager ;
- ▶ la possibilité d'éventuelles redistributions internes et externes des efforts ;
- ▶ que les évolutions possibles sont mesurables sur une base de temps et une étendue de mesures compatibles avec la résolution et à la précision des moyens de mesure existantes.

À l'opposé de la possibilité d'une rupture ductile, la possibilité de rupture fragile est un risque de ruine *brutale sans signal détectable au préalable*.

Après avoir vérifié que l'ouvrage pouvait être surveillé, en particulier que l'analyse des scénarios de rupture met en évidence la possibilité d'une évolution progressive, une instrumentation peut alors être décidée pour surveiller l'évolution de l'ouvrage. Il faut alors vérifier un deuxième critère, celui de l'*instrumentabilité* de l'ouvrage, en s'assurant :

- ▶ que les matériaux peuvent réellement supporter les niveaux de contraintes estimées. Cela peut induire la nécessité de réaliser des auscultations et des essais complémentaires ;
- ▶ que l'état des matériaux, y compris en surface, permet d'assurer la pérennité des instrumentations métrologiques retenues pérennes (collage, fixation mécanique, etc.) ;
- ▶ que les sections instrumentées sont représentatives du fonctionnement général de l'ouvrage tout au long de l'évolution envisagée.

2.2 *Postulat fondant la pratique de la télésurveillance*

Postulat : Tant que le comportement de l'ouvrage peut s'expliquer par l'action des actions cycliques et des charges d'exploitation, il n'y a pas d'endommagement (hormis l'endommagement par fatigue).

Les actions qui peuvent endommager l'ouvrage peuvent être classées en deux catégories :

- ▶ Les *actions d'endommagement* qui peuvent être extérieures à l'ouvrage (poussée parasite de remblais) ou intérieures à l'ouvrage (pertes importantes de précontrainte). Ces actions ne sont généralement pas saisonnières, et peuvent comporter une tendance temporelle irréversible.
- ▶ Les *actions cycliques, ou saisonnières* que l'on peut caractériser comme provoquant les *respirations naturelles* de l'ouvrage, même si celui-ci est dans un état parfaitement sain. Elles peuvent être constituées par : les variations thermiques journalières et saisonnières (respirations thermiques naturelles des ouvrages), les variations des niveaux d'eau pouvant influencer les variations de contraintes au sein de l'ouvrage (respiration hydrologique des ouvrages fondés en site aquatique, variations des teneurs en eau des matériaux, etc.). En général, mise à part la fatigue, elles n'induisent aucun dommage irréversible au sein de l'ouvrage mais, pour ce qui concerne les variations thermiques, elles représentent très souvent les actions les plus sollicitantes surtout pour les ouvrages hyperstatiques.

Ce dernier constat peut servir de postulat de surveillance, à savoir, tant que l'ouvrage ne fait que « respirer thermiquement ou hydrologiquement », alors il se comporte normalement.

Corrolaire : L'utilisation des données acquises durant la période dite « d'apprentissage » pour élaborer des modèles thermiques (corrélations entre grandeurs mécaniques mesurées et évolution des actions cycliques d'origine thermique) et des seuils, suppose que l'endommagement n'évolue pas pendant cette période.

En effet, en vérifiant que l'ouvrage a un comportement ductile par rapport aux schémas de ruine les plus probables, on s'assure qu'il existe des solutions de redistributions des efforts et que l'évolution sera suffisamment lente, notamment par rapport à la durée de la période d'apprentissage. Ceci a deux conséquences :

- ▶ il y a peu de risque que la sécurité soit en cause pendant la période d'apprentissage ;
- ▶ les évolutions des paramètres mesurés sont essentiellement dues aux actions thermiques.

Cette dernière considération permet de rechercher éventuellement l'évolution de l'endommagement (vitesse ou accélération de l'endommagement) dans l'analyse statistique des résidus de l'étude de corrélation (cf. paragraphe 4.2.2.2 et paragraphe 4.3.3.2).

Les paragraphes suivants détaillent tous les points regroupés sous les deux critères de « surveillabilité » et « d'instrumentabilité » en distinguant sept principes à respecter pour s'assurer de la bonne maîtrise d'une télésurveillance.

2.3 *Premier principe : les actions sur l'ouvrage doivent être clairement identifiées*

Pour pouvoir appliquer le postulat exposé au paragraphe 2.2, il est nécessaire que l'expertise faite en amont puisse montrer avec un maximum de vraisemblance que les désordres observés sont induits par des actions potentielles que l'on a bien répertoriées.

Par ailleurs, ces actions doivent être « surveillables » au cours du temps, c'est-à-dire que :

- ▶ elles doivent être mesurables par des moyens de mesure automatisables ;
- ▶ leur évolution doit être suffisamment lente par rapport à la base d'observation et de surveillance mise en place (limite des matériels et des méthodes de dépouillement).

2.4 Deuxième principe : le fonctionnement de la structure doit être présupposé

Avant toute mise sous haute surveillance d'ouvrage, il est indispensable de réaliser une expertise technique, d'effectuer une étude des *modes de défaillances* et d'entreprendre une *analyse des risques*. L'axe de réflexion majeur est de s'assurer de l'existence du caractère ductile de l'ouvrage au regard de l'évolution supposée des désordres. Cette notion de ductilité est l'élément le plus important à vérifier avant de décider de la faisabilité d'une haute surveillance.

Le principe de base est que l'effondrement de la structure doit obligatoirement être précédé de signaux mesurables (correctement discernables) dont l'évolution ne soit pas trop rapide pour laisser le temps à une intervention d'urgence.

Selon le type et l'état d'une structure, l'application du principe de ductilité sera différente. Cette étude peut suivre deux cheminements :

- ▶ soit une analyse à partir d'une démarche classique associée aux règlements et normes,
- ▶ soit une analyse à partir de l'approche probabiliste de la fiabilité.

Des exemples d'application de ces deux démarches à diverses structures sont présentées au chapitre 5.

2.5 Troisième principe : les paramètres à surveiller doivent être définis dans une perspective de modélisation du comportement

Avant de procéder à toute mise sous surveillance d'un ouvrage, il est nécessaire de choisir les paramètres qui seront suivis. Ceux-ci doivent être les plus représentatifs possible d'une évolution anormale de l'ouvrage et ne peuvent être sélectionnés qu'après une étude préalable.

L'étude du fonctionnement mécanique de la structure et des calculs de dimensionnement doivent permettre de faire ressortir les zones où les contraintes sont les plus élevées et où des états-limites risqueraient d'être dépassés au cours de la vie de l'ouvrage, ainsi que les grandeurs physiques (déformations globales ou locales, forces, déplacements, etc.) les plus caractéristiques des sollicitations subies par la structure sous des actions extérieures susceptibles d'évoluer suivant un sens défavorable (action du vent, séisme, tassement différentiel, etc.).

Les évolutions des paramètres surveillés doivent être suffisamment lentes et importantes pour être mesurables et susceptibles de déclencher des alarmes dans le cadre d'un plan d'intervention préalablement défini.

De plus, le choix des paramètres surveillés est conditionné par la précision et la fiabilité des diverses techniques de mesures existantes. En effet, les retours d'expérience dans le domaine de l'instrumentation des ouvrages permettent de donner un avis sur la robustesse au cours du temps des divers types de mesures (cf. chapitre 3).

On distinguera deux types de paramètres en jeu dans un contexte de surveillance :

2.5.1 Les paramètres à expliquer

Ils correspondent aux mesures à faire pour suivre l'évolution de l'endommagement de l'ouvrage et (ou) l'évolutions de zones saines considérées comme signatures mécaniques de l'ouvrage.

Trois grandeurs physiques principales sont *instrumentables* à long terme sur ouvrage :

- ▶ les variations de déformation (avec certaines limites d'utilisation),
- ▶ les variations de déplacement (ouvertures de fissures par exemple),
- ▶ les variations de rotation de sections ou d'éléments d'ouvrages.

On peut citer quelques exemples concrets de paramètres à expliquer que l'on peut surveiller de façon fiable pour tous les types de structures :

- ▶ jeux de fissures associés ou non à des déformations d'aciers de BA ou de BP,
- ▶ jeux de fissures ou de joints ouverts entre voussoirs d'ouvrage en BP associés aux déformations des bords des fissures (ou des joints),
- ▶ variations de flèches associées à des jeux de fissures ou de joints,
- ▶ variations des rotations associées à des jeux de fissures ou de joints.

2.5.2 Les paramètres potentiellement explicatifs

Ils permettent d'interpréter tout ou partie des paramètres à expliquer. L'expertise de la structure doit aussi permettre de les connaître et de faire des hypothèses sur leur loi de comportement au cours du temps. La surveillance consiste alors, pour une part importante, à établir une relation causale entre les deux types de paramètres, permettant ainsi de mieux envisager les stratégies de prévision.

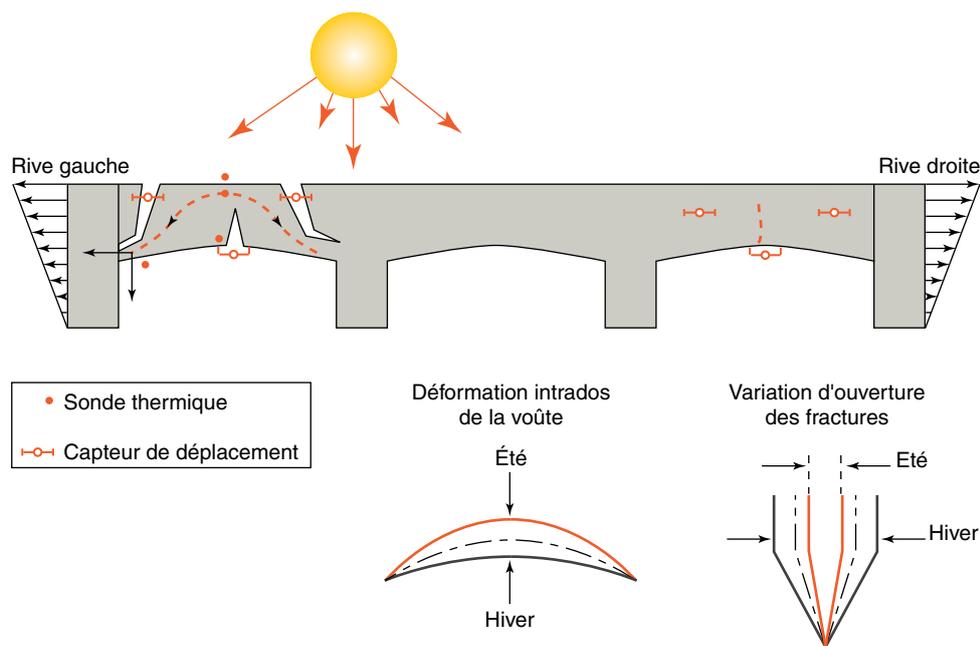
On peut distinguer trois types de paramètres explicatifs liés à trois types d'actions potentiellement explicatives différenciées selon l'allure de leurs variations temporelles.

Les actions cycliques (climatiques)

Le suivi dans le temps des actions extérieures cycliques est d'un très grand intérêt pour la conception même de la télésurveillance : compte tenu de l'importance des effets des conditions climatiques sur le comportement des ouvrages, on ne suit pas les grandeurs mesurées directement mais leurs écarts instantanés par rapport à leurs variations cycliques (journalières et saisonnières) « normales ».

L'expérience acquise au cours des nombreuses opérations de haute surveillance déjà réalisées impose de façon systématique le suivi des variations des paramètres thermiques des ouvrages, en plus des grandeurs mécaniques. Ainsi, les températures moyennes dans un ouvrage isostatique, auxquelles s'ajoutent les gradients thermiques pour les ouvrages hyperstatiques, sont des paramètres explicatifs classiques des mesures à réaliser sur un ouvrage d'art. En première approximation, les gradients peuvent être obtenus par combinaison linéaire des températures mesurées localement par chacune des sondes de l'instrumentation (Fig. 3).

D'autres actions cycliques peuvent être à prendre en compte selon les types d'ouvrage : ensoleillement, niveaux d'eau de nappe phréatique ou de rivière, niveau de marée, teneurs en eau de matériaux, vitesses moyennes et instantanées du vent, etc.



■ FIGURE 3
EXEMPLE DE
« RESPIRATION THERMIQUE »
D'UN PONT VOÛTE.

Les actions d'exploitation à la fois déterministes et aléatoires

Elles ont permis de dimensionner l'ouvrage à sa construction. Il s'agit, par exemple, de la charge et de la fréquence du trafic pour un pont, ou de la hauteur de la retenue d'eau pour un barrage. Si ces actions sont mesurables au cours du temps, une instrumentation destinée à évaluer leurs actions principales peut être mise en œuvre le cas échéant.

Les actions d'endommagement (autres que le trafic)

Ce sont celles qui comportent une tendance irréversible avec le temps. Elles endommagent la structure et la plupart du temps se superposent aux deux types d'actions précédemment décrites. Toute la difficulté de l'interprétation des mesures réalisées sur l'ensemble des paramètres consiste à les dissocier afin de mieux les analyser (cf. paragraphe 4.2.2).

Les actions d'endommagement peuvent être internes ou externes à l'ouvrage et ne peuvent pas toujours être mesurées directement en continu. Voici quelques cas où cela est néanmoins possible :

◆ Endommagements d'origines externes à l'ouvrage

- ▶ les actions des terres sollicitant horizontalement ou verticalement des appuis d'ouvrage,
- ▶ les tassements de sol de fondations.

◆ Endommagements d'origines internes à l'ouvrage

- ▶ la rupture par corrosion de fils des câbles d'un pont suspendu ou d'un pont en béton précontraint,
- ▶ plus difficilement, des pertes de résistance internes au sein de structures précontraintes dues à d'autres phénomènes que des ruptures de fils (fluage, etc.).

En matière d'interprétation de télésurveillance, il est nécessaire de connaître au minimum et de façon précise toutes les actions cycliques agissantes sur l'ouvrage ; à défaut de les connaître, on ne pourra généralement pas extraire les informations permettant de montrer l'existence ou pas de phénomènes d'endommagement irréversibles. Il est également souhaitable de connaître les deux autres types d'actions, quand cela est possible, mais leur connaissance n'est pas strictement nécessaire pour commencer une télésurveillance.

2.6 Quatrième principe : l'instrumentation doit être organisée en « sections »

Il convient de prendre le mot section dans son sens physique le plus large, car on peut être amené à instrumenter un élément de structure (câble par exemple), tout ou partie d'une véritable section de l'ouvrage, une zone, voire l'ensemble d'une structure.

L'expertise préalable doit permettre de désigner avec un maximum de vraisemblance les sections dites « *signatures mécaniques de l'Ouvrage d'Art* », c'est-à-dire les sections représentatives de l'un des deux modes de fonctionnement général de l'ouvrage :

- ▶ les *sections endommagées*,
- ▶ les *sections saines*.

Le choix des sections instrumentées dépend d'au moins deux critères qui sont la fiabilité de l'instrumentation et leur bonne représentativité.

La fiabilité de l'instrumentation nécessite :

- ▶ un matériau en bon état, y compris en surface, permettant de recevoir et de maintenir à long terme un équipement de mesure ;
- ▶ une connaissance théorique du fonctionnement mécanique de ces sections, c'est-à-dire les lois qui associent les sollicitations mesurées aux actions par les paramètres décrits au paragraphe 2.5. Cette connaissance théorique peut être vérifiée et/ou étalonnée par des essais de fonctionnement mécanique de ces sections réalisés à partir de détermination de lignes d'influence réelles de sollicitations diverses (rotations, flèches, réactions d'appuis, déplacements, déformations) sous charges contrôlées ;
- ▶ un fonctionnement de ces sections qui puisse être suivi par des mesures de grandeurs physiques simples, par des moyens éprouvés dans des conditions comparables, par des instruments de sensibilité suffisante requise pour les phénomènes de génie civil et de pérennité assurée et contrôlée.

La représentativité des sections choisies suppose une connaissance implicite ou explicite de la relation qui existe entre l'évolution de ces sections locales instrumentées et l'évolution globale de la structure et des réactions avec l'extérieur.

Les sections doivent correspondre aux points fusibles du chemin critique déterminé au paragraphe 2.4 sinon la télésurveillance peut devenir caduque et ne plus apporter aucune garantie sur les prévisions de rupture.

Par ailleurs, l'instrumentation demande à être complétée par l'installation dans l'ouvrage d'une base de mesures plus simple à lecture manuelle permettant de lever les doutes de dérives métrologiques, de palier les pertes de données en cas d'arrêt, ou de raccorder des séries de données séparées par un arrêt.

2.7 Cinquième principe : les seuils doivent être définis à partir de l'expertise et de modèles préalablement mis au point et adaptés au niveau de connaissance du fonctionnement de l'ouvrage

Dans le cas d'une haute surveillance, l'exploitation de l'information vise à convertir les résultats des mesures en décisions à prendre ou en actions à mener suivant des procédures d'intervention préalablement définies. Elle est généralement fondée sur la comparaison de résultats de mesures à des seuils dont le dépassement génère des *alertes et des alarmes*.

L'*alerte* correspond à l'occurrence d'un évènement permettant de mettre en éveil le système de surveillance et précède l'*alarme* qui correspond au dépassement du seuil à partir duquel le fonctionnement de l'ouvrage présente des risques. Le mode de gestion des alertes et des alarmes peut être de différentes natures :

- ▶ soit sur des niveaux de seuils différents ;
- ▶ soit sur la répétition dans le temps d'une même alerte pour un capteur donné ;
- ▶ soit sur la redondance d'alertes données par différents capteurs.

La fixation des seuils est toujours une opération délicate qui nécessite parfois le recours à une période d'apprentissage.

Quant au processus décisionnel, il demande de la part du gestionnaire une *organisation* des moyens humains chargés de gérer les situations d'alarme et une *formalisation des procédures* qui inclut les actions à conduire en cas d'alerte et d'alarme et les consignes pour les personnes chargées d'agir (plan de secours, mesures d'urgence, etc.).

La fixation de seuil peut suivre différentes démarches, sans que l'on puisse fixer une règle générale pour la conduite de la démarche. Il semble cependant utile de présenter à titre d'exemple une démarche qui a déjà permis de traiter quelques problèmes de haute surveillance ; celle-ci se décompose en quatre étapes comme le montre la figure 4.



■ FIGURE 4
Démarche de fixation des seuils.

Ces quatre étapes sont présentées ci-dessous.

2.7.1 Assurer une redondance et la complémentarité entre mesures localisées et mesures globales dans le cas d'alarmes

De façon générale, une mise en place d'alarmes sur ouvrage est toujours délicate, car l'opération doit être la plus robuste possible, afin d'être à la fois potentiellement susceptible d'*anticiper tout incident et d'éviter toute activation d'alarmes intempestives* pouvant remettre en question l'opportunité et le bien-fondé de l'opération. Ainsi, lorsque des alarmes doivent être installées, le traitement en temps réel des données et de la prise de décision de déclenchement doit être fait à partir d'un maximum d'informations redondantes et complémentaires, afin d'induire des suites à donner raisonnables en terme de responsabilités techniques et juridiques pour chaque acteur (maître d'œuvre, maître d'ouvrage, laboratoire, entreprise, police, etc.).

La première étape de la démarche adoptée demande à distinguer les évènements globaux des évènements locaux. Elle implique à la fois une instrumentation dans les sections locales particulières correspondant à des éléments de structure susceptibles de se ruiner, et une instrumentation globale permettant de mesurer les conséquences éventuelles sur le fonctionnement global de la structure d'une

détérioration d'une partie élémentaire de la structure. Ceci permet d'ailleurs de graduer les niveaux d'urgence dans les messages adressés à partir des alarmes (cf. paragraphe 2.7.2). L'observation en cascade de l'élément le plus simple (un capteur) combinée à l'observation des capteurs voisins, combinée elle-même à l'observation des capteurs d'une (ou des) autres sections, puis finalement à la section de fonctionnement global, permet de conduire un raisonnement fiabilisé par la cohérence des informations des différents niveaux et donc de produire des messages de plus en plus urgents. Ainsi, par exemple, on peut être amené à s'appuyer d'abord sur les informations des sections représentatives du fonctionnement local obtenues à partir de capteurs de déplacement puis à y associer des informations issues de sections représentatives d'un fonctionnement plus global obtenues à partir de clinomètres (cf. paragraphe 2.7.5).

Le tableau I donne quelques exemples de capteurs à surveillance locale et à surveillance globale :

TABLEAU I - EXEMPLES DE CAPTEURS À SURVEILLANCE LOCALE ET GLOBALE

<p>Capteurs pour surveillance locale</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Capteurs de déplacement pontant une fissure, un joint ouvert ou toute autre discontinuité de structure (joints de chaussée, joints de rupture, etc.) - Jauges de déformation ponctuelle.
<p>Capteurs pour surveillance globale</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Clinomètres ou profils de jauges de déformations mesurant des variations de rotations d'un tronçon de la structure. - Courburemètre. - Fleximètre ou instruments de topométrie. - Distancemètre.

2.7.2 Constituer un référentiel de surveillance

Le postulat de la télésurveillance (cf. paragraphe 2.2) suppose que dans son fonctionnement normal, l'ouvrage « respire » naturellement (en fonction par exemple des températures, du niveau d'eau des rivières, des vents, de l'hygrométrie, etc.) suivant des lois à déterminer à partir des mesures d'apprentissage. Faire l'hypothèse que les variations (au bruit aléatoire près) de l'ensemble de capteurs sont uniquement liées aux variations des champs thermiques permet de se fixer un *référentiel de surveillance* : chaque capteur local ou global est associé à la combinaison de température la plus explicative (sur un plan statistique). Ceci permet de construire pour chaque capteur un *modèle de surveillance statistique* (avec définition de l'intervalle de confiance sur les valeurs prédictives (cf. chapitre 4). Les messages d'alerte seront activés dès que la combinaison des réponses réelles des capteurs dépasseront celles estimées à partir des variations thermiques.

2.7.3 Définir des « blocs de surveillance »

Un « bloc de surveillance » est défini par un ensemble de capteurs situés dans une section particulière de l'ouvrage, jugée comme pouvant être qualifiée de « *signature mécanique* » du fonctionnement ou de l'endommagement de l'ouvrage. L'ensemble des capteurs du bloc, qui peuvent d'ailleurs mesurer des grandeurs physiques différentes, est observé suivant des logiques correspondantes à des scénarios de ruptures préalablement envisagés et ayant le plus de chance d'apparaître (cf. paragraphe 2.4). La notion de section est géométrique ou, plus largement, définissable à partir de la structure de l'ouvrage. La notion de bloc correspond donc à un sous-ensemble du système de surveillance qui analyse une section particulière de l'ouvrage pour en vérifier le fonctionnement *normal* ou *anormal* et qui déclenche le cas échéant une alerte ou une alarme.

La définition de blocs de surveillance facilite la conduite de la haute surveillance, mais il est évident que cette dernière peut être menée sans faire appel à cette notion de bloc, surtout si le nombre de capteurs est en nombre réduit ou que les capteurs sont concentrés dans une zone bien précise de l'ouvrage.

2.7.4 Déterminer des seuils d'alerte et d'alarme

Dès le début de la haute surveillance, une première approche de la valeur des seuils d'alertes et d'alarmes doit être établie. Les valeurs des seuils peuvent être d'abord déterminées, *a priori*, avant toutes mesures, par le calcul ou à partir de retours d'expériences et de conviction collective d'experts. Ces valeurs de seuils peuvent prendre soit la forme de valeurs discrètes, soit la forme de tendances si on a déjà une bonne idée de l'influence des actions cycliques. Ces valeurs peuvent être également ajustées à partir des résultats d'essais sous charges réglementaires lors d'une épreuve de chargement.

Ensuite, les données d'apprentissage permettant progressivement de valider des modèles statistiques, les seuils pourront être *a posteriori* ajustés vis-à-vis des phénomènes temporels réels (cf. chapitre 4) :

◆ Soit à partir des mesures brutes

- ▶ sous forme de seuils fixes enveloppe,
- ▶ sous forme de seuils variables paramétrés par la variable explicative.

◆ Soit à partir des mesures d'apprentissage expurgées des variations cycliques

Les valeurs des seuils seront d'autant plus efficaces et robustes qu'elles seront expurgées des influences thermiques ou de toute autre influence cyclique réversible et sans caractère d'endommagement pour la structure (température, niveau d'eau, etc.).

2.7.5 Définir des messages d'alerte hiérarchisés

Pour améliorer le système d'alertes et d'alarmes, une cinquième étape peut être ajoutée. Ainsi, pour chaque bloc de surveillance, trois niveaux de message peuvent être délivrés suivant la gravité de la situation perçue, d'une part après comparaison des mesures avec les valeurs préétablies des seuils et d'autre part à partir de combinaisons des capteurs « hors gabarit ». Un capteur hors gabarit (HG) est un capteur qui a mesuré des valeurs dépassant les seuils préétablis.

À titre d'exemple, les messages retenus peuvent être les suivants :

- ▶ **1er niveau - message A3 :**
défaut système ; un capteur est HG ;
- ▶ **2e niveau - message A2 :**
alerte technique ; deux capteurs à surveillance locale sont HG ;
- ▶ **3e niveau - message A1 :**
alarme fermeture du pont ; un capteur à surveillance locale et un capteur à surveillance globale sont simultanément HG, ou deux capteurs à surveillance globale sont HG.

Par ailleurs, un autre message peut être envoyé en cas d'interruption totale du système de télémessure, c'est le message A4, qui correspond à un défaut d'alimentation ou/et à un défaut sur la ligne téléphonique (Tableau II).

TABLEAU II - EXEMPLE DE TABLEAU DES MESSAGES EN FONCTION DE LA COMBINAISON DES CAPTEURS HORS GABARIT

		Capteurs hors gabarit				
		C1	C2	I1	I2	I3
Capteurs hors gabarit	C1	A3				
	C2	A2	A3			
	I1	A1	A1	A3		
	I2	A1	A1	A1	A3	
	I3	A1	A1	A1	A1	A3

2.8 Sixième Principe : les processus décisionnels en cas d'alerte et d'alarme doivent être établis

Le présent paragraphe reprend le chapitre 4.4 *Consigne de sécurité* du fascicule 03 de l'ITSEOA [6].

Les mesures de sécurité à appliquer lorsqu'une alerte ou une alarme est déclenchée doivent faire l'objet de consignes écrites établies à l'avance. Ces consignes doivent définir, dans le plus grand détail, le déroulement des opérations, depuis le moment où il est constaté un dépassement de seuil jusqu'à l'achèvement de la mise en application des mesures de sécurité. Elles doivent être portées, dès la mise en place du dispositif, à la connaissance de tous les intervenants (agents du service gestionnaire, police, gendarmerie, pompiers, préfecture, etc.). Elles définissent le rôle de chacun et doivent être appliquées strictement. L'exploitant doit plus particulièrement veiller à ce que ces consignes restent connues en permanence par les intéressés et soient transmises en cas de changement de personnes.

Lorsque le délai disponible avant la défaillance est suffisant, les consignes peuvent prévoir une phase de réflexion et d'analyse des phénomènes constatés, au terme de laquelle un choix peut être fait entre plusieurs séries de consignes de sécurité ; si cette phase de réflexion ne permet pas de conclure dans le temps imparti, le choix doit se porter sur les mesures de sécurité adaptées à l'hypothèse la plus défavorable.

Dans la plupart des cas, il existe un dispositif automatique dont le déclenchement est assuré par les appareils de mesure mis en place sur l'ouvrage. Deux niveaux peuvent être envisagés :

- ▶ le déclenchement automatique d'une alerte ou d'une alarme qui a pour effet de prévenir instantanément un responsable (ainsi que le cas échéant, d'autres intervenants) lorsqu'un seuil est atteint ; il appartient alors à ce dernier d'appliquer immédiatement les consignes prévues.
- ▶ la mise en application automatique de mesures de sécurité : il s'agit par exemple d'une interruption immédiate du trafic par des signaux ou des barrières dont la fermeture est déclenchée directement par le système de surveillance.

Dans ce dernier cas, ce dispositif ne doit être utilisé qu'avec la plus grande prudence. Il nécessite une fiabilité totale du système de surveillance et il est illusoire d'escompter interrompre effectivement le trafic à l'aide d'un déclenchement automatique de feux rouges ou d'abaissement de barrières si des forces de police ou de gendarmerie ne sont pas en permanence sur place pour faire respecter ces signaux.

Le tableau III présente des exemples de consignes qui peuvent être établies pour les alertes et alarmes définies au paragraphe 2.7.5.

D'autres procédures sont possibles suivant le contexte de la mise en œuvre de la haute surveillance [8].

TABLEAU III - EXEMPLES DE CONSIGNES À PARTIR DES ALARMES ET ALERTES DÉFINIES AU PARAGRAPHE 2.7.5.

Messages	Problèmes	Destinataires et consignes
A4 Interruption télémesures	Panne de la centrale d'acquisition et/ou panne de liaison téléphonique	Le gestionnaire reçoit le message et doit considérer une interruption du processus de haute surveillance pendant la remise à niveau du matériel par l'organisme responsable de l'instrumentation et de son suivi.
Alerte système	Un capteur est hors gabarit, c'est-à-dire que la valeur indiquée dépasse le seuil préétabli	L'organisme responsable de l'instrumentation et de son suivi reçoit le message et remet en fonctionnement le capteur lorsqu'il s'agit d'une panne. Si ce n'est pas une panne, le gestionnaire et le comité technique décident que c'est une alerte technique (cf. ci-après). Pendant ce temps, la surveillance continue car il y a redondance des capteurs.
A2 Alerte technique	Au moins deux capteurs à surveillance locale mis en place sur le même bloc de surveillance sont hors gabarit	L'organisme responsable de l'instrumentation et de son suivi reçoit le message et vérifie si le problème vient de la chaîne d'acquisition. Le gestionnaire reçoit aussi le message et si le problème n'est pas d'origine métrologique, il doit rapidement activer une expertise locale correspondante au bloc de surveillance défectueux. Plusieurs suites sont possibles : reconsidérer toutes les phases d'investigations en prenant en compte les nouveaux événements, ce qui peut aboutir à une interdiction totale ou partielle de l'ouvrage, ou au contraire, augmente les fuseaux de surveillance des deux capteurs incriminés et continuer la télésurveillance. Pendant ce temps, la télésurveillance continue sur le reste de la structure.
A1 Alarme	Au moins, sur un même bloc de surveillance, un capteur à surveillance locale associé à un capteur à surveillance globale ou deux capteurs à surveillance globale sont hors gabarit	La gendarmerie (par exemple), reçoit directement ce message et interrompt immédiatement la circulation. Le gestionnaire met en place une déviation et réunit le comité pour établir un bilan et déterminer les suites à donner vis-à-vis de la structure.

2.9 Septième principe : une télésurveillance doit être mise à jour

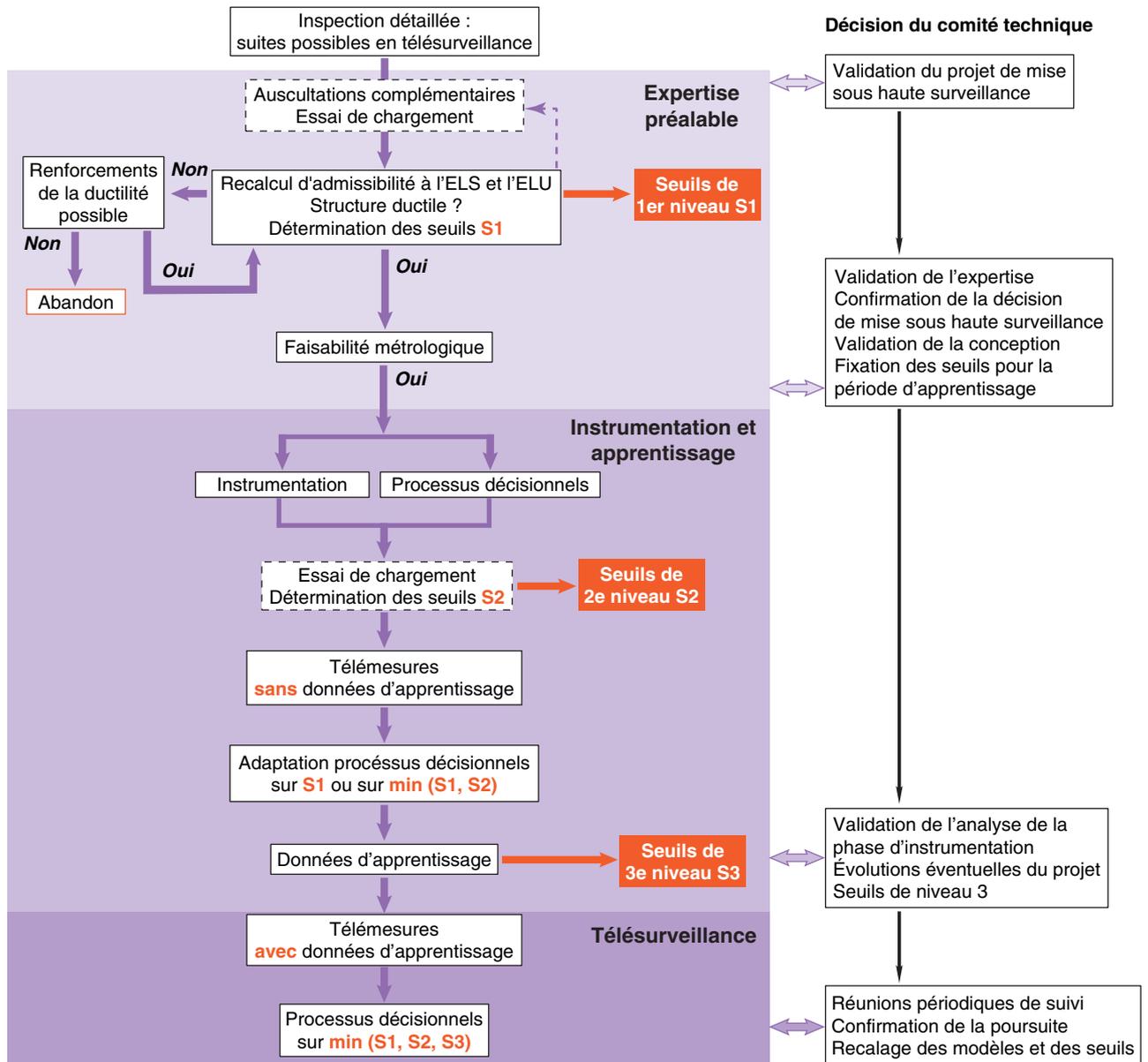
La haute surveillance doit être, elle-même, suivie et surveillée au cours du temps pour :

- ▶ vérifier la bonne adéquation à tous les principes proposés dans les paragraphes précédents,
- ▶ vérifier le bon fonctionnement technique de l'opération en complément aux tests automatiques,
- ▶ vérifier à l'aide de déclenchements périodiques d'alerte et d'alarmes fictives, le bon fonctionnement de la chaîne de haute surveillance, du capteur aux personnes devant mettre en place les interdictions éventuelles,
- ▶ vérifier, par des inspections détaillées, la validité de l'expertise de départ et l'absence de nouveaux désordres pouvant mettre en défaut cette expertise et surtout le principe de ductilité (par exemple la création de rotules supplémentaires conduisant à une situation hypostatique).

2.10 Synthèse des étapes de mise en place d'une haute surveillance par télémesure

La figure 5 présente un organigramme de synthèse montrant l'aspect dynamique et progressif des étapes de la conception et de la mise en place complète de l'opération de télé-surveillance.

■ FIGURE 5
ORGANIGRAMME
SYNOPTIQUE D'UNE
OPÉRATION DE
TÉLÉSURVEILLANCE.



Chapitre 3

Instrumentation de l'ouvrage

3.1 Préambule

L'instrumentation de l'ouvrage pour la télésurveillance est constituée de l'ensemble des dispositifs qui permettent d'assurer la mesure de grandeurs physiques, leur conversion en information numérique, l'enregistrement et la transmission des informations à distance. On distinguera une transmission sur site des capteurs vers un système de supervision* sur ou à proximité de l'ouvrage et une transmission hors site de ce point de centralisation au point d'exploitation. On inclut également dans l'instrumentation les logiciels de gestion des données sur site et des transmissions sur site et hors site.

Compte tenu des évolutions du matériel, l'instrumentation ne peut plus être présentée comme une chaîne linéaire depuis le capteur jusqu'au poste de gestion et d'analyse des données. Il est plus pertinent de la décomposer en fonctions, la répartition spatiale de ces fonctions pouvant prendre de nombreuses formes entre lesquelles on pourra arbitrer en fonction des conditions d'accès aux sections instrumentées, à l'ouvrage, de l'environnement climatique et électromagnétique, des problèmes de protection contre les interventions du public. Ces fonctions sont les suivantes :

- ▶ mesure (capteur) = conversion de la grandeur physique à mesurer en grandeur électrique ;
- ▶ alimentation de l'élément de mesure ;
- ▶ conditionnement de l'élément de mesure ;
- ▶ numérisation du signal ;
- ▶ mémorisation des mesures avec référence temporelle ;
- ▶ calculs éventuels sur la grandeur mesurée (par exemple moyenne, écart type, dérivée, etc.) ;
- ▶ transmission de l'information à un point de centralisation ;
- ▶ gestion des données au niveau du concentrateur (réception - stockage) ;
- ▶ calculs inter-voies ;
- ▶ analyse automatisée des données pour alertes et alarmes - Gestion des décisions ;
- ▶ transmission des données, des alertes et des alarmes.

* On se propose dans ce qui suit, d'employer cette expression de « superviseur » qui s'est imposé dans le monde de la mesure et de la commande. Cette expression peut remplacer ce qu'on appelait précédemment la centrale de mesure et montre mieux que cet organe inclut de nombreuses fonctions et sous-fonctions : gestion des protocoles d'interrogation des capteurs, des transmissions sur et hors site, calculs et génération des alertes et alarmes, stockage des données, etc.

Pour chacune des fonctions, de nombreuses solutions techniques existent mais parmi les critères de choix on devra toujours privilégier le critère de fiabilité. En effet, décider de mettre un ouvrage sous haute surveillance, c'est gérer à la fois le risque de l'hypothèse de ductilité et celui de la défaillance du système de surveillance : ceci ne peut être admis que si pour chacun de ces risques on a choisi la solution la plus fiable. Ainsi, l'hypothèse de ductilité ne peut être affirmée que si on a mis en œuvre les moyens de calculs les plus performants et si on a fait intervenir des experts compétents, voir plusieurs experts. Pour l'instrumentation, on ne choisira que des solutions éprouvées et assurant le plus haut niveau de fiabilité. Une conséquence pratique de ce principe est qu'une opération de télésurveillance n'est pas le lieu d'une expérimentation pour de nouveaux types de capteurs ou de nouveaux dispositifs de gestion des données, sauf à la doubler d'un dispositif fiable auquel elle sera confrontée.

Certaines de ces fonctions ont une position fixe - comme les capteurs qui, le plus souvent, doivent être placés au contact de la grandeur à mesurer ou les transmissions. D'autres sont mobiles au sens où leur position est un choix technologique : il en est ainsi de la fonction de conversion analogique - numérique qui peut être attachée au capteur ou centralisée au poste de supervision (qui peut être lui même partiel, dans le cas d'un réseau de réseaux de capteurs). C'est selon cette grille de lecture que les recommandations sur l'instrumentation seront formulées.

Toutes les fonctions évoquées ci-dessus ne seront pas détaillées dans ce qui suit. Certaines relèvent d'un savoir faire spécialisé ; c'est notamment le cas de l'électronique - avec, par exemple, le conditionnement - qui n'a rien de spécifique à la télésurveillance et qui sera mieux traité dans la littérature de ce domaine.

3.2 *Choix des capteurs de mesure*

3.2.1 Généralités

L'étude préalable de la pathologie de l'ouvrage a permis de déterminer les paramètres à suivre dans le cadre de la mise sous surveillance de l'ouvrage - et donc les grandeurs physiques à mesurer*. Les grandeurs physiques susceptibles d'être mesurées sont généralement des déformations, des déplacements (à une, deux ou même trois dimensions), des rotations, des températures, des pressions hydrostatiques. Cette liste n'est pas exhaustive, d'autres grandeurs peuvent également être mesurées comme des vitesses d'écoulement d'eau, l'hygrométrie relative de l'air, etc.

La mesure dans le but d'enregistrement des grandeurs physiques nécessite l'usage de capteurs. Par capteur on entend l'élément sensible aux variations d'une grandeur physique à mesurer et qui traduit ces variations en une grandeur électrique (tension, courant, charges électriques, impulsions, etc.), appelée aussi signal, corrélée à la grandeur physique à mesurer. Cet élément sensible doit donc être intégré à un circuit électronique de mesure qui comporte généralement une alimentation (sauf dans le cas de capteur générateur de courant) et un conditionneur. Le conditionneur a pour fonction de convertir la grandeur électrique générée par le capteur en une tension, généralement proportionnelle à la grandeur physique à mesurer, de mettre en forme le signal voire de le filtrer. L'évolution technologique fait que le terme « capteur » recouvre des objets très variés : certains capteurs ne sont fournis que sous la forme de l'élément sensible, le conditionnement étant vendu à part, d'autres sont fournis plus intégrés, par exemple leur circuit de linéarisation est intégré au boîtier du capteur, d'autres encore peuvent être complètement intégrés (alimentation, linéarisation, mémorisation, calculs programmables, conversion analogique numérique, gestion du protocole de transmission de l'information numérisée). Ces capteurs, qui intègrent dans la même enveloppe de nombreuses fonctions parmi celles listées précédemment, sont souvent qualifiés de capteurs intelligents.

* On distinguera les paramètres à suivre des grandeurs physiques à mesurer : on pourra, par exemple, vouloir suivre l'évolution de l'ouverture d'une fissure : c'est le paramètre. La grandeur physique à mesurer est alors la largeur de cette fissure.

Les caractéristiques prépondérantes d'un capteur sont :

- ▶ *l'étendue de mesure* : c'est l'intervalle dans lequel le capteur fournit une information valide (généralement, le terme « valide » signifie « à variation linéaire contrôlée ») ;
- ▶ *le temps de réponse du capteur et le temps nécessaire pour faire la mesure* ;
- ▶ *la fidélité* : c'est l'aptitude du capteur à donner la même réponse pour une même sollicitation ;
- ▶ *la précision* : c'est le maximum de l'incertitude de la mesure sur l'étendue de la mesure. Elle s'exprime généralement en pourcentage de l'étendue de mesure ;
- ▶ *la résolution* : c'est la plus petite variation de la sollicitation provoquant une réponse perceptible du capteur ;
- ▶ *la sensibilité du capteur aux conditions de son environnement* ;
- ▶ *la vulnérabilité du capteur* aux risques physiques tels que le vandalisme ou les chocs.

Après avoir identifié les grandeurs physiques à mesurer, il convient de choisir les capteurs en fonction de l'adaptation de leurs caractéristiques à celles des grandeurs à mesurer, tout en tenant compte du type de matériau sur lequel sera fixé le capteur.

◆ La résolution du capteur et la plage de mesure

La résolution sur la mesure doit être compatible avec les plus petites variations à observer sur la grandeur physique. La résolution du capteur devra être plusieurs fois inférieure (empiriquement de cinq à dix fois) au plus petit phénomène à observer. Si la plage de variation de la grandeur à mesurer est connue, on choisira un capteur dont l'étendue de mesures est environ une fois et demie à deux fois cette plage de variation, de manière à conserver une erreur relative de mesure aussi réduite que possible. Dans le cas contraire, il faudra prendre une plage de mesures beaucoup plus large. Il est aussi possible de gérer une alerte sur la saturation d'un capteur ; il faut cependant tenir compte du temps de désaturation propre au capteur avant de reprendre les valeurs affichées par ce capteur après retour à la normale. La résolution et la dynamique étant liées, à coût équivalent, une augmentation de la dynamique entraînera une diminution de la résolution.

◆ Le temps de réponse du capteur

Le temps de réponse du capteur (temps que met le capteur pour traduire la variation de la grandeur à mesurer en un signal corrélée à la nouvelle valeur de la grandeur à mesurer) doit être inférieur aux variations temporelles de la grandeur à mesurer. Ce problème est mineur dans les applications de génie civil où les phénomènes observés (températures, ouvertures, etc.) sont souvent lents par rapport au temps de réponse des capteurs utilisés. En outre, il faut, en principe, tenir compte du temps de stabilisation du capteur lors de sa mise sous tension avant de faire une mesure si le capteur n'est pas alimenté en permanence.

◆ Alimentation du capteur

Le type d'alimentation peut être un critère de choix pour les capteurs. Certains capteurs sont générateurs de courant, d'autres nécessitent d'être alimentés ou conditionnés. Le problème est résolu lorsque cette source d'énergie est fournie par le superviseur (voir plus loin) ou l'interface placée en amont du capteur. Pour certaines applications particulières où le capteur est très loin de la centrale, il sera nécessaire de prévoir une alimentation indépendante à proximité (batteries, piles ou panneaux solaires par exemple) en optimisant le triplet de paramètres : consommation - réserve de la source d'énergie - difficulté d'accès pour renouvellement des réserves de la source. Dans les situations critiques, le projet d'instrumentation devra prévoir un système de mise en veille et de réveil à distance du capteur.

◆ Signal de sortie du capteur

La technologie des capteurs est à choisir en cohérence avec la position de l'alimentation, du conditionnement, le système de transmission et d'alimentation et enfin avec la technologie du superviseur. On veillera simplement à ce que le signal analogique - avant numérisation - ne soit pas atténué et

perturbé par la transmission au point où s'effectue la numérisation (ce peut être en particulier le cas pour les capteurs à boucle de courant, les jauges de déformation, les sondes de température à thermocouple ou les sondes PT100 câblées en deux fils au lieu de quatre, les capteurs qui, dans la gamme des grandeurs physiques à mesurer, ne délivreraient que des tensions de l'ordre du millivolt, par exemple).

On choisira de préférence les capteurs dont l'électronique de conditionnement est intégrée car le signal est en général dans une gamme moins sensible aux perturbations électromagnétiques. Cependant les conditions particulières de compatibilité électromagnétique, les conditions climatiques, les considérations de consommation et d'économie, peuvent conduire à d'autres choix. On pourra aussi choisir des capteurs intelligents, intégrant le conditionnement, la fonction de numérisation et/ou la fonction de stockage des données, voire des fonctions de calcul, pour n'avoir à transférer vers le superviseur, que des données numérisées, ce qui réduit encore les risques de perturbation.

◆ Le calibrage, interchangeabilité et accès au capteur

Dans le cadre d'une télésurveillance, les capteurs sont mis en place pour des périodes longues. Dans ces conditions, il est nécessaire d'être rigoureux sur le calibrage initial et la fiabilité (autonomie, faible maintenance) du capteur.

Dans le cas de capteur inaccessible après installation, il faudra être *sûr de la validité de l'information* délivrée par le capteur pendant toute la période de télésurveillance. Si le type de capteur choisi nécessite des étalonnages réguliers, il faudra rendre le capteur accessible et repositionnable : la continuité et le recouvrement des mesures devront être assurés par d'autres capteurs. De même, en cas de panne d'un capteur, il faut prévoir, dès la conception de l'installation de télésurveillance, son mode de remplacement et garantir la quasi-continuité des mesures. La solution la plus simple et la plus efficace est de multiplier le nombre de capteurs. Cette solution offre en plus la possibilité de détecter les dysfonctionnements d'un capteur par comparaison de toutes les mesures. Cette redondance entraîne forcément un surcoût.

Dans le cas d'une surveillance de niveau 1 au sens du niveau de sécurité présentée au paragraphe 3.6, l'absence de mesures sera tolérée pendant un laps de temps défini pour des opérations de maintenance des capteurs ; pour le niveau 2 (au sens du paragraphe 3.6.1), la continuité des mesures sera assurée par la redondance.

◆ Les grandeurs d'influence

Il faudra choisir des capteurs présentant une bonne immunité vis-à-vis des perturbations externes (humidité, température, dégradation physique, etc.) auxquels ils risquent d'être soumis. C'est cette nécessité de maîtrise de la sensibilité aux grandeurs d'influence qui a conduit à la recommandation figurant au préambule de ce chapitre relative au choix de solutions éprouvées au détriment de solutions innovantes plus ou moins bien validées dans les conditions de durée de la haute surveillance.

3.2.2 Recommandations concernant diverses grandeurs spécifiques

3.2.2.1 Fissurométrie

La mesure du souffle d'une fissure (ou d'un joint entre voussoirs) s'effectue à l'aide d'un capteur de déplacement de petite étendue de mesure (quelques millimètres) et de grande sensibilité. Le capteur est fixé de part et d'autre des lèvres de la fissure avec un recul de quelques centimètres par rapport aux lèvres.

La mesure de rejet (déplanation) peut être effectuée avec un capteur de même type mais avec un dispositif de fixation adéquat (axe du capteur perpendiculaire au parement).

La mesure de propagation d'une fissure peut être effectuée à l'aide d'une jauge de propagation de fissure à trame brisable. Ce capteur se présente sous la forme d'une jauge de déformation à coller.

L'apparition d'une fissure dans une zone particulière peut être détectée grâce à la rupture d'une ligne de laque d'argent « peinte » sur la structure, ou par la rupture d'une fibre optique collée sur la structure (technologie en développement). Ces techniques nécessitent des précautions d'utilisation.

3.2.2.2 Déformations

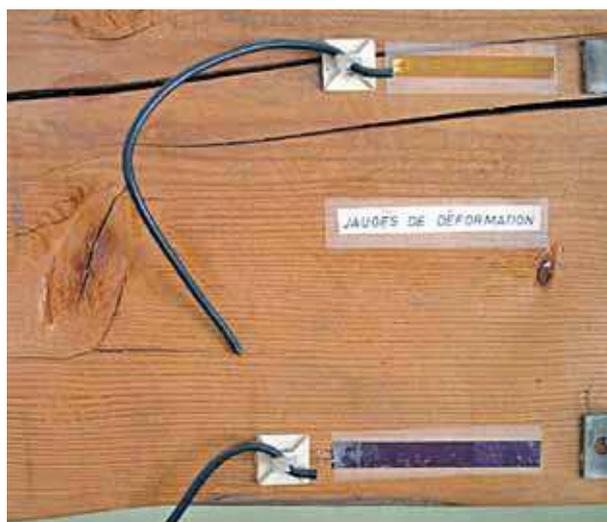
Les mesures de déformation peuvent se classer en deux rubriques :

- ▶ mesure de déformation de la matière en un point,
- ▶ mesure de déformation d'une structure.

Le premier type de mesure fait appel à l'extensomètre (Fig. 6). Il s'agit de mesurer finement une variation relative de longueur ($\mu\text{m}/\text{m}$) en un point donné pour accéder éventuellement à la variation de contrainte si on connaît le module de déformation du matériau de la structure. Les capteurs les plus employés sont les jauges d'extensométrie à trame pelliculaire collées sur la structure ou collées sur des éléments qui sont par la suite intégrés à la matière (lors d'un bétonnage par exemple). Les mesures fondées sur des jauges d'extensométrie nécessitent un conditionnement sous forme de pont de jauge qui doit être placé au plus près du capteur.

Une autre technologie de mesure des déformations locales est constituée de corde vibrante qui est soit incorporée à la matière, soit fixée au parement. Les capteurs à corde vibrante sont des capteurs intégrés dans la mesure où l'élément sensible est une corde vibrante dont la fréquence d'oscillations libres est fonction de son allongement. Le conditionnement comporte l'électronique de mise en vibration de la corde et la mesure des variations de sa fréquence propre.

La mesure de déformation d'une structure (ou d'un élément de structure) nécessite des capteurs dont la base de mesure est importante et peut atteindre quelques dizaines de mètres. Le principe de mesure le plus courant est le distancemètre à fil Invar : une ligne de fil en métal Invar est établie parallèlement à la déformation à mesurer, fixée à une extrémité de la structure, puis fixée à l'autre extrémité à l'aide d'un dispositif de mise en tension qui est situé soit à l'autre extrémité de la structure, soit à un point fixe indépendant de la structure. Un capteur de déplacement mesure la variation d'allongement entre deux points : l'un étant matérialisé par le support du capteur fixé à la structure, et l'autre étant un point ramené par la ligne en Invar à proximité du capteur. D'autres types de montages, basés sur ce principe, existent.



■ **FIGURE 6**
INSTRUMENT DE MESURE
DE LA DÉFORMATION.

3.2.2.3 Déplacements

Le type de capteur employé pour mesurer le déplacement relatif entre deux éléments d'ouvrages dépend principalement de l'éloignement des deux éléments. Pour une distance inférieure au mètre, plusieurs types de capteurs de déplacement existent (Fig. 7).

■ FIGURE 7
CAPTEUR DE DÉPLACEMENT.



Pour des distances supérieures au mètre, un système basé sur une ligne Invar est à étudier (cf. paragraphe 3.2.2.2). L'utilisation de capteurs basés sur une émission infrarouge ou faisceau laser peut être envisagée (distancemètres automatiques par exemple).

Dans le cas particulier de deux objets situés l'un au-dessus de l'autre et qui se déplaceraient horizontalement l'un par rapport à l'autre, on pourra penser à utiliser un pendule.

◆ Rotations

La mesure de la rotation d'un élément d'ouvrage s'effectue soit à l'aide d'un clinomètre fondé sur le principe du balancier ou de la bulle mobile, soit à l'aide d'un pendule direct ou inversé. Dans les deux cas, la référence est la direction de la pesanteur terrestre. Toutes les gammes de mesure sont disponibles. Les plus performantes affichent une résolution d'environ 1×10^{-8} radian. Cette mesure rend compte d'une rotation uniquement à l'endroit où est disposé le capteur (Fig. 8).

■ FIGURE 8
CLINOMÈTRE.



3.2.3 Capteurs de température

Bien que leur coût soit plus élevé que celui des sondes à thermocouple et des thermistances, les capteurs les plus fiables pour les applications de télésurveillance sont aujourd'hui les capteurs à sonde à résistance de platine. On les câblera de préférence en quatre fils afin de rendre l'information indépendante de la distance sonde - conditionnement (Fig. 9).



■ FIGURE 9

SONDE À RÉSTANCE DE
PLATINE AVEC SA CONNEXION.

Dans le cas des tabliers de pont, les différents capteurs situés dans une même section de l'ouvrage devraient être implantés suivant un axe vertical. Cette disposition est cependant à analyser au cas par cas et doit être aménagée dans certains cas particuliers. Elle paraît cependant valable pour nombre de structures simples en béton (dalles, poutres, caissons à deux âmes, etc.).

Pour l'observation d'un gradient thermique local, la distance entre capteurs doit être adaptée à l'amplitude locale des variations thermiques. Ainsi, classiquement, l'instrumentation devrait être dense dans le hourdis supérieur des ponts, plus espacée à l'ombre et dans les parties à faible variation thermique. Les fibres extrêmes de la section droite devraient obligatoirement être instrumentées. Si, en pratique, cela s'avérait impossible, la température du matériau au niveau de la fibre extrême devra être estimée, car elle a un poids très important dans l'évaluation du gradient thermique.

3.2.3.1 Accélération - Vibration

La surveillance de vibrations et de mouvements divers à l'aide d'accéléromètres est relativement moins répandue que celle fondée sur les autres principes de mesure, exceptée dans le cas de la surveillance des émissions acoustiques dues aux ruptures de fils de câbles de précontrainte, des suspentes et des haubans. Cette technique dite de surveillance acoustique repose sur une chaîne d'accéléromètres disposés en différents points de l'objet à surveiller : lorsque le capteur reçoit un signal de caractéristique identifié préalablement comme une rupture, l'événement est compté et localisé par comparaison des temps d'arrivée sur les différents capteurs de la chaîne.

L'évolution technologique devrait permettre de développer prochainement une technologie plus fine qui, au-delà du comptage d'événements dépassant un certain seuil, sera capable d'identifier la signature de différents événements - ruptures, glissements, etc.

3.3 Implantation des capteurs sur l'ouvrage - Vérifications et redondance

L'expertise technique de l'ouvrage doit permettre de classer les grandeurs à mesurer en deux catégories correspondant aux variables explicatives et aux variables à expliquer.

L'expertise permet également de définir l'implantation des sections où les facteurs qui rendent compte de l'évolution éventuelle sont les plus sensibles. C'est donc à ces endroits que sont disposés les capteurs. Par ailleurs, la connaissance des variations thermiques subies par l'ouvrage est indispensable car elle est nécessaire au dépouillement et à l'analyse des mesures ou à la mise en place de systèmes de compensation.

La réponse extrinsèque d'un capteur (réponse intégrant l'effet de la grandeur à mesurer et toute la chaîne d'alimentation, de conditionnement, de transmission et de numérisation) peut (et doit) être mise en doute

dans tous les cas, qu'elle présente ou non un caractère singulier (trop grande stabilité ou, à l'inverse, trop grande amplitude de variation, etc.). Il faut en effet évaluer l'influence des facteurs environnementaux. Pour traiter cette information, trois approches sont possibles (elles ne sont pas exclusives) :

- ▶ l'approche déterministe : l'information est expurgée des phénomènes parasites (températures, dérives de toutes sortes) puis traitée en tant que telle ;
- ▶ l'approche probabiliste ;
- ▶ l'approche statistique.

Pour valider cette information, il est nécessaire de prévoir certaines vérifications :

- ▶ il peut être judicieux par exemple d'effectuer un suivi de la tension électrique d'alimentation des capteurs, la réponse des capteurs pouvant être directement liée à cette tension ;
- ▶ sur les grandeurs « critiques », une redondance des mesures est vivement conseillée, en particulier celles qui contrôlent l'alerte et l'alarme. Une comparaison de plusieurs réponses (alerte sur deux capteurs HG - cf. paragraphe 2.7.5) sera effectuée avant son déclenchement ;
- ▶ il est également souhaitable de mettre en place à proximité des capteurs actifs dans la chaîne générale de mesure, un capteur de même technologie et placé de telle sorte qu'il ne soit pas soumis aux grandeurs à mesurer mais uniquement soumis, le cas échéant, aux variations des actions cycliques. Ces *capteurs de référence* permettent de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure. On pourra par exemple placer une sonde de température à l'extérieur du béton d'un voussoir pour valider l'ensemble des capteurs répartis à différents niveaux de la section dont on veut suivre le gradient.

3.4 Organisation de la chaîne* de capteurs

PAGE

30

3.4.1 Schémas généraux d'organisation

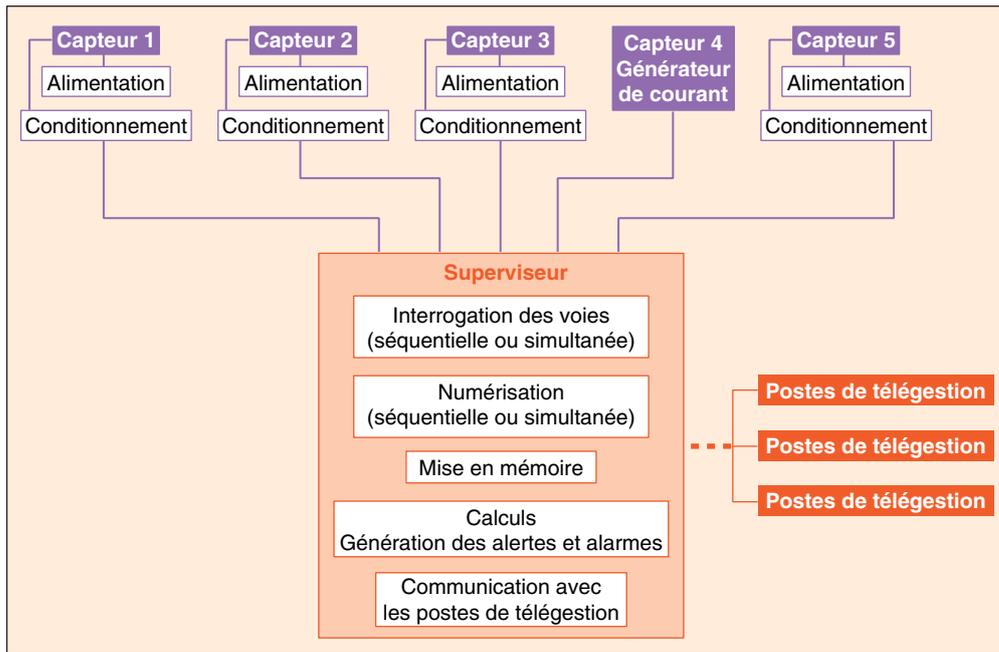
Comme le montre la liste établie en préambule, une fois décidé de l'ensemble des grandeurs à mesurer et des capteurs, il reste un nombre important de fonctions à assurer. À ce stade, il existe de nombreuses solutions qui mettent plus ou moins de moyens en commun et constituent une chaîne locale : les extrémités de ce réseau sont d'une part chacun des capteurs, d'autre part un superviseur qui assure la communication entre les capteurs et le stockage des données, la génération des alertes et alarmes et la communication hors site. Nous illustrerons les possibilités et les problèmes posés à l'aide de trois conceptions de chaîne parmi les nombreux schémas possibles.

3.4.1.1 Organisation en étoile

Le schéma de la figure 10 illustre cette conception. L'alimentation et le conditionnement sont placés au plus près du capteur et la liaison capteur - superviseur ne transporte que l'information analogique. L'alimentation de chaque capteur peut éventuellement être assurée par la ligne de transmission, ce qui limite les problèmes d'autonomie des alimentations locales et les problèmes de maintenance.

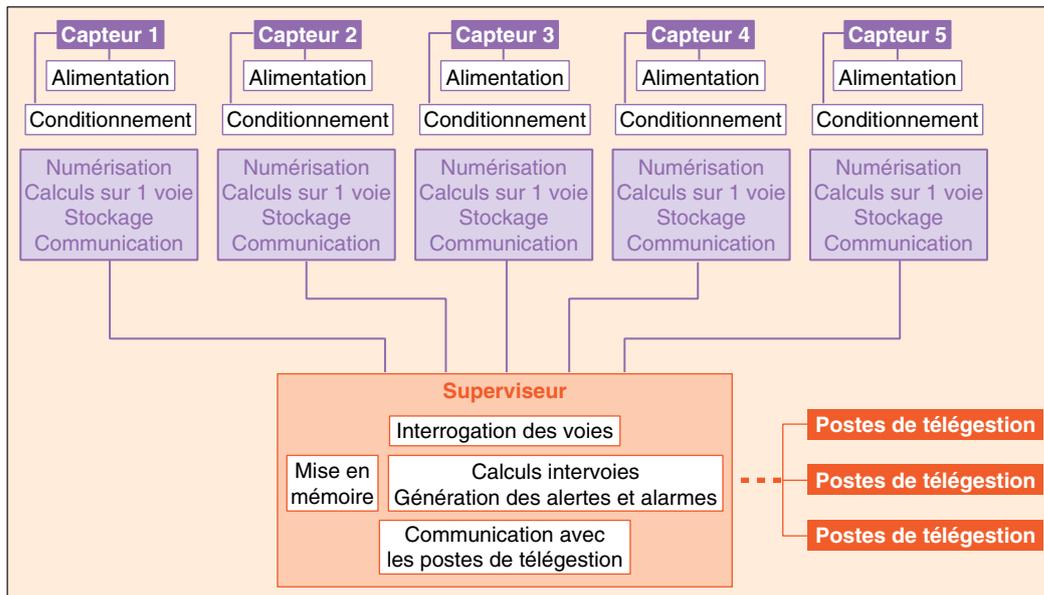
Cette solution est très classique : l'indépendance de câblage de chaque capteur limite les problèmes de pollution électrique entre voies et limite les risques de rupture de fil à la seule voie interrompue : le diagnostic et donc les alertes pour comportement sur un capteur s'en trouvent simplifiés.

* On préférera l'expression chaîne de capteurs plutôt que réseau de capteur, car l'expression « réseau » d'éléments a pris le sens d'éléments en interaction au sein du réseau. Ici, les capteurs sont toujours en relation singulière et passive avec le superviseur, éventuellement à travers une intelligence déportée.



■ FIGURE 10 - SCHÉMA GÉNÉRAL D'UNE CHAÎNE À STRUCTURE EN ÉTOILE ANALOGIQUE À FONCTIONS CENTRALISÉES.

3.4.2 Organisation en étoile à numérisation répartie (Fig. 11)



■ FIGURE 11 - SCHÉMA GÉNÉRAL D'UNE CHAÎNE EN ÉTOILE NUMÉRIQUE DÉCENTRALISÉE.

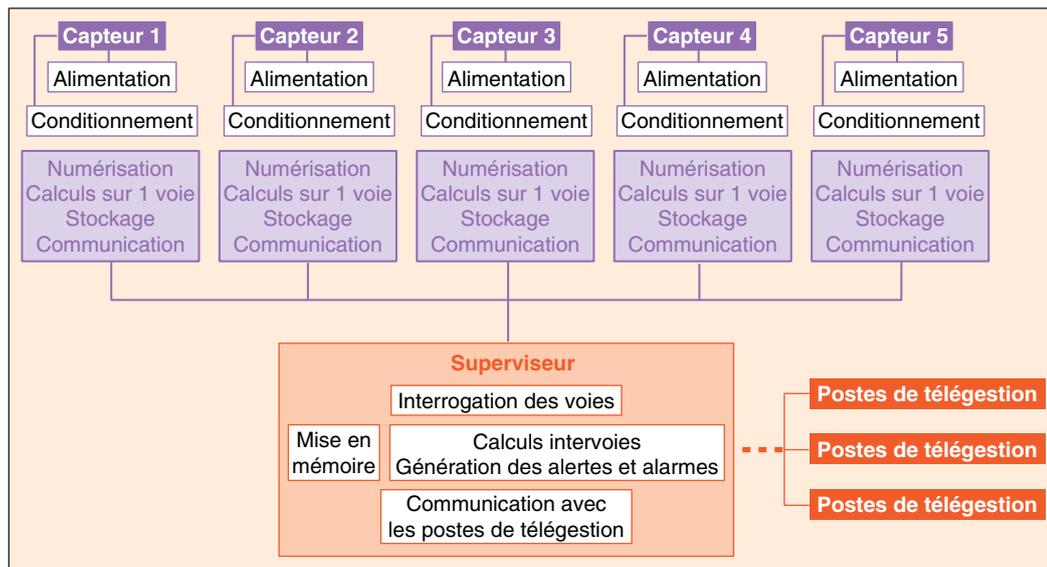
La grande différence de cette organisation avec la précédente est que chaque capteur est équipé d'un convertisseur analogique - numérique (CAN). Dans ce cas, il est également souvent équipé d'un processeur qui permet de réaliser des calculs à prédéfinir (par exemple moyenne, intégration dans le temps, dérivation, etc.) et d'une mémoire permettant soit de stocker toutes les données intermédiaires, soit de ne stocker que le résultat des calculs.

Les fils de liaison capteurs - superviseur ne véhiculent que des informations numériques, ce qui est beaucoup plus fiable sur le plan des influences électromagnétiques dues à l'environnement.

Cette topologie de chaîne de capteur peut également être fondée sur une liaison hertzienne entre les capteurs et le poste de centralisation.

3.4.2.1 Organisation en bus à numérisation répartie

Dans cette organisation, la fonction de transmission des capteurs au poste de centralisation est assurée par un seul fil. Le superviseur envoie périodiquement sur le bus une sollicitation adressée à chacun des capteurs repérés par son adresse. Cette solution assure les mêmes services de diagnostic de défaut sur chaque capteur puisque chacun possède une adresse. Cependant, en cas de rupture du bus, c'est toute la chaîne au-delà de cette rupture qui est en défaut. La protection du bus devient un enjeu majeur (Fig. 12).



■ FIGURE 12 - SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN RÉSEAU EN BUS NUMÉRIQUE.

D'autres solutions existent. Le bus physique peut être remplacé par une transmission hertzienne - ce qui réduit les problèmes de protection des lignes et bus mais pose des problèmes de protection contre les intrusions. Par ailleurs, des superviseurs locaux peuvent assurer différents niveaux de traitement préalables à la transmission via le bus, physique ou hertzien, vers le superviseur. Cette solution est intéressante car elle conduit à structurer des sous-chaînes au droit de chaque bloc de surveillance et de gérer localement les problèmes d'énergie et de numérisation.

3.4.3 L'alimentation des capteurs

L'alimentation des capteurs peut être fournie via la liaison filaire locale et/ou par bloc de capteurs. À ce stade, les choix technologiques réalisés pour la répartition des fonctions (capteurs, conditionnement, numérisation, stockage et calculs) doivent conduire à examiner soigneusement les consommations des différents organes chargés de ces fonctions. L'accessibilité de ces organes joue également un rôle important dans l'hypothèse d'une alimentation autonome de type batteries ou piles car il faut optimiser les coûts et la durée de cette autonomie avec celle des dispositions nécessaires au renouvellement. Dans le cas d'alimentation par panneaux solaires voltaïques, il faudra également vérifier la consommation des organes qui en dépendent par rapport à la réserve d'énergie associée aux panneaux, eu égard aux conditions climatiques. On se méfiera en particulier du recours à cette méthode d'alimentation en site exposé à la neige ou aux salissures.

3.4.4 La conversion analogique /numérique

La conversion analogique/numérique (CAN) est indispensable au stockage et à la transmission à grande distance des données. Elle est réalisée par un processeur qui peut être :

- ▶ soit intégré à l'équipement local de conditionnement du capteur,
- ▶ soit intégré au superviseur avec un CAN par voie,
- ▶ soit intégré au superviseur avec CAN commun à plusieurs ou toutes les voies.

Dans ce dernier cas, le CAN est précédé d'un multiplexeur, composant qui interroge successivement toutes les voies de mesures qui lui sont raccordées et envoie cette information au CAN. Compte tenu de la périodicité des acquisitions nécessaires dans le domaine de la télésurveillance sur ouvrages d'art, la solution de multiplexage est souvent admissible. Dans certains cas, cette solution n'est cependant pas adaptée : ainsi, la surveillance acoustique des câbles de précontrainte nécessite une grande rapidité d'échantillonnage sur toute la chaîne de capteur et une disponibilité permanente du dispositif d'enregistrement puisque les événements peuvent être très rapprochés. Généralement, cette solution n'est également pas adaptée pour une instrumentation impliquant de nombreux points de mesure de grandeurs dynamiques.

La première caractéristique de performance du CAN est le nombre de niveaux (bits) sur lequel est réalisée la numérisation. Ce nombre de niveaux (couramment de douze à seize aujourd'hui, mais davantage de niveaux sont déjà disponibles) doit être calculé en fonction de l'étendue de variation des valeurs à mesurer et de la précision de mesure attendue. Sa deuxième caractéristique de performance est sa rapidité d'exécution qui doit être compatible avec la fréquence d'échantillonnage souhaitée et le nombre de capteur qu'il dessert dans le cas de multiplexage.

À titre indicatif, l'expérience a montré que pour une instrumentation courante il était souhaitable que :

- ▶ les températures soient acquises toutes les minutes et moyennées sur une plage de 10 minutes ;
- ▶ les mesures de déplacement et de déformation soient réalisées toutes les 10 minutes ;
- ▶ les calculs intra-voies soient faits à chaque acquisition ;
- ▶ les calculs inter-voies soient faits toutes les 10 minutes de même que les calculs et tests nécessaires à la génération des alertes et alarmes.

Ces recommandations ne sont évidemment pas valables dans le cas de la surveillance des câbles.

Enfin, dans le cas de suivi de phénomènes vibratoires (fréquence d'oscillation d'un élément de structure par exemple), il convient de prendre garde à la relation entre la fréquence d'échantillonnage du signal et la plus haute fréquence contenue dans le signal F_s . Le théorème de Shannon indique que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins double de la fréquence F_s , sinon apparaît le phénomène de repliement. Cette remarque suppose donc que l'on ait une bonne idée du contenu fréquentiel de la grandeur à mesurer. Ensuite deux solutions sont envisageables :

- ▶ soit on place en amont du CAN un filtre analogique passe bas dont la fréquence de coupure est inférieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. C'est la solution la plus sûre,
- ▶ soit on échantillonne à une fréquence supérieure à environ dix fois la fréquence F_s supposée. C'est une solution économique si le système d'acquisition de données et le CAN sont rapides.

3.4.5 Technologies et protocoles de transmission des données

Les liaisons capteurs - superviseurs se caractérisent par trois aspects : le support physique de la transmission (filaire ou hertzien), la forme de l'information transmise (analogique ou numérique) et le protocole de transmission. Dans tous les cas la protection physique des liaisons doit être aussi soignée que possible, en particulier vis-à-vis des risques de vandalisme.

3.4.5.1 Les liaisons analogiques

Les liaisons analogiques sont essentiellement filaires. Le fil est composé de deux à quatre conducteurs par capteurs. Pour les capteurs en tension classiques, deux conducteurs suffisent : un fil de signal et un fil de masse. Que le câble soit mono ou multi-filaire, pour assurer la compatibilité électromagnétique (CEM), chacune de ces paires doivent être blindées individuellement. Pour les capteurs de type PT100 ou pour les jauges extensométriques, il existe des montages à deux, trois ou quatre conducteurs qui permettent différents types de mesure et différentes compensations de longueur de fil entre le capteur et le superviseur. Comme dans le cas des capteurs en tension, ces ensembles doivent être blindés.

Le raccordement de la masse des capteurs à la masse du superviseur et à la terre qui doit être créée à proximité du superviseur sont des cas d'espèce à traiter en fonction de l'environnement de l'ouvrage.

Il est aussi possible d'assurer la liaison analogique par fibres optiques munies à chaque extrémité d'optocoupleurs qui assurent les conversions électrique - optique puis optique-électrique.

Les avantages des liaisons analogiques sont leur classisme et leur bonne maîtrise. En circuit « boucle de courant », elles autorisent des distances de transmission supérieures à 500 m vers le CAN.

Les inconvénients des liaisons analogiques sont leur coût prohibitif dès que le nombre de capteurs devient important, la sensibilité de la liaison aux influences électromagnétiques et à la foudre, sauf dans le cas des fibres optiques. La liaison en tension ne peut dépasser 100 m. Les réparations des liaisons par fibres optiques sont délicates.

3.4.5.2 Liaisons numériques filaires

L'évolution technologique en la matière est très rapide. Pour la transmission d'informations numériques, il convient de distinguer le standard de la liaison et le protocole. On citera pour mémoire deux technologies relativement anciennes et peu rapides : les liaisons séries RS232, RS485 (pour mini maillages de vingt capteurs au plus) et les liaisons parallèles limitées en distance sauf dans leur version GPIB. Pour des installations de faible dimension, ces standards de liaison sont encore adaptés.

Les avantages des liaisons séries et parallèles sont l'économie de câblage lorsqu'on va vers des chaînes reliées par bus, la qualité et la maîtrise de la transmission ainsi que la réduction de l'influence des perturbations électromagnétiques.

L'inconvénient des liaisons séries et parallèles est la vulnérabilité à la détérioration de la chaîne.

L'alternative aux liaisons séries ou parallèles traditionnelles sont les liaisons orientées réseau (BNC, Ethernet) dont le support est soit coaxial soit par paire comme les lignes téléphoniques. Il existe aussi un support par fibres optiques et surtout des solutions par transmission hertzienne en évolution très rapide.

En matière de protocoles de gestion du dialogue capteur - superviseur plusieurs standards existent dont les plus courants sont :

- ▶ FTP,
- ▶ TCP/IP (de loin le plus courant),
- ▶ http,
- ▶ UDP/IP,
- ▶ WIFI (TCP/IP sans fil) et Bluetooth pour les transmissions hertziennes.

Les avantages des liaisons orientées réseau sont l'économie de câblage, la qualité et la maîtrise de la transmission et le haut débit.

Les inconvénients de la liaison Ethernet sont la vulnérabilité à la détérioration du réseau comme toutes les liaisons filaires, la réparation délicate (coaxial, fibre optique), la sensibilité aux perturbations électromagnétiques et aux intrusions dans le cas des transmissions hertziennes.

Les avantages des protocoles sont la capacité de contrôle de la qualité de la transmission et l'indépendance de la liaison filaire.

3.5 *Le superviseur*

Le superviseur peut être aussi bien un équipement entièrement dédié à ce type de fonctions (classiquement appelé centrale de mesure) ou un ordinateur équipé de cartes de mesure et d'un logiciel de gestion des mesures. La différence entre la plupart des centrales de mesure et les systèmes fondés sur des ordinateurs est que ces derniers offrent généralement une plus grande souplesse sur le plan de la programmation de calculs spécifiques à une télésurveillance, à un ouvrage, ou à un environnement. Cependant ces différences tendent à disparaître, dans la mesure où l'architecture des centrales de mesure tend à rejoindre celle des systèmes fondés sur des ordinateurs et des cartes de mesure. Dans ce cas, le conditionnement mieux adapté des centrales de mesure peut les rendre plus pertinentes.

Comme l'a montré la présentation des schémas d'organisation de la chaîne de capteurs, les fonctions dévolues à ce superviseur pourront être assez variables pour toutes les fonctions de gestion des capteurs (conditionnement, interrogation, conversion analogique digitale, stockage intermédiaire, calculs intra-voie et calculs inter-voies dans une section donnée, évaluation des alertes et alarmes). En revanche, il existe des fonctions systématiques : stockage sur longue période, gestion centralisée des alarmes et alerte, gestion de la télégestion, c'est-à-dire de la gestion de la télésurveillance à partir de postes de travail situés à grande distance de l'ouvrage.

Les paramètres qui vont influencer sur le choix du superviseur et de la configuration même de la télésurveillance sont les suivants :

- ▶ la fréquence des mesures, s'il doit gérer la conversion analogique/numérique ;
- ▶ la capacité de stockage et de traitement.

La capacité de stockage à prévoir dans le superviseur est la résultante de différentes contraintes :

- ▶ la périodicité des acquisitions et du stockage des données et de leur nombre ;
- ▶ la conception des traitements mathématiques programmés et la répartition de ces traitements entre superviseur central et superviseurs locaux quand ils existent ;
- ▶ la périodicité des opérations de traitement mathématique ;
- ▶ les possibilités de transmission hors site (interrogation à distance et déclenchement d'alarmes) et la disponibilité des personnels chargés de télédécharger les données sur un site de stockage hors site ;
- ▶ les différents types d'alimentation possibles du superviseur ;
- ▶ la possibilité de protéger le superviseur contre le vandalisme et contre la foudre ;
- ▶ *la possibilité de redémarrer le superviseur* en cas de mauvais fonctionnement ou de blocage (dispositif « chien de garde ») ;
- ▶ *les moyens humains disponibles* et la sous-traitance possible. En effet, choisir une solution orientée réseau peut être à rejeter s'il n'y a pas de possibilité de s'adjoindre une personne compétente en informatique et en électronique. Ce paramètre est crucial si le système doit être évolutif ;
- ▶ *la fiabilité de fonctionnement* : aucune défaillance du système d'acquisition n'est en théorie admissible dans le cas de haute surveillance. L'objectif zéro défaut est utopique, mais il faut au moins se prémunir le plus possible. Le superviseur devra détecter les dysfonctionnements des capteurs et prévenir le gestionnaire. Le système global doit être conçu également de manière qu'un dysfonctionnement de l'ensemble de la télésurveillance soit détecté et qu'une alarme soit propagée. Il existe pour cela divers modules appelés « chien de garde » qui vérifient en permanence le bon fonctionnement de l'ensemble ;
- ▶ la capacité à communiquer qui doit être en cohérence avec le protocole de communication choisi, le logiciel de gestion de la télésurveillance et les moyens de surveillance de fonctionnement mise en place.

Les fonctionnalités des logiciels de gestion de la télésurveillance sont très variées ; on peut les classer en trois catégories :

- ▶ la communication avec les capteurs et la gestion à distance des paramètres d'acquisition des différents capteurs (fréquence d'acquisition, calculs intra et inter voies, mise en sommeil ou réveil de voies, amplification) ;

- ▶ la gestion des processus décisionnels, des alertes et des alarmes, y compris l'appel automatique des organismes chargés respectivement de la maintenance, de la police et du suivi technique de la télésurveillance, la gestion des transferts de données ;
- ▶ les possibilités de consultation et de présentation graphique à la demande des données encore dans l'unité de stockage sur site.

3.6 *Fiabilité de l'installation de télésurveillance*

3.6.1 Conception générale

La fiabilité d'un système de télésurveillance est le résultat de moyens convergents qui touchent à la qualité des matériels mis en œuvre, à la gestion prévisionnelle des pannes envisagées et des moyens de surveillance de l'ensemble du système mis en place.

Lorsque les risques encourus nécessitent un processus de mise sous haute surveillance, le choix du niveau de sécurité du système peut généralement être choisi selon deux niveaux :

- ▶ *Le niveau 1* qui tolère des interruptions momentanées du système de surveillance dont la durée est à définir au cas par cas. Pour ce niveau, les éléments défaillants de la chaîne sont simplement remplacés dans les délais fixés.
- ▶ *Le niveau 2* qui ne tolère aucune interruption du système de surveillance. Pour ce niveau, il est fait appel au principe de redondance et les éléments de la chaîne doivent être doublés. En outre, des précautions spéciales doivent être prises pour assurer une protection totale du système vis-à-vis de la foudre et des coupures de courant ou de transmission.

La première composante de la fiabilité est la qualité des éléments de la chaîne de mesure, traité plus haut. Les critères de précision, de mesure, de plage de mesure, de justesse et de longévité (absence de dérive des appareils dans le temps) sont aussi à considérer dans le cadre de l'étude de la fiabilité. On rappellera ici l'importance du choix de matériels éprouvés dans des applications similaires, l'importance des risques encourus ne permettant pas de profiter d'une telle opération pour tester du matériel nouveau (sauf à le doubler d'un matériel éprouvé). On a vu également que la vérification et la redondance sont deux éléments fondamentaux de la fiabilité de la mesure :

- ▶ redondance de la mesure du même phénomène à l'aide de deux moyens de mesure et vérification des dérives : génération d'une alerte de type dysfonctionnement d'un capteur si un seul des deux fait apparaître une dérive, génération d'une alarme si les deux indiquent une dérive cohérente dépassant un seuil d'alarme ;
- ▶ doublage d'un certain nombre de capteurs par un moyen de mesure manuel de manière à pouvoir raccorder les valeurs mesurées avant et après une panne ou le remplacement d'un capteur (exemple de l'installation d'embases de nivelles manuelles auprès des clinomètres).

Le second point est la fiabilité de la technologie de transmission des données entre le capteur et le ou les superviseur(s) ; cette transmission doit être aussi bien protégée que possible des perturbations électromagnétiques, de la foudre et du vandalisme et enfin des intrusions dans le cas des transmissions hertziennes. Les superviseurs doivent être à même de tester ces liaisons et de générer les alertes maintenance en cas d'interruption de liaison.

En cas de surveillance de niveau 2, il convient de prévoir une organisation du maintien opérationnel constant de la télésurveillance. Elle peut être composée :

- ▶ de l'ensemble des procédures de vérification et des protocoles d'alerte et d'alarme,
- ▶ de la désignation d'un organisme chargé de la maintenance du matériel (fonction maintenance capteurs). Il devra avoir acquis une bonne compétence dans le domaine particulier pour réaliser les

opérations de maintenance et de réparation en tenant compte des exigences de continuité des données. Il devra également assurer une bonne rapidité d'intervention, typiquement de l'ordre de la demi-journée ;

- ▶ de la désignation d'un organisme chargé de la surveillance de la continuité des liaisons notamment entre le superviseur central et les postes de télégestion (fonction maintenance ligne). Cette surveillance doit être permanente,
- ▶ un ensemble de protocoles d'intervention et d'information de ces différents organismes.

Chacun des intervenants dans une opération de télésurveillance devrait être doté d'un *Plan Qualité* spécifique à l'opération et un *Schéma Directeur de la Qualité* doit les mettre en cohérence et assurer les interfaces.

3.6.2 Protection du matériel de la chaîne de télémesures

3.6.2.1 Perturbations indépendantes de la foudre

◆ Température et humidité

On se protège de l'humidité par une parfaite étanchéité des matériels et l'on apporte un soin particulier au niveau des connections qui peuvent être la source de nombreuses infiltrations.

◆ Agressions mécaniques

Pour choisir le matériel, on examinera les risques de mouvement dans l'environnement des câbles, comme par exemple le glissement de terrain ou la circulation d'engins pouvant provoquer des écrasements.

◆ Vandalisme

Le vandalisme n'est pas toujours intentionnel. La première mesure à prendre est de réaliser une installation aussi discrète que possible de manière à ne pas attirer la curiosité. Contre le vandalisme intentionnel il n'est que la robustesse des différents organes et les systèmes de téledétection de panne déjà évoqués plus haut.

3.6.3 Protection contre les effets de la foudre

Chaque élément d'une chaîne de télémesure et chaque capteur ne pouvant être protégé individuellement, l'expérience conduit à préconiser les dispositions suivantes :

- ▶ Protection des circuits électroniques par mise hors tension des capteurs en dehors des périodes de mesure par relaiage et utilisation de régulateurs de tension.
- ▶ Protection du superviseur par :
 - Déconnexion par relaiage, hors des périodes de mesure, des lignes de mesure à chacune de leur extrémité ;
 - Triple isolation des entrées du superviseur par :
 - . relaiage des cartes de communication,
 - . relaiage des interfaces,
 - . couplage opto-électronique des interfaces,
 - . utilisation d'une alimentation haute isolation.
- ▶ Conception appropriée des cartes électroniques (composants distants, pistes élargies).
- ▶ Liaison des masses des capteurs et du superviseur à un équipotentiel relié à la terre.
- ▶ Limitation du câblage par positionnement du superviseur au barycentre des capteurs.

- ▶ Implantation du câblage en souterrain plutôt qu'à l'air libre.
- ▶ Câblage par fibres optiques dans les cas difficiles.
- ▶ Utilisation de capteurs autonomes en préférant les piles aux batteries.
- ▶ Remplacement des liaisons galvaniques par des fibres optiques.
- ▶ Mise hors tension du superviseur en dehors des périodes de mesure.

Il existe aussi des éléments de protection désignés sous le nom « d'éléments de protection contre les surtensions ». Leur rôle consiste à limiter les tensions transitoires à une valeur définie, indépendamment du courant. En réalité, il n'existe encore aucun composant présentant un comportement idéal.

Chapitre 4

Traitement de données

Modélisation du comportement

Fixation de seuils

4.1 Phases techniques de gestion et d'exploitation des données issues de télémesure

PAGE
39

Les données issues de l'instrumentation installée en vue d'une haute surveillance par télémesure font l'objet de différents traitements qu'il convient de définir :

◆ L'acquisition

Cette fonction est assurée par le réseau de capteurs et d'organes de conditionnement, de numérisation, de communication et de mise en mémoire dont les différents schémas ont été présentés au paragraphe 3.4. Ces données peuvent prendre la forme de grandeurs électriques brutes (tension ou de courants) ou de grandeurs physiques, soit du fait que les coefficients de conversion tensions - grandeurs physiques ont été intégrés en aval de la numérisation, soit du fait de capteurs non linéaires (température par exemple) ou de mesures sur pont (de jauge) exigeant un conditionnement fournissant directement l'interprétation de la mesure.

◆ Le stockage des données brutes

Ces *données brutes* doivent faire l'objet d'un stockage soigneusement défini. Dès l'instant où l'on peut supposer que les processus de correction et d'analyse que vont subir ces données ne sont pas définitivement fixés, il convient de stocker intégralement ces données brutes sur un support de pérennité compatible avec les échéances envisageables de remise en cause des traitements. Dans l'état actuel des technologies, le volume de stockage intégral des données peut être d'un coût excessif. La technologie la plus fiable actuellement est le stockage sur bandes magnétiques informatiques à condition que ces bandes soient gérées par un centre de traitement informatique avec toutes les précautions d'usage (climatisation, protection incendie, maintenance). L'expérience actuelle montre cependant qu'un stockage Compact Disks est pertinent sur une durée annuelle.

Ce stockage de long terme sur le site n'est pas souhaitable. C'est donc une sous-fonction de l'exploitation des données de la télésurveillance. Il faut donc définir le *volume de stockage intermédiaire sur site* des données brutes et la *périodicité de téléchargement des données brutes* par le poste de télégestion.

◆ Le traitement de gestion de la télésurveillance

On désigne ici l'ensemble des traitements automatiques nécessaires à la surveillance de franchissement des seuils et au déclenchement des alertes et alarmes. Il consiste à transformer les valeurs brutes prises par les grandeurs physiques en valeurs interprétables par le gestionnaire de l'ouvrage. Il comporte généralement différentes étapes :

- ▶ La validation des mesures qui a pour objet de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesures. Ceci peut être réalisé par comparaison avec des mesures précédentes (application de la moyenne glissante, etc.), par comparaison de capteurs entre eux, ou par comparaison avec des valeurs fournies par des capteurs de référence évoqués au paragraphe 3.3 (détection de dérive dans le temps). C'est, pour l'essentiel, ce que l'on appelle l'analyse qualitative des données.
- ▶ Le traitement proprement dit qui consiste à réaliser des corrections sur les mesures (corrections thermiques ou hygrométriques, etc.) à effectuer des combinaisons ou des corrélations entre différentes grandeurs, des traitements statistiques, des calculs de vitesse ou d'accélération, etc. (le contenu de cette phase est très dépendant du problème de surveillance posé). Pour parvenir à la définition de ces traitements automatisés, il faut bien passer par la phase d'analyse quantitative des données, tâche plus lourde dans la phase d'apprentissage.
- ▶ Le stockage et l'édition des valeurs traitées.
- ▶ La transmission des valeurs traitées à destination du centre de surveillance.

Dans la phase d'apprentissage, ces traitements sont simplifiés, les seuils étant nécessairement peu élaborés et les corrélations entre grandeurs mesurées n'étant pas possible. Dans la phase de télésurveillance courante après la phase d'apprentissage, les traitements sont fixés et peuvent être optimisés périodiquement si nécessaire. Corrélativement, le stockage des données brutes peut être également différent, la phase d'apprentissage étant plus exigeante que la phase courante ; il est même souvent d'usage, lors de la phase courante, de supprimer sur site les données brutes au-delà d'une période de temps donnée pour ne garder en mémoire que les données traitées, ces dernières étant ensuite régulièrement transférées au centre de surveillance pour retrouver de la mémoire sur site.

◆ Le traitement de surveillance et de maintenance de la télésurveillance

La télésurveillance évolue dans le long terme et l'analyse du comportement de l'ouvrage doit être périodique pour vérifier :

- ▶ si le comportement - vu à travers les grandeurs physiques mesurées - ne dérive pas lentement par rapport au modèle de comportement établi dans la période d'apprentissage. La maîtrise d'œuvre de la télésurveillance reprend l'analyse qualitative et quantitative des données pour adapter les modèles de comportement, puis adapter les seuils de déclenchement des alertes et alarmes qui, en principe, deviennent alors des seuils « fixes ». Éventuellement, il pourra être conduit à reconsidérer le diagnostic initial qui a permis de décider la mise sous haute surveillance de l'ouvrage,
- ▶ si l'opération de télésurveillance peut être simplifiée (ou doit être redimensionnée) au cours du temps, car les coûts de maintenance sont liés à la complexité de l'instrumentation et notamment au nombre des capteurs installés.

Il est donc nécessaire de définir une périodicité de ces examens critiques des données de la télésurveillance et des comptes rendu de la maîtrise d'œuvre de l'opération de télésurveillance au maître de l'ouvrage, voire la consultation du comité d'experts dans les cas difficiles.

4.2 Analyse des données

Le très grand nombre de valeurs à enregistrer et à stocker sur une longue période de temps pose, dès le départ d'une surveillance métrologique d'ouvrage, le problème du choix de la *méthode d'exploitation* des données et celui des *modèles explicatifs* et *prévisionnels* qui seront validés dès les premiers mois d'acquisition à partir des *données dites d'apprentissage*. De façon générale, on distingue :

- ▶ l'analyse qualitative des mesures qui permet de faire une analyse graphique critique, comportementale et exploratoire des données ;
- ▶ l'analyse quantitative qui peut se faire à partir d'un modèle mécanique ou à partir d'un modèle statistique utilisant uniquement les données issues des mesures.

Ces deux approches sont nécessairement complémentaires.

4.2.1 Analyse qualitative des données

Avant de construire des modèles explicatifs, il est recommandé d'observer les phénomènes mesurés pendant les premiers temps. Il s'agit, en observant graphiquement les variations des mesures, de valider les séries de données en repérant leur stabilité et leur cohérence dans le temps :

- ▶ le repérage d'instabilités ou d'anomalies métrologiques différenciées de celles résultant du comportement supposé de la structure doit être possible sous peine de rendre caduque la télésurveillance. Ce dernier point est d'ailleurs très important car, contrairement à ce qui est généralement admis, une télésurveillance se surveille et se contrôle en continu de façon externe, même si des automatismes de veille, de garde et d'alerte existent ;
- ▶ le repérage des points atypiques doit être effectué. S'ils sont présents dès les premières données d'apprentissage, on peut s'assurer de l'atypisme de ces points par le fait qu'ils sont « hors échelle » physique du fonctionnement de l'ouvrage compte tenu de son expertise. S'ils sont présents après l'acquisition d'un nombre suffisant de données (apprentissage), des analyses statistiques spécifiques (méthode des « boîtes à moustaches » par exemple) permettent de confirmer ou non l'analyse faite du point de vue strictement de génie civil ;
- ▶ le repérage des variations saisonnières, des pics d'été et d'hiver, des tendances, sera aussi réalisé de façon graphique. Ces phénomènes sont observables par nature après un certain nombre de mois, après lesquels, les données, alors en nombre suffisant, permettent l'utilisation de méthodes statistiques pour confirmer cette première approche visuelle ;
- ▶ le repérage des couplages des variations entre les grandeurs à expliquer et les grandeurs explicatives (potentiellement explicatives pendant la phase d'apprentissage) permet de comprendre comment fonctionne la structure au cours du temps ;
- ▶ le repérage des couplages éventuels entre des grandeurs à expliquer et des interactions entre grandeurs explicatives (par exemple l'interaction entre niveau d'eau et température). Cette étude n'est pas toujours facile à faire à partir de l'observation des seuls graphiques. Il est souvent plus aisé de préciser ce dernier point dans les analyses quantitatives.

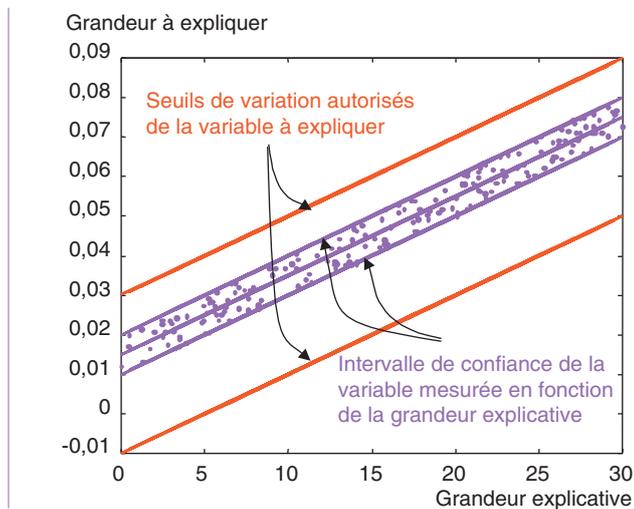
Cette première étape qualitative a également pour fonction de valider plus ou moins complètement les choix de l'instrumentation réalisée et induit d'éventuelles modifications du programme avant le démarrage proprement dit de la haute surveillance.

4.2.2 Analyse quantitative des données - Choix du modèle explicatif et prévisionnel [4]

L'analyse quantitative des données vise à fournir différentes formes de *courbes de surveillance*. Ces courbes de surveillance doivent permettre de positionner chacune des mesures des grandeurs traduisant le comportement de l'ouvrage (grandeurs à expliquer) par rapport à des seuils de variations (Fig. 13). Du

fait que les valeurs mesurées sont à la fois porteuses des incertitudes de mesure et des influences des grandeurs d'influence (telles que la température et plus généralement des grandeurs explicatives), cette analyse quantitative doit permettre de rendre compte de ces deux influences. L'expertise doit permettre de définir, à partir des variations constatées au cours de la période d'apprentissage, les marges que l'on peut accepter par rapport aux variations constatées et qui entrent dans la définition des différents seuils.

■ FIGURE 13
EXEMPLE DE COURBE DE SURVEILLANCE.



Les lois qui définissent les courbes de surveillance sont les *modèles de variation* des grandeurs à expliquer. Il peut y avoir plusieurs démarches d'établissement des modèles en fonction de l'état de connaissance du comportement théorique et du comportement réel de l'ouvrage, en fonction de l'état de l'art de l'élaboration des modèles et en fonction de l'investissement que l'on veut faire en terme de complexité de modèle.

Le *modèle explicatif et prévisionnel* peut être construit :

- ▶ soit à partir d'un *modèle mécanique* fondé sur des hypothèses et leurs incertitudes,
- ▶ soit à partir d'un *modèle statistique* uniquement fondé sur les données issues des télémesures.

Ces deux démarches sont complémentaires car, lorsque les données d'apprentissage seront assez nombreuses, celles-ci devront être confrontées aux résultats du modèle mécanique de la structure, pour comprendre son comportement. Elles sont également complémentaires dans le temps, dans la mesure où les différentes étapes d'analyse de l'ouvrage - diagnostic préalable et hypothèses de comportement, essais de chargement, acquisition de données d'apprentissage puis suivi opérationnel - permettent d'élaborer progressivement ces deux types de modèles qui se valident et se complètent, voire peuvent être fusionnés. Cependant, dans la majorité des cas, il est fait appel à l'un des deux modèles seulement.

4.2.2.1 Les modèles mécaniques

Les modèles mécaniques peuvent en particulier servir au tout début d'une télésurveillance pour déterminer les seuils à partir du modèle théorique de comportement de l'ouvrage (seuils de niveau 1 sur le schéma de synthèse présenté au paragraphe 2.10, puis être validés, si nécessaire, vis-à-vis des charges réglementaires (actions d'exploitation) par un essai de chargement.

Concernant les effets dépendant du temps (actions cycliques et éventuellement actions d'endommagement), une comparaison entre les deux modèles (mécanique et statistique) permet de s'assurer de la pertinence du modèle mécanique pendant la durée de la télésurveillance. Si ce modèle mécanique tient compte des phases de construction, des phénomènes différés à long terme, des pathologies, c'est-à-dire du passé, alors, peut-être, en effectuant un calage du modèle mécanique pendant la durée de la télésurveillance, pourra-t-on mieux prévoir son comportement dans le futur.

Une bonne modélisation mécanique de l'ouvrage doit permettre d'interpréter les mesures et de valider les modèles statistiques explicatifs à une ou plusieurs variables et vice versa.

Lorsque, dans un deuxième temps, les données issues des télémessures deviennent assez nombreuses, il devient possible de tenir compte dans la modélisation des effets temporels réels mesurés. De cette façon, la fusion d'une modélisation tenant compte du passé et de celle prenant en compte au plus près le fonctionnement réel de la structure au cours de la télésurveillance, permet à la fois d'assurer une télésurveillance de plus en plus performante et de mieux cerner le comportement futur de l'ouvrage.

Ceci montre qu'en matière de télésurveillance, l'apprentissage n'est pas borné dans le temps, même si une durée suffisamment longue est nécessaire au début pour que l'on puisse commencer à expliquer. Il faut continuer à observer et à apprendre pendant toute la télésurveillance afin de mieux cerner la réalité du fonctionnement de la structure.

Une bonne modélisation mécanique doit représenter de façon satisfaisante la physique du phénomène et tenir compte des incertitudes sur les données introduites dans le code de calcul. Un calcul mécano-fiabiliste qui associe une procédure de calcul mécanique et une procédure de calcul fiabiliste peut répondre à ce problème.

La précision de la modélisation et donc des moyens d'investigation et de calculs dépendront de la structure et de l'enjeu du risque encouru. Différents niveaux de calcul sont possibles ([1], [2] et [3]). Le tableau IV est construit à partir du texte du paragraphe 3.2 du document référencé [2].

TABLEAU IV - DIFFÉRENTS NIVEAUX DE CALCUL

Niveau	Méthode de dimensionnement	Sollicitations Actions Résistances	Coefficient de sécurité	Utilisation
0	Déterministe	Valeurs déterminées à partir d'expertise	Golbal déterminé	Justifié par retour d'expérience ou lorsque l'évaluation de la fiabilité est impossible
1	Semi-probabiliste	Valeurs représentatives issues de la statistique	Coefficients partiels	Niveau le plus utilisé
2	Probabiliste	Mise en œuvre partielle des méthodes probabilistes		Calibrage des coefficients partiels
3	Probabiliste complète	Mise en œuvre complète des méthodes probabilistes		Inaccessible dans la plupart des situations

Le modèle mécanique peut devenir, après arrêt de la télémessure, un modèle de surveillance à très long terme, servant de référence à des mesures faites ponctuellement au cours d'une surveillance renforcée qui se poursuivrait après la haute surveillance (cas d'un ouvrage réparé que l'on souhaite continuer à suivre).

4.2.2.2 Les modèles statistiques

Dans ce cas, seules les distributions statistiques des mesures chronologiques seront prises en compte, sans faire d'hypothèse sur la structure. De façon générale, il existe deux types de méthodes : les méthodes dites *endogènes*, et les méthodes *exogènes* utilisant les régressions, linéaires ou non.

Les *méthodes endogènes*, pour des *variables continues* du type série chronologique dont les variations sont mesurées quasiment en continu, consistent à utiliser uniquement l'historique de la variable à expliquer pour faire de la prévision. Parmi ces méthodes, on peut en citer trois : la moyenne mobile, le

lissage exponentiel, la méthode de Box et Jenkins. Ces méthodes sont employées en fonction du nombre de valeurs dans les séries chronologiques et de leur stabilité.

Une analyse plus simple peut être réalisée à partir de l'analyse des vitesses et des accélérations des variations des mesures, mais ceci suppose que le fonctionnement de la structure ne dépende à aucun moment d'actions extérieures du type cyclique. Cela pourrait être le cas de structures dont les actions d'exploitations et environnementales seraient constantes comme par exemple certains bâtiments et certains sites géotechniques non sensibles à l'eau. Dans ces cas, le seul paramètre explicatif mesuré est le temps.

Il faut souligner que cette situation se présente assez rarement dans le domaine des ouvrages d'art car on peut et on doit souvent mesurer une variable explicative dépendant bien sûr du temps, mais mesurée à partir d'une autre grandeur que le temps (par exemple, les températures).

Pour des variables discontinues ou événementielles (rupture de fils ou de câbles par exemple) non liées dans le processus à une autre variable potentiellement explicative autre que le temps, différentes techniques d'analyse et de comptage d'événements sont possibles (cf. paragraphe 5.5).

Les méthodes exogènes, consistent à construire un modèle reliant les mesures des variables à expliquer à celles des variables explicatives. Il s'agit donc de construire un modèle causal de la série à expliquer. L'outil de base de ces méthodes exogènes est la *régression linéaire*, éventuellement multilinéaire si plusieurs variables mesurables peuvent influencer la variable à expliquer.

Le modèle explicatif dans le cas d'une seule variable explicative peut s'écrire :

$$Y(t) = \alpha_0 + \alpha_1.X(t) + \varepsilon(t)$$

avec :

Y(t) : variable à expliquer (par exemple, variations des ouvertures de fissures,

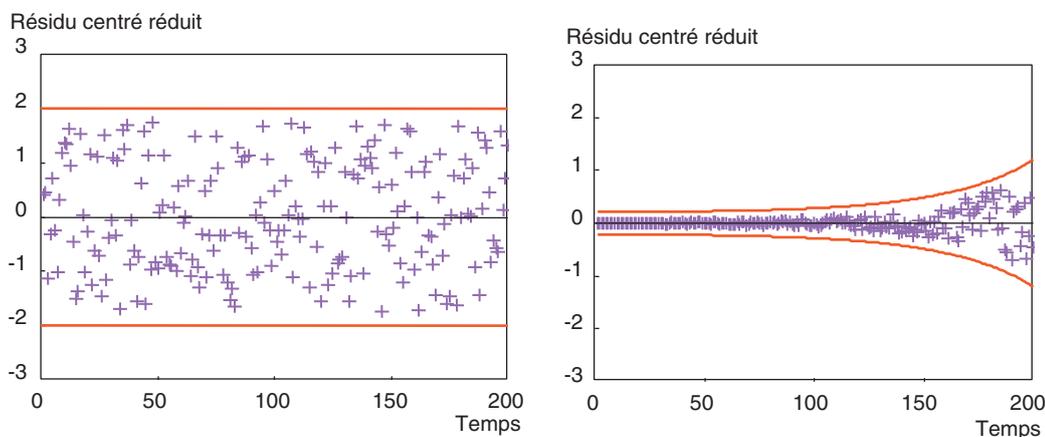
X(t) : variable choisie comme pouvant être potentiellement explicative des variations temporelles de Y (par exemple, sur les ouvrages, une valeur du champ thermique soigneusement repérée dans l'analyse qualitative préliminaire),

$\varepsilon(t)$: résidu de la régression, i.e. la part non expliquée par la variable explicative retenue.

α_0, α_1 : paramètres d'ajustement issus de la régression et à valider statistiquement.

Pour que le modèle statistique explicatif soit satisfaisant il convient que le résidu - part non expliquée par la variable explicative - soit une variable aléatoire ; en outre, ce résidu doit être analysé structurellement et statistiquement :

- ▶ un test de χ^2 montre que le résidu est bien une variable aléatoire de loi normale,
- ▶ les variations temporelles du résidu centré réduit devraient rester comprises entre + 2 et - 2,
- ▶ le résidu centré réduit ne doit pas présenter de tendance ou d'effet de structure statistique (Fig. 14).



■ FIGURE 14 - ANALYSE DES RÉSIDUS : À GAUCHE, LA DISTRIBUTION DES RÉSIDUS EST SANS EFFET DE STRUCTURE. LE MODÈLE PARAÎT CORRECT. À DROITE, IL DEMEURE UN EFFET DE STRUCTURE DANS LE MODÈLE : ESSAYER UNE RELATION DE TYPE $y = e^{ax}$.

Dans le cas contraire, le modèle peut être à améliorer en gardant les mêmes variables (modèle non linéaire par exemple), ou bien certaines variables explicatives n'ont pas été prises en compte, avec la possibilité que l'une d'elles corresponde alors aux variations des variables d'endommagement. Dans ce cas, le résidu devient lui-même une variable d'endommagement qu'il s'agit de surveiller avec les méthodes endogènes citées plus haut, en particulier en suivant l'évolution des vitesses et accélérations des résidus des régressions, on suit du même coup celles de l'endommagement.

Rappel important : En matière de surveillance d'ouvrage, on a toujours intérêt à mesurer dès le départ, toutes les variables extérieures cycliques pouvant agir sur le fonctionnement de l'ouvrage. Ceci permet de ramener les données et les graphiques de surveillance à des valeurs et à des courbes d'évolution « à conditions constantes » en température, à niveau d'eau, etc., ce qui revient à « désaisonnaliser » en partie les mesures. Mais il est évident que ceci est souvent un problème difficile et que l'on n'arrive pas toujours à « désaisonnaliser » complètement les mesures acquises.

4.3 Méthodes d'établissement des seuils

4.3.1 Chronologie de l'établissement de seuils

Dès la mise en place de l'instrumentation, une première approche de la valeur des seuils d'alertes et d'alarmes devrait être établie. Puisque les données d'apprentissage ne sont pas encore disponibles, on devra s'appuyer sur les seules informations disponibles : le calcul réalisé dans la phase préliminaire, le retour d'expériences antérieures, et la conviction collective d'experts.

Ces valeurs peuvent être ensuite ajustées en réalisant, par exemple, des essais sous charges réglementaires, lorsqu'un accroissement de charge est représentatif de l'endommagement qui affecte la structure.

Enfin, lorsque les données d'apprentissage seront assez nombreuses pour valider des modèles statistiques, les seuils pourront être *a posteriori* ajustés vis-à-vis des phénomènes temporels réels.

Les valeurs des seuils seront d'autant plus efficaces et robustes qu'elles seront expurgées des influences thermiques ou de toutes autres influences saisonnières réversibles et sans caractère d'endommagement pour la structure (température, niveau d'eau, etc.).

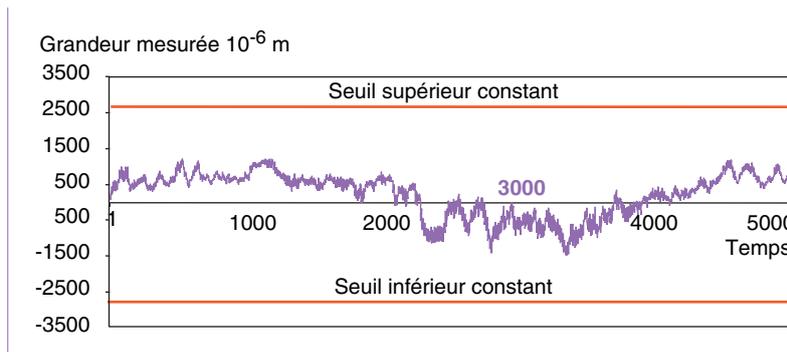
4.3.2 Seuils fixés *a priori* sur les variations des grandeurs brutes (sécurité *a priori*)

4.3.2.1 Détermination de valeurs discrètes de seuil

Ces valeurs sont déterminées à partir d'un calcul ou de toute autre approche, y compris celle d'une conviction collégiale du Comité de suivi. Dans les cas appropriés, des essais de chargement adaptés à la pathologie (et respectant le fascicule 61 titre II, épreuve d'OA) permettent par la suite de caler les deux bornes supérieure et inférieure correspondantes par rapport aux sollicitations maxima et minima d'une même section, ce qui permet de donner aux valeurs de seuils une plus grande robustesse.

Pour la détermination des seuils discrets *a priori*, voire après essais de chargement, il est nécessaire de ne pas oublier d'estimer les effets des variations thermiques qui viendront s'ajouter aux effets du chargement au cours de la télésurveillance (Fig. 15).

■ FIGURE 15
VARIATION DE LA GRANDEUR
PHYSIQUE BORNÉE PAR DEUX SEUILS
DISCRETS.



◆ Détermination à partir de tendance

Si aucune méthode, aucun retour d'expérience ou aucune conviction collégiale ne peut assurer la détermination de valeurs de seuils discrets (c'est le cas quelquefois dans les premiers temps d'une télésurveillance), des seuils peuvent être établis progressivement, sur des tendances.

Ainsi, une accélération d'une grandeur continue ou celle d'un comptage de valeurs discrètes, peut être un indicateur d'alarme.

Cela suppose que les paramètres à expliquer mesurés au cours du temps soient indépendants de toute autre action que celles supposées d'endommagement. Ce cas de figure se rencontre peu dans le domaine des ouvrages d'art, cependant, pour des problèmes d'interface sol-structure, on pourra utilement se référer aux méthodes qui ont été mises au point, dans le domaine de la géotechnique [7]. Le transfert de ces démarches à la structure reste à valider dans la mesure où l'amplitude des mesures est en règle générale plus faible et les vitesses d'évolution plus rapides qu'en géotechnique.

PAGE

46

4.3.3 Seuils fixés à partir des mesures d'apprentissage (sécurité *a posteriori*)

Il s'agit de valeurs *a posteriori* car déterminées après mesures d'apprentissage. L'apprentissage devra être confronté *a posteriori* aux résultats d'un modèle mécanique pour comprendre le comportement de la structure. La confrontation consiste à comparer le modèle (mécanique et/ou statistique) à la mesure pendant toute la durée de la télésurveillance et à voir en quoi ce modèle, constamment validé, peut aider à expliquer l'actuel et à prévoir le futur.

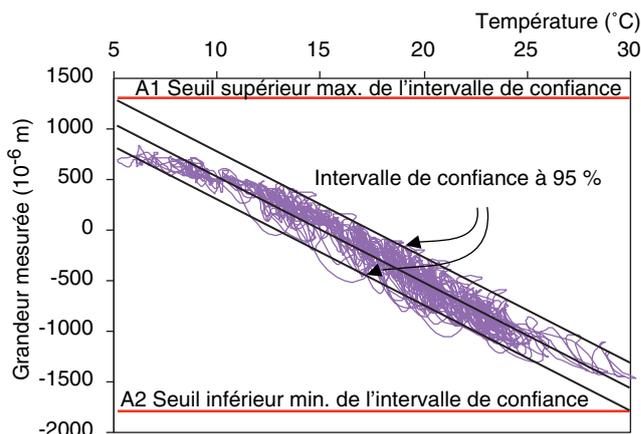
4.3.3.1 Seuils fixés à partir des mesures d'apprentissage brutes

On recherche des modèles - linéaires de préférence - permettant un bon ajustement de chaque grandeur physique mesurée à expliquer par les variables potentiellement explicatives. Si le modèle est validé statistiquement, on peut alors s'en servir comme modèle de surveillance pour toute valeur future de la variable explicative appartenant au domaine de la période d'apprentissage (interpolation). Dans ce cas, deux façons de déterminer les seuils sont possibles :

◆ Seuils fixes enveloppes

On détermine des seuils fixes comme décrits au paragraphe précédent, mais dont la valeur est plus ou moins déterminée par des réalités mesurées.

Dans le cas où l'influence de la variable explicative (température par exemple) intervient, mais avec une amplitude faible par rapport aux valeurs de seuils que la réflexion en terme de génie civil peut accepter, on peut se contenter de limiter les variations aux valeurs enveloppes déterminées à partir de l'intervalle de confiance à 95 % sur les prédictions majorées d'une certaine incertitude (Fig. 16).



■ **FIGURE 16**
 FIXATION DES SEUILS
 POUR UNE GRANDEUR SUR LAQUELLE
 LES VARIABLES D'ENVIRONNEMENT ONT
 UNE INFLUENCE FAIBLE.

Les seuils doivent tenir compte principalement des variabilités de la variable explicative mais aussi de tous les autres effets aléatoires (imprécision de la mesure, effets du trafic, etc.). Ces seuils peuvent être estimés :

- ▶ à partir des données d'apprentissage qui ne couvrent éventuellement pas encore les variations saisonnières. Il y a donc une prise de risque au niveau de l'extrapolation du modèle. Dans ce cas, une surveillance très serrée de la télésurveillance est impérative afin de valider ou de modifier le modèle de surveillance en suivant l'accroissement de la connaissance du comportement de l'ouvrage ;
- ▶ après une période d'acquisition assez longue, représentative des variations saisonnières. Le modèle de surveillance devient de plus en plus robuste car il est représentatif d'une plage de variation plus grande de la variable explicative.

◆ **Seuils variables, paramétrés en continu à une variable explicative**

Lorsqu'un modèle variable explicative - variable à expliquer à été établi de manière suffisamment robuste, il est pratique de savoir tout de suite si la *valeur de la grandeur à expliquer est acceptable* compte tenu :

- ▶ de la grandeur d'influence,
- ▶ des fluctuations non expliquées (résidus du modèle),
- ▶ d'une marge acceptable en terme de génie civil compte tenu des analyses issues de l'expérience et de l'avis d'expert.

Si le modèle numérique préétabli pendant une période d'apprentissage est de la forme :

$$Y(t) = \alpha_0 + \alpha_1.X(t) + \varepsilon(t)$$

il est possible de calculer $Y1(t)$ et $Y2(t)$, les limites à chaque instant de l'intervalle de confiance, soit :

$$Y1(t) = \alpha_0 + \alpha_1.X(t) + \text{marge} \text{ et } Y2(t) = \alpha_0 + \alpha_1.X(t) - \text{marge}$$

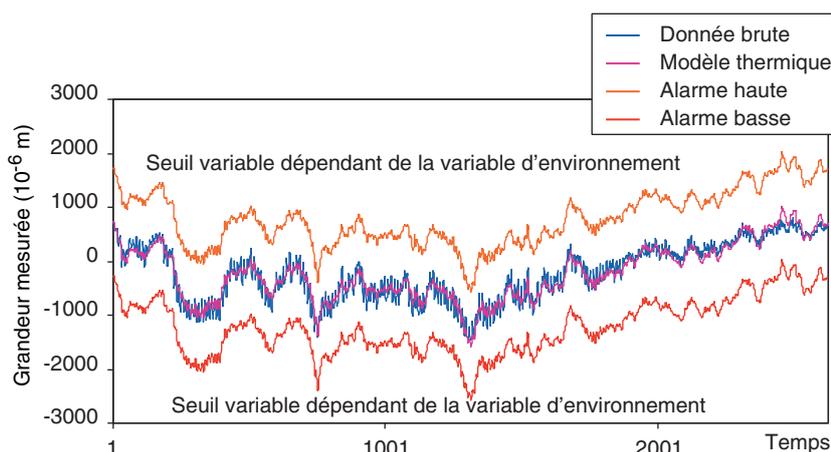
dans lesquelles le terme « marge » est la plus grande variation acceptable de la grandeur à expliquer par rapport au modèle. Cette marge doit être établie à partir :

- ▶ des plus grandes variations du résidu,
- ▶ de la connaissance acquise au cours de l'expertise préalable et des essais de chargement,
- ▶ de l'expérience acquise dans les opérations de surveillance renforcée ou de haute surveillance antérieures,
- ▶ et surtout de l'avis du Comité technique de l'opération de haute surveillance.

Vu l'enjeu de sécurité des usagers de l'ouvrage et la nécessité d'éviter les alarmes intempestives, la fixation de ces marges doit retenir la plus grande attention et doit faire jouer au maximum la collégialité.

Les valeurs $Y1(t)$ et $Y2(t)$ (courbes orange et rouge sur la figure 17) sont donc les valeurs limites de la variable expurgée des variations d'environnement et des fluctuations aléatoires.

■ **FIGURE 17**
 EXEMPLE DE FUSEAU
 DE SURVEILLANCE PARAMÉTRÉ
 À UNE VARIABLE
 D'ENVIRONNEMENT
 (TEMPÉRATURE, NIVEAU D'EAU
 DANS LA NAPPE OU DANS LA
 RIVIÈRE, ETC.).



À l'aide des fonctions de télégestion des équipements installés sur l'ouvrage, les coefficients a_0 , a_1 , ε sont paramétrables à distance. Ainsi, tous les trois mois par exemple, après un complément de consolidation temporelle des données et éventuellement un élargissement du champ thermique permettant des interpolations élargies, il est possible d'ajuster le modèle en donnant de nouvelles valeurs à ces coefficients. Cela n'a d'intérêt que si les valeurs sont significativement différentes.

4.3.3.2 Seuils fixés à partir des mesures d'apprentissage expurgées des variations saisonnières (seuils sur les résidus)

Au lieu d'observer la variable à expliquer (variable traduisant l'endommagement de l'ouvrage), on peut n'observer que les résidus de l'ajustement de la variable à expliquer sur la variable explicative. Valider le modèle numérique a consisté à vérifier que les résidus constituaient bien une variable aléatoire, indépendante de la grandeur explicative. Les résidus ne doivent donc pas dépendre du temps.

L'observation des résidus dans le temps et l'observation de leur évolution met donc en évidence formellement les phénomènes irréversibles, éventuellement dommageables pour l'ouvrage. Tout changement de variations temporelles de structures des résidus (cf. Fig. 14) peut être un indicateur pour déterminer des seuils d'alertes et d'alarmes.

Ainsi une évolution temporelle des résidus présentant une *tendance linéaire* traduit probablement un endommagement progressif constant dans le temps qu'il convient d'identifier. Cependant la linéarité du phénomène lui confère un caractère *prévisible* : il convient de surveiller l'évolution du phénomène, notamment la pérennité du caractère d'évolution linéaire du résidu mais on peut évaluer le temps qu'il reste avant de franchir les seuils.

En revanche, une *tendance non linéaire avec accélération* du phénomène doit déclencher une alarme : cela signifie en particulier que le modèle de suivi n'est pas ou plus valide et surtout, comme il est difficile de définir rapidement le modèle sur la base d'un nombre limité d'observations, le phénomène devient moins prévisible qu'en présence d'une tendance linéaire. Cela peut signifier que l'endommagement s'accélère, par exemple des ruptures partielles fragilisant progressivement la structure et pouvant aboutir à une rupture totale. Il convient alors de :

- ▶ déterminer les réserves de résistance de la structure par rapport à la rupture potentielle totale et le temps de mobilisation possible de ces réserves à partir du changement de fonctionnement. Ceci est rarement possible par manque de connaissance et de pratique suffisante dans le domaine du comportement des structures tel que couvert dans ce guide ;
- ▶ s'assurer à nouveau du caractère ductile, c'est-à-dire essentiellement à la fois l'existence de redondance structurale et de relais possibles en cas de perte de liaisons internes dans la structure ;

► renforcer, même provisoirement en cours de télésurveillance, une partie fragile de la structure pour aussi se donner du temps pour continuer l'opération. En effet, renforcer la ductilité, c'est donc aussi prolonger le temps observable en terme de cinématique de processus mesurable, c'est-à-dire être capable de répondre à temps avant rupture.

Le tableau V montre que le changement comportemental des résidus peut servir à la mise en place de seuils. Dans la pratique, les choses sont parfois plus complexes, car selon l'ouvrage et ses endommagements expertisés, le passage d'une situation de stabilité des résidus à celle d'un début de d'accélération peut déjà révéler un phénomène d'épuisement proche de la rupture nécessitant le déclenchement d'une alarme.

TABLEAU V - RÈGLES DE DÉCLENCHEMENT D'ALERTE ET D'ALARME SUR LA BASE DE L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DES RÉSIDUS

Type de structure des résidus	Pas de structure des résidus, ou structure des résidus cyclique admissible	Vitesse constante avec le temps	Accélération avec le temps
Déclenchement des seuils	Pas de déclenchement, fonctionnement normal	Déclenchement de l'alerte ou de l'alarme	Déclenchement de l'alarme

Ceci montre l'extrême importance des expertises et analyses permettant d'avoir une bonne approximation des modes de rupture et des réserves par rapport à celle-ci. Les analyses mécano-fiabilistes devraient permettre de faire des progrès en la matière.

Chapitre 5

Exemples d'application des principes de ce guide à différents types d'ouvrage

5.1 Télésurveillance d'un pont à voussoirs en béton précontraint

<p>Type de structure</p>	 <p>FIGURE 18 PONT À VOUSOIRS PRÉCONTRAIT CONSTRUIT PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS.</p>
<p>Problématique et contexte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Une inspection détaillée révèle des décompressions apparentes dans les joints du voussoir de clé de la travée centrale partiellement confirmées par un calcul réglementaire. <p>Dans l'attente d'une nouvelle utilisation de cet ouvrage, le gestionnaire souhaite mettre l'ouvrage sous surveillance renforcée afin d'identifier les effets réels des actions du trafic, des températures et d'éventuelles pertes de précontraintes.</p>
<p>1er Principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effets thermiques. <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENTS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peut être les effets du trafic avec fatigue des armatures au droit des joints ? Peut être la perte progressive de précontrainte ?
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul réglementaire en appliquant le fascicule 61 titre 2 avec un gradient forfaitaire non pris en compte à la construction. • Essais de chargement avec la méthode des moments de décompression et mesures des surtensions éventuelles des câbles. <p>Conclusion : Les essais montrent une légère décompression des joints sous moment maximum des charges avec aucun risque de fatigue sur les câbles.</p> <p>→ Ouvrage ayant conservé un caractère ductile.</p>

SUITE

<p>3e principe Définition des paramètres</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variations des ouvertures de deux joints du voussoir de clé. • Variations des déformations concomitantes aux variations d'ouverture des joints (déformations sur béton et sur câbles). <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variations thermiques dans l'ouvrage.
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<p>Les mêmes que celles équipées sous les charges d'essais ; les deux joints du voussoir de clé.</p>
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<p>3 capteurs de déplacement par joint,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Au droit de chaque capteur de déplacement, deux jauges de déformation béton (RD et RG) et 2 jauges métal sur torons d'un câble. • Dans zone béton non sollicitée, une jauge de référence et à côté des jauges sur câbles, une jauge métal de référence collée sur morceau de câble inerte. • Un profil vertical de sondes platines pour mesurer les températures.
<p>Protocole de surveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Observer les variations des mesures le lundi et le vendredi pour vérifier le bon couplage entre elles et l'absence de phénomènes irréversibles. <p>Début de chaque mois, envoi au gestionnaire des tracés des variations des mesures avec commentaires.</p>
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Pas de seuils formels établis car régime de surveillance renforcée.</p>
<p>Bilan de la télésurveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comparaison des variations dynamiques en temps réel sous l'action du trafic réel avec les variations mesurées sous chargement d'essais réglementaires. <p>Le trafic réel étant nettement moins sollicitant que les charges réglementaires à régime thermique comparable et les mesures statiques réalisées toutes les deux heures, jour et nuit n'ayant pas montré de phénomènes irréversibles, <i>la décision a été prise de conserver l'ouvrage dans l'état, en effectuant dans cinq ans un nouveau chargement réglementaire si l'ouvrage était toujours dans le même cadre d'utilisation.</i></p>

Remarques

On pourrait aussi imaginer au cours d'une télésurveillance d'ajouter deux autres types de vérification :

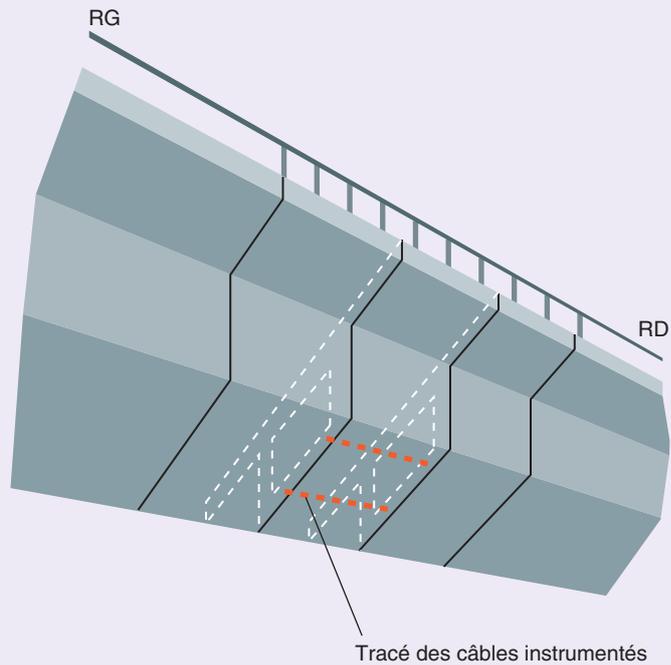
◆ **Sous l'action d'une charge contrôlée roulante au cours du temps**

Pendant des périodes de températures optimales et intermédiaires, faire passer le plus lentement possible (la nuit par exemple) une charge routière parfaitement contrôlée, constante et sollicitant suffisamment l'ouvrage pour que son action puisse être mesurée. L'objectif est de vérifier pendant quelques cycles saisonniers, la constance des sollicitations sous la même action de charge, à des temps différents, pour le même régime thermique qu'il soit très chaud ou très froid. Ceci implique que le système d'acquisition et de transfert de données soit suffisamment dynamique pour pouvoir récupérer le maximum réel et éventuellement les lignes d'influence réelles.

◆ **Sous l'action de convois exceptionnels**

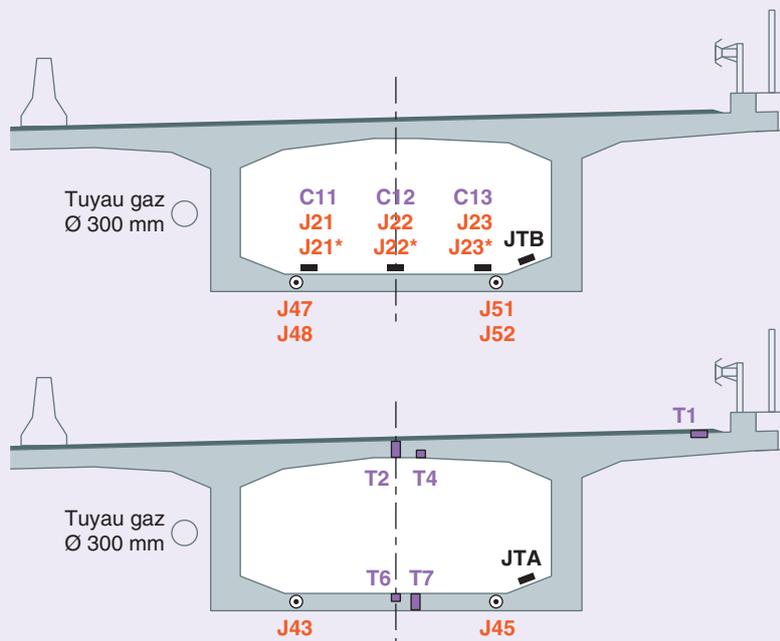
Un autre cas de chargement moins maîtrisable est néanmoins intéressant, c'est celui plus opportuniste des convois exceptionnels. Il demande de la méthode et une bonne organisation entre le mesureur, le gestionnaire et le chauffeur du convoi (Fig. 19, Fig. 20).

SUITE



■ FIGURE 19

INSTRUMENTATION GÉNÉRALE
DES DEUX JOINTS DU VOUSOIR.



■ FIGURE 20

INSTRUMENTATION DÉTAILLÉE
DES JOINTS DE VOUSOIRS.

Capteurs de température

T1 : contact enrobé-béton
T2 : -19 cm intrados hourdis
T4 : -3 cm intrados hourdis
T6 : 11 cm / extrados

Jauges de déformation

J43 : jauge de déformation sur un toron aval
J45 : jauge de déformation sur un toron amont
J47 - J48 : jauge de déformation sur un toron aval
J51 - J52 : jauge de déformation sur un toron amont
JTB : jauge de déformation de référence sur le béton

5.2 Télésurveillance d'un pont multi-arches en maçonnerie *

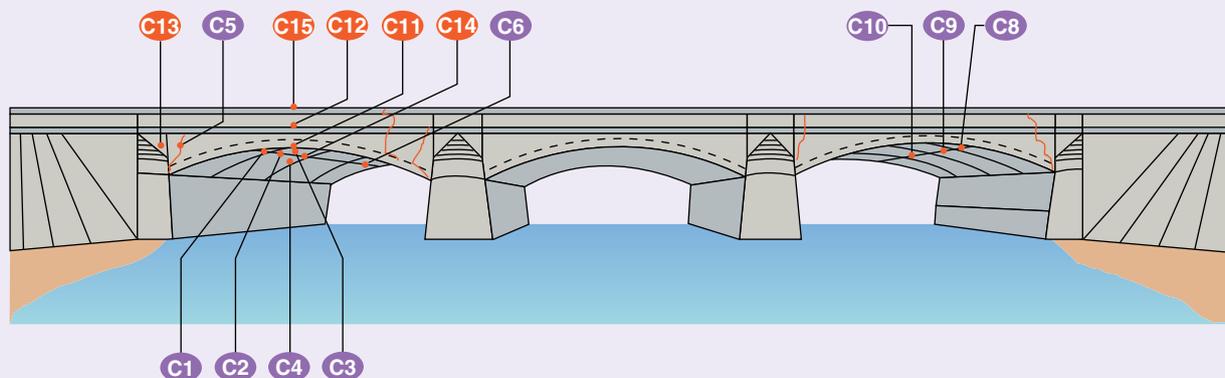
<p>Type de structure</p>	<p>FIGURE 21 PONT À TROIS VOÛTES SURBAISSÉES REPOSANT SUR DES FONDATIONS PROFONDES (PIEUX RODIO).</p> 
<p>Problématique et contexte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Une inspection détaillée met en évidence d'importantes décompressions des joints de rupture aux naissances sur une arche de rive. • Deux questions se posaient au gestionnaire : <ul style="list-style-type: none"> - Sécurité immédiate vis-à-vis d'un trafic important de poids lourds ? - Comment allait évoluer cette sécurité au cours du temps ?
<p>1er Principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effets thermiques. • Effets des variations du niveau de la rivière. <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peut être l'effet de diminution de butée de la culée ? • Peut être les effets du trafic ?
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<p>Une expertise complète des fondations (absence de risque d'affouillements), un calcul réglementaire de celles-ci et du corps de voûte et une reconnaissance endoscopique de l'étendue des décompressions des joints de rupture ont montré l'absence de risque de type fragile.</p> <p>Un renforcement de la résistance à l'effort tranchant aux naissances des culées fut toutefois décidé afin d'augmenter la ductilité de l'ouvrage.</p> <p>En revanche, il fallait s'assurer de l'absence de déplacements irréversibles de la culée et vérifier le fonctionnement des joints de rupture sous variations thermiques réelles et au cours du temps.</p>
<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Déplacement de la culée à partir des variations d'ouverture des joints de rupture des naissances et de clé. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effets thermiques (température moyenne). • Fluage des terres en butée derrière la culée.
<p>4e principe</p>	<p>Joints de rupture aux naissances et en clé de l'arche de rive endommagée et de l'arche de rive intacte servant de référence comportementale**.</p>
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Capteurs de déplacement sur les joints de rupture à l'intrados des clés et sur les tympans des naissances. • 1 capteur de référence à l'intrados et 1 sur tympans aux naissances dans des zones inertes des arches. <p>Profil de sondes platines de température.</p>

SUITE

Protocole de surveillance	<ul style="list-style-type: none"> Observer les variations des mesures le lundi et le vendredi pour vérifier le bon couplage entre elles et l'absence de phénomènes irréversibles. <p>Au début de chaque mois, envoi au gestionnaire des tracés des variations des mesures avec commentaires.</p>
5e principe Seuils d'alerte et d'alarme	Pas de seuils formels établis car régime de surveillance renforcée.
Bilan de la télésurveillance	<p>Les modèles linéaires explicatifs utilisés à partir des cinq ans de données en continu (toutes les deux heures) n'ont pas mis en évidence d'endommagement irréversible aux niveaux des joints de rupture.</p> <p>En conséquence, on a conclu à une stabilité spatiale et temporelle de la culée.</p> <p>En revanche, afin d'augmenter la sécurité à la rupture par effort tranchant, un renforcement par console à l'intrados a été effectué.</p> <p>En conclusion, la télésurveillance de cet ouvrage, précédé d'un diagnostic précis, a permis au gestionnaire de passer un cap difficile, puis de ramener l'ouvrage dans un cycle de surveillance ordinaire avec toutes les garanties nécessaires.</p>

* Cf. article Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées de décembre 2000, pp. 87-95.

** On aurait pu surveiller directement la culée et son influence sur les variations d'ouvertures des joints de rupture en mettant en place deux tubes inclinométriques. Mais deux difficultés se présentaient : le coût de forage et l'automatisation de l'inclinomètre. Dans le cas présenté, on part sur l'hypothèse que l'effet du déplacement de la culée sera quantifié à partir des ouvertures des joints de rupture non expliquées par les variations thermiques.



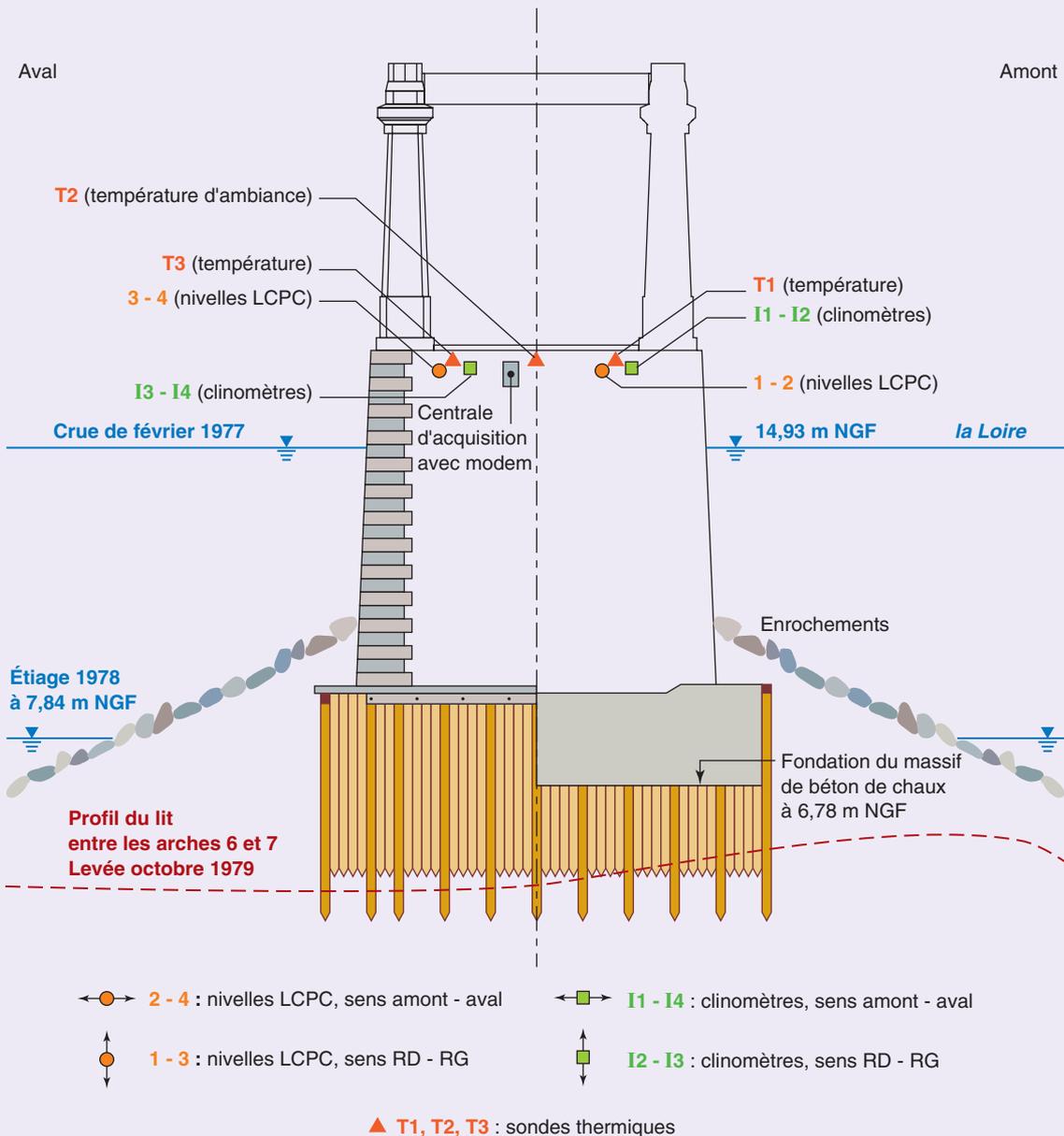
■ **FIGURE 22** - SCHÉMA D'IMPLANTATION DES CAPTEURS DE DÉPLACEMENT SUR JOINTS DE RUPTURE (C1 À C10) ET DES SONDES THERMIQUES (C11 À C15). LE CAPTEUR C7 EST UN CAPTEUR DE RÉFÉRENCE SITUÉ DANS UNE ZONE NON SOLlicitÉE DE LA VOÛTE RIVE GAUCHE.

5.3 Télésurveillance d'un appui d'un pont suspendu

<p>Type de structure</p>	<p>■ FIGURE 23 APPUI D'UN PONT SUSPENDU.</p> 
<p>Problématique et contexte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Une inspection détaillée met en évidence à la fois un dérèglement de la suspension et une non-verticalité d'un des portiques servant de pylône. • Ce portique était fondé sur un massif en maçonnerie, lui-même reposant sur un sol sableux avec une couche argileuse incluse. • Une inconnue subsistait, celle de la part de fluage final de la couche argileuse. <p>Il fut décidé de suivre les mouvements éventuels de ce portique pendant trois ans suivant des procédures de surveillance renforcée.</p>
<p>1er Principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau de la rivière qui déjauge les parties immergées et modifie les équilibres en jeu dans la structure complète. • Températures qui modifient les distances entre portiques et les points d'accrochage des câbles. <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT :</p> <p>Peut être un tassement différentiel de la fondation dû au fluage de la couche argileuse.</p>
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<p>On n'observe pas d'affaissement du milieu de la travée métallique, et tout risque d'affouillement autour des appuis est écarté.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La redondance des câbles aboutit à un faible taux de travail de ceux-ci. • Des investigations concernant les sols sont réalisées. <p>On conclut au caractère résiduel ductile de la structure dans son ensemble. Une limitation de charges est mise en place.</p>
<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variations de rotations du portique au cours du temps. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variations thermiques des câbles. • Variations du niveau d'eau de la rivière. <p>Interaction entre les deux actions.</p>
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tête hors d'eau du massif de fondation du portique. • Section courante d'un câble.
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures de variations de rotation du portique dans le sens d'écoulement de la rivière (2 clinomètres) et perpendiculairement dans le sens de la suspension (2 clinomètres). <p>Sur les câbles, des sondes platines de température.</p>

SUITE

<p>Protocole de surveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Observer les variations des mesures le lundi et le vendredi pour vérifier le bon couplage entre elles et l'absence de phénomènes irréversibles. <p>Au début de chaque mois, envoi au gestionnaire des tracés des variations des mesures avec commentaires.</p>
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Pas de seuils formels établis car régime de surveillance renforcée.</p>
<p>Bilan de la télésurveillance</p>	<p>Après trois ans de suivi en continu (toutes les deux heures) confirmation de l'existence d'un phénomène de tassement différentiel toujours actif.</p> <p>La décision de renforcer le massif et ses fondations est prise.</p> <p>Encadrement du massif à l'aide de palplanches et palpieux mis en place par fonçage hydraulique.</p> <p>Injections des matériaux du massif et du sol.</p> <p>La télésurveillance a été laissée active pendant ces travaux délicats, servant de contrôle et de conduite des travaux.</p>



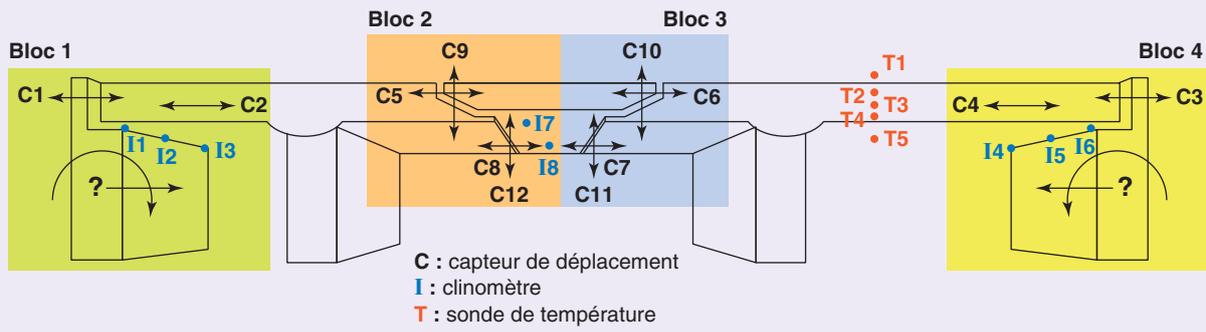
5.4 Télésurveillance d'un pont cantilever en béton armé

<p>Type de structure</p>	 <p>FIGURE 25 PONT EN BÉTON ARMÉ AVEC TRAVÉE CENTRALE EN CANTILEVER. CULÉES COMPOSÉES DE SIX POTEAUX-PIEUX ET MUR DE FRONT.</p>
<p>Problématique et contexte</p>	<p>Une inspection détaillée met en évidence des fracturations importantes sur les poteaux de rive d'une des culées.</p> <p>Cela laisse supposer un début d'instabilité de ces poteaux.</p> <p>Le gestionnaire souhaitait conserver cet ouvrage dans l'état, son remplacement par un ouvrage neuf étant programmé à moyen terme (3 à 4ans).</p> <p>L'ouvrage pouvait-il être mis sous haute surveillance ?</p>
<p>1er Principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Effets thermiques. ● Niveau de la rivière qui déjauge les parties immergées et modifie les équilibres en jeu dans la structure complète. <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Poussée des remblais d'accès sur les poteaux endommagés.
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Les endommagements étaient situés principalement sur les poteaux de rive correspondants aux poutres de rive. ● L'ouvrage étant hyperstatique transversalement (6 poteaux et 6 poutres principales), une redistribution est possible. ● La poussée des remblais est reprise en partie par des dalles de frottement incomplètement efficaces mais qui augmentent tout de même les capacités de ductilité de la culée. ● L'absence de risque d'affouillement était vérifiée. <p>L'ouvrage, dans son ensemble, fut donc considéré comme étant ductile.</p>
<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Les rotations des poteaux. ● Les rotations des poutres du cantilever. ● Les déplacements différentiels entre : <ul style="list-style-type: none"> - poteaux et poutres, - poutres du cantilever et poutres adjacentes. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Variations thermiques. ● Variations du niveau d'eau de la rivière.
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<p>4 blocs de surveillance ont été déterminés, correspondants aux 4 sections-coupures du tablier :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● les 2 abouts du tablier, ● les 2 abouts de la travée centrale cantilever. <p>1 section profil vertical thermique.</p>

SUITE

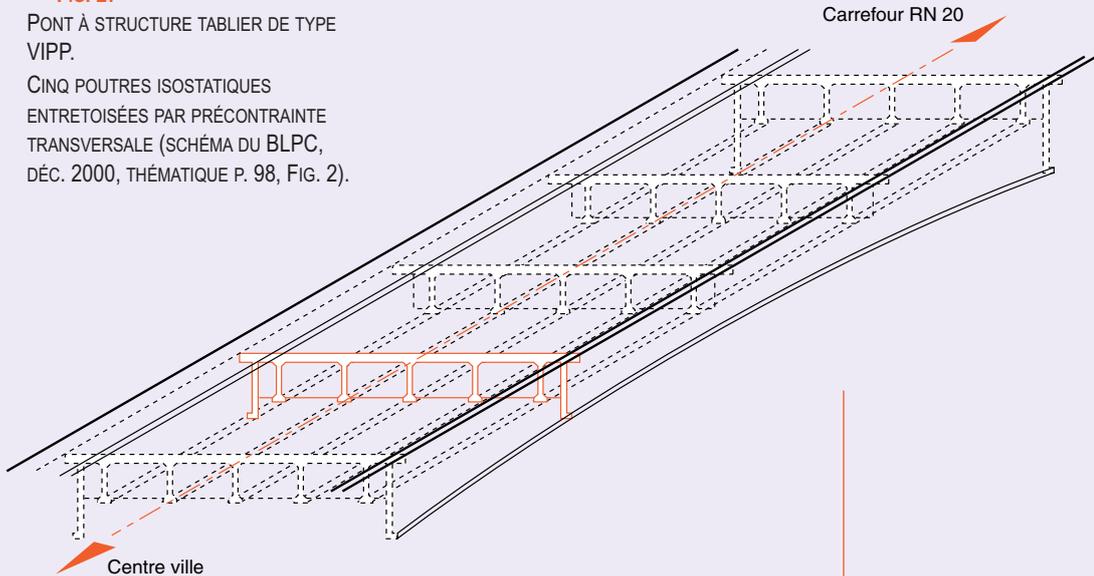
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● À chaque section d'about du tablier : <ul style="list-style-type: none"> - 3 clinomètres pour mesurer les rotations de 3 poteaux, - 2 capteurs de déplacements pour mesurer les déplacements relatifs entre les 2 poutres de rive et les 2 poteaux de rive. ● À chaque section d'about de la travée centrale cantilever : <ul style="list-style-type: none"> - 4 capteurs de déplacements pour mesurer les déplacements verticaux et horizontaux entre l'about du cantilever et l'about de la travée adjacente, - 2 clinomètres pour mesurer les rotations de la travée cantilever. ● 1 section-profil de 7 sondes thermiques.
<p>Protocole de surveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Mettre en place un système d'alarmes (A3, A2) automatiques pour surveiller techniquement la télésurveillance : <ul style="list-style-type: none"> - surveillance technique des capteurs, de la centrale, des modems, des alimentations . - surveillance automatique des liaisons de transmission : Transveil Télécom, opérateur privé pour la gestion des alertes. ● Mettre en place un système d'alarme (A1) avec liaison directe avec la gendarmerie qui dès réception du message phonique venant de la centrale <i>in situ</i>, interdit toute circulation sur le pont. ● Observer les variations des mesures le lundi et le vendredi pour vérifier le bon couplage entre elles et l'absence de phénomènes irréversibles et pour recaler si nécessaire, les modèles de surveillance. ● En début de chaque mois, envoi au gestionnaire des tracés des variations des mesures avec commentaires. ● Une fois par mois, déclenchement artificiel des 3 types d'alarmes pour vérifier, le bon fonctionnement de la chaîne de télésurveillance (des capteurs au gestionnaire). <p>Rédaction d'un rapport bi-annuel en l'absence d'événement ou faisant suite à des événements.</p>
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Pour chaque capteur, des seuils maxi et mini ont été établis par un comité technique formé d'experts pour tenir compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Des variations maximums admissibles en terme de génie civil. ● Du bruit de chaque capteur qui correspond, entre autre, aux influences non contrôlées, des seuils des autres capteurs, afin de rendre compatible les imprécisions et les risques sur des éléments structuraux différents. ● Des matrices de surveillance interrogeant les situations concomitantes de capteurs différents permettant d'induire des messages d'alarmes de niveaux progressifs : <ul style="list-style-type: none"> A1 : interdire la circulation sur le pont A2 : défaut localisé de la structure, inspection détaillée et expertise urgente A3 : défaut système (capteur) A4 : arrêt de la télésurveillance car pannes de centrale ou de liaison téléphonique ou d'alimentation, etc.
<p>Bilan de la télésurveillance</p>	<p>Au cours de plus de quatre années de télésurveillance, il a été mis en « évidence » un glissement continu d'un des poteaux-pieux de la culée, dont l'amplitude a été jugée admissible par le comité technique compte tenu de l'hyperstaticité transversale du tablier. Les seuils ont été décalés dans l'attente de la reconstruction du pont. + PROBLÈMES DE FERMETURES INTEMPESTIVES ? ? ? ?</p>

SUITE



■ FIGURE 26 - SCHÉMA D'INSTRUMENTATION DU PONT.

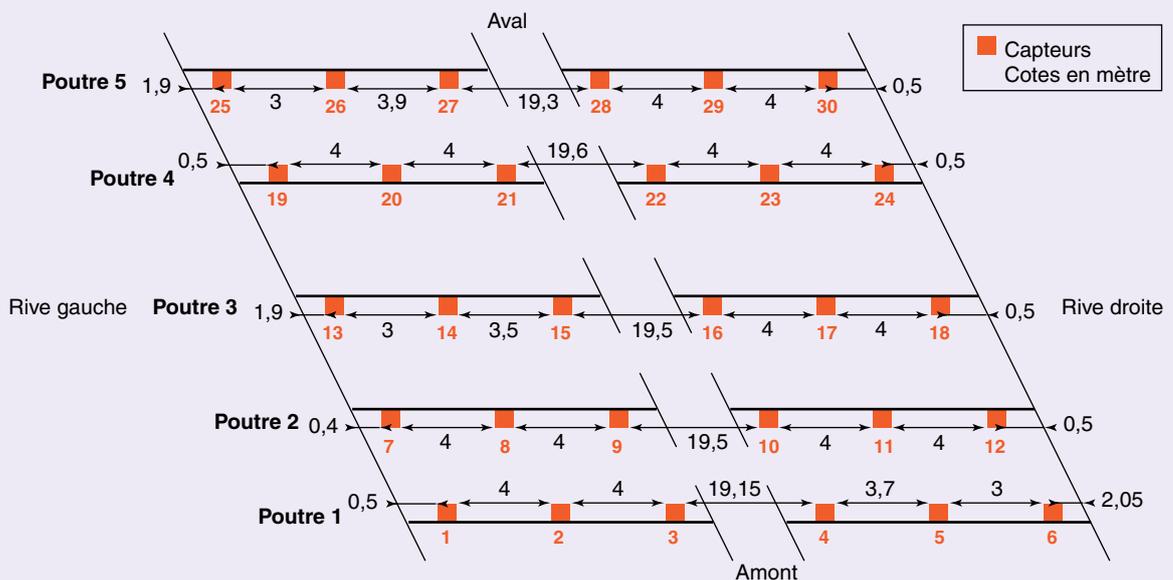
5.5 Télésurveillance d'un VIPP constitué transversalement de cinq poutres

<p>Type de structure</p>	<p>■ Fig. 27 PONT À STRUCTURE TABLIER DE TYPE VIPP. CINQ POUTRES ISOSTATIQUES ENTRETOISÉES PAR PRÉCONTRAÎNTE TRANSVERSALE (SCHÉMA DU BLPC, DÉC. 2000, THÉMATIQUE P. 98, FIG. 2).</p> 
<p>Problématique et contexte</p>	<p>L'ouvrage a été construit en 1962, époque où les techniques d'injection des câbles étaient mal maîtrisées.</p> <p>Malgré l'absence de fissuration de flexion ou d'effort tranchant mais compte tenu de la faiblesse du ferrailage passif et des faibles protections des câbles, il existait un risque de rupture fragile des poutres par effort tranchant.</p> <p>La question posée était donc de savoir s'il était possible de continuer à exploiter cet ouvrage et dans quelle condition jusqu'à la construction d'une déviation définitive ?</p>
<p>1er principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES : L'ouvrage étant isostatique, peut être la température moyenne ?</p> <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT : Peut être rupture de fils ou de torons par corrosion ? Peut être effets du trafic ?</p>
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<p>Cet ouvrage est hyperstatique transversalement et isostatique longitudinalement.</p> <p>Des risques de rupture fragile existent à l'effort tranchant.</p> <p>De nombreuses investigations et études ont été réalisées avant de décider de le mettre sous haute surveillance : contrôle des câbles par gammagraphie, reconnaissance endoscopique, calcul et essai de chargement.</p> <p>L'ouvrage peut être surveillé au cours du temps à condition de réduire le passage des poids lourds sur une voie centrée de circulation.</p> <p>Dans cette configuration, les calculs montrent que la rupture d'un câble dans une poutre ne conduit qu'à un faible dépassement des limites réglementaires de cisaillement aux ELS, lesquelles restent largement en-deçà des critères de rupture.</p>
<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Rupture de fils ou d'un toron. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Peut être le cours du temps ? ● Peut être le trafic ? ● Peut être la température moyenne ?

SUITE

<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sections situées à 3 m de chaque culée sur l'ensemble des poutres.
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<p>Les abouts de chacune des 5 poutres ont été équipés de trois accéléromètres fixés en ligne sur les âmes des poutres tous les 4 m. Au total, 30 accéléromètres procèdent à la surveillance acoustique de la structure.</p>
<p>Protocole de surveillance</p>	<p>Permettre de détecter en temps réel la rupture d'un fil seul de la rupture d'un toron, pour pouvoir déclencher des alertes et des alarmes aboutissant à la fermeture de l'ouvrage sans délais dans les situations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rupture d'un toron, • Rupture d'un huitième fil à l'un des abouts de poutre.
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Pour chaque onde détectée, les critères de sélection pour détecter une rupture sur la structure sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de propagation comprise entre 3600 et 6000m/s. • Au moins trois capteurs consécutifs atteints. • Amplitude crête du signal supérieur à 8 g. • Rupture d'un toron. • Rupture d'un huitième fil. <p>(Une poutre est précontrainte par 12 câbles constitués de 7 torons de 7 fils).</p>
<p>Bilan de la télésurveillance</p>	<p>La section d'about de la poutre P5 ayant accusé à elle seule 6 ruptures sur les 12 enregistrées au total depuis l'installation du dispositif de surveillance acoustique en mai 1995, le comité technique a décidé en avril 1998 de fermer le pont à la circulation publique, d'autant plus que la douzième rupture correspondait à celle d'un toron. L'ouvrage est resté fermé à la circulation jusqu'à son remplacement. L'autopsie pratiquée par la suite sur le tronçon d'about de la poutre P5 a confirmé l'existence de fils et de torons rompus. Le système de haute surveillance mis en place a donc parfaitement rempli son objectif.</p>

Cette présentation fait référence à un article du Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 215, Juin 1998, réf. 4117, pp. 71-76.



■ Figure 28
IMPLANTATION
DES CAPTEURS
DE SURVEILLANCE
ACOUSTIQUE.

5.6 Télésurveillance des appuis d'un pont en maçonnerie pendant des travaux de renforcement des fondations *

<p>Type de structure</p>	 <p>■ FIGURE 29 - OUVRAGE EN MAÇONNERIE COMPORTANT 16 APPUIS EN RIVIÈRE DONT DEUX SONT L'OBJET DE RENFORCEMENT PAR MICRO-PIEUX (PHOTO DU PONT DE PIERRE - CF. LR DE BORDEAUX).</p>
<p>Problématique et contexte</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Ce pont sur rivière, d'importance stratégique pour l'agglomération, a subi au cours des années une fragilisation des fondations de ses appuis (abaissement du lit de rivière, création de fosses). ● Les fondations anciennes (250 pieux en pin par pile) n'atteignent pas en pointe le substratum. ● Au cours des années, les tassements mesurés sur 2 piles s'accompagnèrent de fracturations transversales. <p>L'ensemble de cette situation a conduit le comité technique à proposer entre autre le renforcement de la portance verticale de ces appuis par micropieux.</p> <p>Compte tenu des risques de fragilisation accrue pendant la réalisation des travaux de renforcement, il fut décidé de mettre en place une haute surveillance des appuis pendant les travaux.</p>
<p>1er principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Variations saisonnières du niveau de la rivière. ● Influence quotidienne des marées. ● Variations thermiques <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Peut être démobilité des terrains servant au frottement latéral des pieux en bois, au cours des forages et des injections des micro-pieux ?
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Le comportement longitudinal des voûtes apparaît comme normal et elles ont toutes conservé leur intégrité. <p>Le coefficient de sécurité en portance verticale des 2 piles est estimé entre 1.2 et 1.3, le renforcement doit le porter au minimum à 1.5.</p>

* Cf. article Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, décembre 2000, Réf. 4075, pp. 65-70.

SUITE

<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Mouvements verticaux des appuis. ● Rotations des corps de piles. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Variations du niveau de la rivière. ● Variations des températures des voûtes et des appuis. ● Peut être démobilitation des sols ?
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Corps des piles.
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Capteurs de déplacement. ● Clinomètres. ● Capteur à pression pour mesurer le niveau d'eau. ● Capteurs de température.
<p>Protocole de surveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Compte rendu quotidien pour comparer les mesures des dernières 24 heures et les seuils prédéfinis. ● Analyse des graphes à la suite de chaque réalisation de micro-pieu (point d'arrêt).
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Seuils d'alerte induit des procédures internes de vérification : La valeur critique étant définie par un tassement de la pile de 1 cm par mois selon les travaux. ● Seuil d'arrêt déclenche automatiquement l'arrêt des travaux, la valeur critique étant définie par l'une des trois possibilités : <ul style="list-style-type: none"> - Tassement instantané lors de la réalisation d'un micropieu : 1 cm. - Tassement de la pile après réalisation d'un micropieu : 1 mm par semaine. - Tassement total de l'appui pendant les travaux : 5 cm.
<p>Bilan de la télésurveillance</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Signaler un dépassement de seuil d'alerte ou de seuil d'arrêt. <p>Les conditions de surveillance pendant quatre mois ont contribué à mener à bien, dans de bonnes conditions de sécurité, les travaux de renforcement très délicats sous circulation réduite.</p>

5.7 Télésurveillance d'un viaduc ferroviaire en maçonnerie *

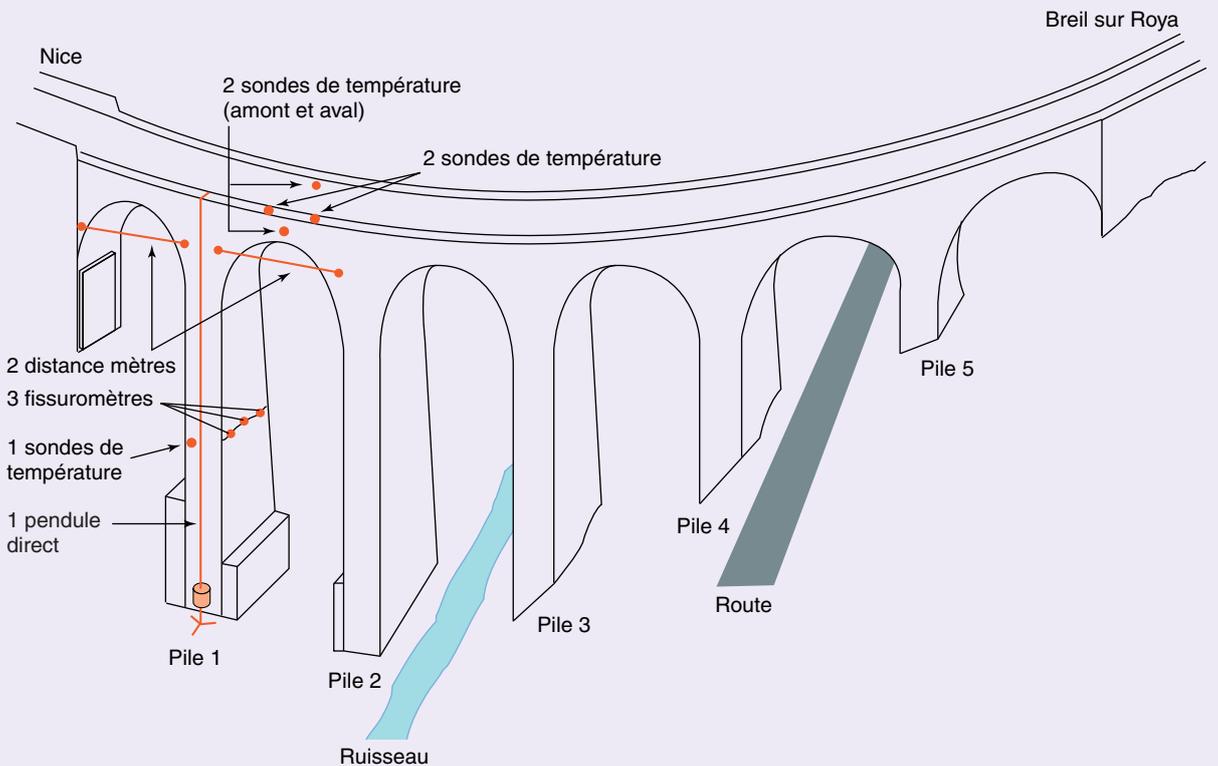
<p>Type de structure</p>	 <p>FIGURE 30 - VIADUC DE 6 VOÛTES PLEIN CINTRE, 5 PILES DE HAUTEUR VARIANT DE 6 À 23 MÈTRES.</p>
<p>Problématique et contexte</p>	<p>Une culée et la pile adjacente subissent les poussées dues à un mouvement de grande ampleur du versant sur lequel elles sont fondées.</p> <p>Dans l'impossibilité de stabiliser le glissement du versant et donc dans l'attente de la reconstruction de l'ouvrage, le gestionnaire souhaitait mettre l'ouvrage sous haute surveillance afin d'en assurer une utilisation en toute sécurité.</p>
<p>1er Principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES NATURELLES :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Variations thermiques. <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Glissement des fondations.
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<p>L'examen des désordres observés et le suivi de leur évolution avaient déjà conduit à renforcer, donc à rendre plus ductile les deux voûtes associées à la culée et à la pile adjacente.</p> <p>Une mise sur cintres, un pontage des voûtes à l'aide de travées métalliques et un renforcement des fondations par micropieux avaient déjà été réalisés.</p> <p>L'étude des chemins de ruine potentiels, mais supposés non fragiles du fait des renforcements effectués, fut réalisée et permit de confirmer la faisabilité d'une haute surveillance.</p>
<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À EXPLIQUER :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Évolution de la fracture de la pile. ● Variation d'inclinaison de la pile. ● Convergence des 2 voûtes. <p>PARAMÈTRES POTENTIELLEMENT EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Variations thermiques.
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Pile. ● 2 voûtes.

* Cf. article Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, décembre 2000, Réf. 4118, pp. 71-80, Thématique des ouvrages et des sites.

SUITE

<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Capteurs de déplacement à cheval sur la fracture. ● Pendule direct pour mesurer l'inclinaison de la pile. ● Distancemètres pour mesurer la convergence des voûtes. ● Thermocouples pour mesurer les températures.
<p>Protocole de surveillance</p>	<p>Assurer la fiabilité de l'ensemble d'un processus de haute surveillance avec la mise en place d'alertes pour déclencher des procédures internes et des alarmes pour arrêter les trains.</p>
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Comparer des valeurs mesurées à des seuils fixes prédéterminées.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Seuils d'alerte fixés <i>a priori</i> pour le comité de suivi <ul style="list-style-type: none"> - Capteurs de déplacement : 5 mm. - Distancemètre : 5 mm. - Pendule direct : 10 mm. ● Seuils d'alarme fixés <i>a priori</i> pour le comité de suivi <ul style="list-style-type: none"> - Capteur de déplacement : 15 mm. - Distancemètre : 15 mm. - Pendule direct : 15 mm.
<p>Bilan de télésurveillance</p>	<p>Il s'avère très positif car la sécurité de la circulation ferroviaire a pu être assurée pendant presque trois années, à moindre coût et sans incident notable.</p>

■ **FIGURE 31**
PLAN
D'INSTRUMENTATION DU
VIADUC DE LA LAUNA.



5.8 Télésurveillance d'un pont suspendu

<p>Type de structure</p>	 <p>■ FIGURE 32 - PONT SUSPENDU : TROIS TRAVÉES 150 M - 393,70 M - 150 M. MISE EN SERVICE : 1967.</p>
<p>Problématique et contexte</p>	<p>Les câbles porteurs sont constitués de torons de type câbles clos, dont les fils élémentaires ne sont pas galvanisés. La protection contre les infiltrations est assurée par un revêtement en produit bitumineux. Malgré sa rénovation en 1985, cette protection s'est avérée insuffisante. En 1998, une auscultation acoustique spécifique et l'ouverture de quelques colliers d'attache des suspentes démontre que la corrosion des fils atteint un stade critique et l'ouvrage est mis sous haute surveillance. Le comité technique constitué par la Direction des Routes devait définir les mesures d'urgence à prendre, proposer une solution pour traiter le problème et suivre les études et les travaux. Une réparation partielle ne pouvait être envisagée, et il n'existait pas de solution pour figer les câbles dans leur état de dégradation. La seule solution qui s'imposait était le remplacement complet de la suspension, selon un principe analogue appliqué précédemment au pont de Tancarville. L'objectif de la télésurveillance était de vérifier la sécurité structurelle de l'ouvrage pendant la période transitoire.</p>
<p>1er principe Définition des actions agissant sur le pont</p>	<p>ACTIONS CYCLIQUES : Charges d'exploitation.</p> <p>ACTIONS POTENTIELLES D'ENDOMMAGEMENT : La corrosion peut être accélérée par la fatigue mécanique et le niveau de contraintes. Réciproquement, l'endommagement en fatigue augmente avec le niveau de corrosion et le niveau de contraintes des fils sains augmente dans les sections où des fils sont rompus (par redistribution de l'effort de traction).</p>
<p>2e principe Analyse du fonctionnement</p>	<p>Ont été effectués, pour déterminer la tension maximale en service et les risques de fatigue :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Une modélisation non-linéaire 3D de l'ouvrage (PCP). ● Des mesures de tension des torons dans les chambres d'ancrage. ● Des mesures de ligne d'influence. ● Le calcul et la mesure des variations de contraintes en fatigue (γ compris en flexion à la sortie des colliers). ● La mesure du trafic et l'extrapolation des valeurs extrêmes sur différentes périodes de retour (logiciel CASTOR-LCPC). <p>La résistance résiduelle du câble a été déterminée à partir de l'état du câble sous les colliers ouverts et d'essais de traction sur des tronçons de fils rompus.</p>

SUITE

<p>3e principe Définition des paramètres à surveiller au cours du temps</p>	<p>PARAMÈTRES À SURVEILLER :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Rupture des fils, risque de rupture en chaîne des fils d'un toron, en raison de la redistribution de l'effort des fils rompus vers les fils non encore rompus. <p>PARAMÈTRES EXPLICATIFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Corrosion. L'analyse des fils rompus a mis en évidence une corrosion sous contrainte. Il semble que la fatigue par frottement inter-filaire ou la corrosion par piqûre soit à l'origine de micro-fissures qui évoluent ensuite par corrosion fissurante jusqu'à la rupture.
<p>4e principe Définition des sections à instrumenter</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Tous les colliers ont été instrumentés par des capteurs de surveillance acoustique. ● Ce dispositif était complété par une auscultation visuelle mensuelle.
<p>Type de capteurs mis en place</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Système CASC-LCPC. 
<p>Protocole de surveillance</p>	<p>Assurer la fiabilité de l'ensemble d'un processus de haute surveillance avec la mise en place d'alertes pour déclencher des procédures internes et des alarmes pour arrêter le trafic.</p>
<p>5e principe Seuils d'alerte et d'alarme</p>	<p>Comparer des valeurs mesurées à des seuils fixes prédéterminés :</p> <p>Si, au pont de Tancarville, la surveillance acoustique mise en œuvre par le LCPC n'avait pas posé de problème particulier d'interprétation, en revanche au pont d'Aquitaine, celle-ci dut être adaptée. En effet, le signal reçu par un capteur était assez rarement détecté par les capteurs placés sur les colliers adjacents, vraisemblablement en raison de l'amortissement élevé qui existe à l'intérieur du type de collier existant ainsi qu'à l'intérieur du câble proprement dit. Le seuil de détection des capteurs dut être abaissé à 2 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), sauf sur les capteurs soumis à un bruit de fond trop important (celui-ci pouvait atteindre 20 à 30 g en certains colliers). La plupart des ruptures qui se produisirent provoquèrent un signal de l'ordre de 20 g sur le capteur le plus proche, alors que les capteurs situés sur les colliers adjacents n'enregistrèrent qu'un signal de 1 ou 2 g. Après une période d'observation et d'élimination des bruits parasites, une rupture fut définie comme un événement caractérisé par la transmission du signal sur au moins deux colliers, quelle que soit l'amplitude mesurée, avec une vitesse de l'onde comprise entre 3500 et 7000 m/s. Seuls furent comptabilisés les événements survenant en dehors des périodes de chantier (de 19 h à 7 h en semaine) en raison des bruits parasites importants dus au chantier. Toutefois, les événements survenant en période de chantier furent analysés et corrélés avec l'activité sur le site.</p> <p>La procédure est basée sur la surveillance acoustique. La surveillance visuelle effectuée mensuellement vient en complément.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Seuils d' alertes : Les seuils d'alerte débouchant sur une réunion d'urgence du comité technique furent fixés à 10 ruptures de fil par mois ou à 150 ruptures au total, dans une section d'un câble. ● Seuils d'alarme : 400 ruptures au total dans une section du câble : mise en oeuvre de la procédure de fermeture de l'ouvrage.

SUITE

<p>Bilan de télésurveillance</p>	<p>La haute surveillance permet de surveiller la vitesse d'évolution des ruptures. Elle conduit à préconiser la réduction de la tension des câbles par la mise en œuvre de torons auxiliaires provisoires. Les modes de surveillance visuelle et acoustique se sont avérés complémentaires. La surveillance visuelle est précise, mais limitée aux fils externes hors colliers. La surveillance acoustique ne détecte que les ruptures les plus énergétiques, mais elle est globale. Elle avertirait ainsi de toute évolution majeure de l'état du câble, comme la rupture complète d'un toron interne, nécessairement très énergétique. Le bilan est très positif car l'ouvrage a pu être maintenu en service (100.000 v/j) pendant toute la durée des travaux.</p>
<p>Articles de référence</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● C. BOIS - La problématique de l'évaluation de la capacité portante de la suspension du pont d'Aquitaine. - Applications des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants, coordination C. CREMONA - AFGC - Presses de l'ENPC 2004. ● Ph. LEGER, C. BOIS, J.-P. OURLIAC, J. OYARZABAL, L. LLOP, J. RYCKAERT - La réparation du pont d'Aquitaine - Revue Générale des Routes et Aérodrômes n° 787, septembre 2000. ● C. BOIS, P. LEGER - Remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine - Revue Travaux n° 813 - novembre 2004. ● T. KRETZ, P. BREVET, C. CREMONA, B. GODART, P. PAILLUSSEAU - Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont d'Aquitaine - Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, à paraître.

Références bibliographiques

- [1] CALGARO J.A., *Maintenance et réparation des ponts*. Chapitre 3. Les bases du projet de réparation ou de renforcement.
- [2] LEMAIRE M., AFGC Un siècle de génie civil. Perspective d'avenir. Conférence du 12/12/2000. Du code d'Hammourabi à l'Eurocode.
- [3] CREMONA C., *Analyse de la fiabilité des ouvrages*, dans *La maîtrise de la modélisation des ouvrages* - Chapitre 6 du Livre 2 de la collection Emploi des éléments finis en Génie Civil, sous la direction de M. PRAT, Éditions HERMES, **1996**.
- [4] FAUCHOUX G., Analyse des résidus d'une régression linéaire appliquée à la surveillance métrologique des Ouvrages d'Art, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **200**, nov.-déc. **1995**.
- [5] GODART B., La surveillance renforcée et la haute surveillance des ouvrages d'art en France, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, juil.-août **2000**.
- [6] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - 2e partie, fascicule 03 : Auscultation, Surveillance renforcée, Haute surveillance, Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde* - Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement - Direction des Routes, **1998**.
- [7] Thème - Géo 05 : *Pentes instables suivi et modélisation*. Sujet n° 2 : Exploitation des données de suivi (1.25.02.4).
- [8] *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, réf. 4117, p. 101, déc. **2002**.
- [9] *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, Thématique Surveillance des ouvrages et des sites - déc. **2000**, 132 pages.
- [10] DUCHENE J.-L., CHRETIEN C., Mise sous haute surveillance de trois ouvrages d'art, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **146**, nov.-déc. **1986**.
- [11] *Télésurveillance des ouvrages d'art et des sites*, Projet National ITELOS, Éditions KIRK, 442 pages, **1994**.

Document publié par le LCPC	sous le numéro J1050409
Conception et réalisation	LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré
Dessins	LCPC-DISTC, Philippe Caquelard
Impression	Jouve - N°
Dépôt légal	3e trimestre 2005



Ce guide est destiné aux maîtres d'œuvre et aux responsables de laboratoire chargés de concevoir, de mettre en œuvre et d'exploiter un système de télésurveillance d'un ouvrage d'art dont l'état d'endommagement est de nature à remettre en cause la sécurité structurale.

Ce guide propose une méthodologie pour concevoir un système adapté aux besoins, pour exploiter efficacement les résultats des mesures, pour définir les seuils et procédures d'alerte qui permettront d'assurer, en cas de danger imminent, le déclenchement d'actions de sécurité publique définies à l'avance. Il fait également le point sur les capteurs existants et leurs performances, sur l'organisation des chaînes de capteurs, sur les technologies et protocoles de transmission des données et sur la maîtrise de la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de mesures.

Ce guide est complété par des exemples d'application à différents types d'ouvrage qui illustrent la méthodologie proposée.

This guide is intended for structural engineers and civil engineering laboratories in charge of designing, implementing and managing a telemonitoring system for a bridge so damaged that its structural safety is impaired.

This guide proposes a methodology to design a system that fits the needs, to operate efficiently and make the most of the results, to define the thresholds and procedures that will, in case of immediate danger, trigger public safety measures previously organised. This guide also proposes a state of the art of existing sensors and sensor networks, including data transmission protocols and addresses the reliability control of the over whole system

This guide is supplemented by a selection of application examples that illustrate the proposed methodology.