

MÉTHODES ET MÉTHODOLOGIE
DE DIAGNOSTICS DES
OUVRAGES D'ART

A. ACHARHABI (LPEE)

B. FELLAHI (LPEE)

L'objectif de cet article est de donner pour chaque méthode d'investigations les avantages et les limites surtout lorsqu'on a à évaluer la part de contribution des différents agents de dégradation ; à attribuer à chacun de ces agents les conséquences correspondantes et à apporter par la suite les solutions nécessaires.

Elles sont abordées successivement les méthodes classiques et les méthodes avancées , avec pour chaque cas les avantages et les limites. Les buts généralement recherchés sont :

- Déterminer l'origine des désordres ;
- Evaluer leur étendue ;
- Déterminer leur évolution ;
- Déterminer leur impact sur la sécurité des structures.

Les méthodes utilisées visent essentiellement à :

- Reconnaître l'état des armatures et leur enrobage ;
- Apprécier la qualité du béton ;
- Déterminer l'action de l'environnement ;
- Etablir une prévision sur la durée de vie des structures.

I N T R O D U C T I O N

L'auscultation des ouvrages d'art existants au Maroc (environ 4000 ouvrages de portée supérieure à 5.0m sans considérer les dalots) est une opération qui se réalise généralement de la façon suivante (formalisée dans une instruction officielle) :

Elle commence par des visites effectuées par l'administration régionale qui déclenche le processus d'intervention en informant l'administration centrale et si besoin, les organismes spécialisés .

Une visite collective est souvent organisée pour appréhender les mesures urgentes de sécurité à prendre et inviter un organisme compétent à réaliser une auscultation détaillée.

Le tableau T1 donne une idée sur les différentes investigations effectuées au Maroc en comparaison avec l'Europe (la France qui est le principal partenaire dans ce domaine).

Il est à rappeler que le Maroc est caractérisé par une cote de 1300 km (une partie importante sur l'Océan Atlantique, et le reste sur la Mer Méditerranéenne).

D'après une étude effectuée par la DRCR les ouvrages peuvent être répartis en fonction de la nature des matériaux comme suit :

- Béton armé 65%.
- Poutrelles enrobées 13%.
- Maçonnerie 12%.
- Mixte 7%.
- Béton précontraint 4%.

Etant donné l'importance des ouvrages à structures en béton , nous développons dans ce qui suit les investigations que réalise le LPPE sur ce type de structures. Le schéma général d'intervention est donné en fin du texte .

Comme on peut le constater la première intervention , consiste à effectuer le relevé des structures et à reconstituer les plans de coffrage et des armatures.

Ces éléments permettent de recalculer la structure et de procéder aux simulations théoriques de portance , et permettre ainsi de préciser les zones où il faut effectuer les prélèvements et les expérimentations .

Les méthodes d'investigation habituellement utilisées au Maroc à l'occasion d'une auscultation sont décrites ci-après .

LES INVESTIGATIONS

Les investigations décrites ci-dessous ont généralement pour objet d'apprécier la qualité des matériaux en place, de reconnaître leur état de conservation et de vérifier le fonctionnement structurel des ouvrages .

1 - SUR LES MATÉRIAUX.

Les investigations généralement effectuées sur les matériaux en place ou sur des échantillons au laboratoire sont décrites ci-dessous :

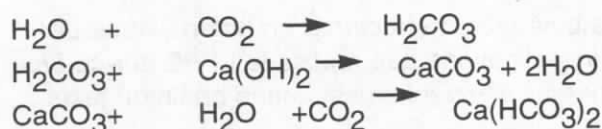
a - Mesure de la carbonatation

C'est le phénomène responsable de la dégradation du béton dans la majorité des cas.

Les agents agressifs responsables sont généralement l'eau (humidité) et le gaz carbonique.

a - 1 • Le mécanisme

Le mécanisme réactionnel de la carbonatation est le suivant :



a - 2 • Les facteurs qui influencent la carbonatation sont comme suit :

- **Nature et dosage en ciment.**

Si la teneur en chaux et le dosage augmentent, la vitesse de carbonatation diminue.

- **Quantité d'eau de gâchage.**

Si la quantité d'eau augmente, la porosité et la vitesse de carbonatation augmentent aussi.

- **Mise en oeuvre**

Quand la compacité augmente, la vitesse de carbonatation diminue.

- **Milieu ambiant.**

La vitesse de carbonatation est maximale pour 50% d'humidité relative.

a - 3 • Mesure de la profondeur de carbonatation du béton.

La profondeur de carbonatation totale est repérée grâce à un indicateur coloré pulvérisé sur une saignée, et mesurée à l'aide d'une jauge de profondeur.

La partie non totalement carbonatée se colore en rose violacé.

L'essai consiste à pratiquer une saignée sur la surface choisie pour le test.

- Eliminer les poussières à l'aide de l'air comprimé ;
- Pulvériser un peu d'eau distillée sans aller jusqu'à provoquer des coulures et attendre que le béton ait absorbé cette eau (15 à 30 secondes) ;
- Pulvériser une quantité équivalente de la solution de phénolphtaléine puis observer immédiatement la coloration rose éventuelle ;
- Si la profondeur de carbonatation totale est atteinte, on voit apparaître une coloration rose violacée au fond de la saignée ;
- Si la profondeur de la saignée est insuffisante pour obtenir la coloration, l'approfondir jusqu'à deux, voir trois centimètres à l'aide d'une meuleuse puis répéter les opérations ci-dessus.
- Mesurer à l'aide de la jauge, la profondeur des deux limites de la zone colorée en fond de saignée, par rapport à la surface du parement, c'est la profondeur de carbonatation totale du béton qui sera exprimée en millimètres ;
- Faire un ragréage de la saignée.

Au cas où les limites de coloration ne seraient pas franches, la mesure de la profondeur se fait en début et en fin de la zone

Si l'empreinte colorée se termine par un gros granulat, la saignée est prolongée pour que la limite de coloration se trouve dans le mortier.

Cet essai basé sur une estimation du PH à l'aide d'un indicateur coloré, mesure la profondeur de carbonatation totale du béton, c'est à dire celle en deçà de laquelle les armatures ne sont absolument plus protégées contre la corrosion même en l'absence de chlorures.

Au niveau des armatures, il est intéressant d'effectuer la saignée jusqu'au ras de l'acier pour évaluer les réserves de protection.

Au niveau d'une fissure, l'essai permet en principe de mesurer la profondeur de carbonatation des lèvres à l'aide d'une saignée perpendiculaire à sa direction. Cette saignée est allongée d'au moins 7 cm de part et d'autre de la fissure.

b - Détection et mesure de la corrosion par la méthode du decorarm

Il s'agit d'une méthode non destructive qui permet d'étudier l'activité de la corrosion dans les structures en béton armé.

b - 1 • Principe

Le principe est basé sur la mesure de la tension de la pile formée d'une part , par l'acier enrobé de béton et d'autre part par une électrode de référence dont le potentiel est connu et constant placé sur le parement en béton de la pièce à ausculter.

Le début de corrosion d'une armature provoque un phénomène électrochimique où la zone en cours de corrosion se comportera comme une anode génératrice d'électrons et les zones passivées serviront de cathode.

Ce phénomène persistera jusqu'à la destruction de l'armature agissant comme électrode.

Les variations de potentiel ainsi créées sur la longueur de l'armature peuvent être mesurées à l'aide d'un appareil appelé (DECORARM) (Détecteur de corrosion des armatures).

Il comprend :

- Une unité d'acquisition de données avec son imprimante(U.A.D).
- Un terminal de poche.
- Une manche télescopique pour la roue de mesure.
- Une roue de mesure.
- Des écouteurs.

La roue de mesure possède un élément de pile " argent / chlorure d'argent (Ag/AgCl) utilisant du chlorure de potassium en solution saturée comme électrolyte. Cet élément est très stable, a des temps de réponse rapides et une stabilité thermique élevée. Ses possibilités de pollution sont faibles, car l'électrode d'argent est entourée par un électrolyte solide à base de chlorure d'argent qui le protège contre les risques de contamination.

La connexion électrique entre la surface du béton et l'élément de pile de la roue de mesure est assurée par un bandage spongieux humidifié par l'électrolyte contenu dans sa poignée , utilisé comme agent conducteur.

Cette technique réduit considérablement la contamination de la surface du béton par l'électrolyte et les risques de pollution de l'élément de pile par les impuretés présentes sur la surface.

Lors de l'essai, la roue est simplement déplacée en trajets rectilignes parallèles, sur la surface du béton et transmet à intervalles réguliers, les informations recueillies.

L'unité d'acquisition de données, son imprimante incorporée et son clavier de commande portés par l'opérateur sont reliés à la roue de mesure par un câble souple.

L'opérateur dialogue avec le micro - processeur de l'unité par l'intermédiaire d'un petit terminal incorporant le clavier et l'écran de lecture.

Les menus programmés pour le terminal permettent à l'opérateur de sélectionner différentes opérations de stockage ou d'impression des mesures.

b - 2 • exploitation des résultats.

Les résultats de mesures sont présentés sous formes de graphiques donnant les surfaces équipotentielles, ce qui permet d'avoir des informations sur l'activité électrique des différentes zones et par voie de conséquence des informations sur l'activité de la corrosion. L'interprétation des résultats est basée sur la norme ASTM C876-91 qui définit les trois situations suivantes :

Classe S $-200 \text{ mV} < E$ les aciers sont passivés.

Classe M $-350 \text{ mV} \leq E \leq -200 \text{ mV}$ l'enrouillement est possible.

Classe R $E < -350 \text{ mV}$ l'enrouillement est probable.

E étant le potentiel électrochimique.

c - Auscultation sonique des bétons (le LPEE est accrédité par COFRAC).

Il s'agit d'une méthode courante qui consiste en la mesure du temps de propagation du son dans le béton entre un émetteur et un récepteur séparés par une distance d connue.

Les expressions donnant les vitesses longitudinale et transversale dans un milieu élastique linéaire sont les suivantes :

$$V_L = [(E/\rho)(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)]^{1/2}$$

$$V_T = [(E/\rho)(1/2(1+\nu))]^{1/2}$$

E : module d'élasticité.

ν : Coefficient de poisson .

ρ : masse volumique.

V_L : vitesse de propagation des ondes longitudinales (ou de compression).

V_T : vitesse de propagation des ondes transversales (ou de cisaillement).

Ces expressions permettent de calculer E et, ν car les vitesses V_L et V_T sont mesurables moyennant des générateurs et des récepteurs d'ondes ultrasonores. La masse volumique est aussi mesurable sur prélèvement. Ce pendant, du fait que le béton est un matériau hétérogène non linéaire et isotrope, les valeurs calculées ne peuvent avoir qu'un caractère indicatif.

Cette méthode est par contre intéressante dans son utilisation empirique pour :

- Apprécier l'homogénéité d'un béton ;
- Localiser et apprécier l'importance d'un défaut ;
- Estimer dans certains cas la résistance à la rupture du béton.

Les deux façons de mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales sont les suivantes :

1-Par transparence : l'émetteur et le récepteur sont placés de part et d'autre de la paroi d'épaisseur d et la détermination de la vitesse est immédiate. $V = d/t$. Cette procédure présente l'avantage de permettre l'auscultation de tout le béton compris entre l'émetteur et le récepteur.

Les inconvénients se situent dans :

- La précision de la vitesse, du fait que cette dernière dépend de la précision avec laquelle l'épaisseur est appréciée.
- La mesure de la valeur absolue du temps de propagation du son fait que le réglage à zéro de l'appareil peut être la cause d'erreurs sur la détermination de la vitesse.

2-Par alignement : l'émetteur et le récepteur sont placés sur la même face de la paroi à ausculter et la vitesse est obtenue par la détermination de l'inverse de la pente de la droite : $V = Dd / Dt$.

Par conséquent le résultat ne dépend plus du réglage de zéro des appareils. Les domaines d'exploitation de cette méthode font que le nombre de points de mesure à effectuer sont fonction du problème posé .

Par exemple pour tester l'homogénéité du béton sur l'ensemble de la structure, un maillage permettant d'implanter au minimum une ligne par m^2 ou trois points de mesure par transparence est généralement recommandé.

L'interprétation des résultats consiste à tracer des courbes iso-vitesses et visualiser les variations de qualité du béton sur un plan général.

Les défauts locaux se manifestent par une brisure de la droite $t = f(d)$.

Les fissures se manifestent par la discontinuité du graphique $t = f(d)$.

L'estimation de la résistance à la compression passe par une corrélation entre cette dernière et la vitesse du son.

Les modèles mathématiques couramment utilisés au Maroc sont :

$$R_c = K V_n$$

$$\text{ou } R_c = A V_n + B V + C.$$

Les coefficients K- A - B - n dépendent de la nature du béton ausculté

c - 1 - Cas particulier (Carottage sonique).

Il s'agit de mesurer à tous les niveaux des (pieux , barrettes, parois moulées.) en béton le temps de propagation des ondes longitudinales selon un plan déterminé par deux tubes de mesure. Une brusque variation de temps indique la présence d'hétérogénéité dans le béton du pieu situé entre deux sondes constituées d'éléments piézo-électriques : Une sonde émettrice et une sonde réceptrice. En effet, le béton présente de bonnes caractéristiques de transmission des ondes élastiques et une vitesse de propagation de 4,00 Km/s dans un spectre allant jusqu'à 50 KHZ alors que les matières étrangères (terre, boue, sable, etc,...) présentent une vitesse inférieure et un affaiblissement très important.

Dans ces conditions, la présence sur le trajet de l'onde d'un matériau étranger, perturbe l'amplitude et la forme des signaux reçus.

La sonde émettrice fournit, à partir d'une impulsion électrique produite par un excitateur, un choc mécanique qui se propage dans le béton, ce choc récupéré par la sonde réceptrice, au bout d'un temps proportionnel à la dis-

tance existant entre les deux sondes est alors transformé grâce à une modulation noire et blanche et se présente pour un niveau donné sous forme d'une ligne constituée d'une série de points.

Lorsqu'on remonte les sondes, un potentiomètre couplé à un treuil spécial déplace ces lignes verticalement et progressivement sur l'écran de l'oscilloscope. La photographie de cet écran, grâce à un appareil Polaroid où la visualisation et l'impression des signaux par l'introduction des seuils numériques fournit le résultat de l'auscultation du pieu depuis le fond jusqu'à la tête.

Les éléments préparatoires nécessaires sont :

- Equiper les éléments à ausculter par des tubes de mesure fixés aux cages d'armatures avant bétonnage (le nombre de tubes est fixé en fonction des diamètres des pieux ou de la section des barrettes).
- Remplir les tubes par de l'eau claire pour permettre la transmission des ondes.

Le carottage sonique est généralement effectué pour des besoins de réception.

Cependant, on a par fois recours à cet essai pour des besoins d'expertise .

Il s'agit notamment des désordres qui peuvent affecter les structures de fondations en cours d'exploitation .

Les opérations déjà réalisées dans ce sens consistaient à extraire des carottes sur des pieux présentant des désordres et à ausculter les bétons sur place en profitant des perforations .

Les essais réalisés sur des cas réels ont montré des résultats satisfaisants.

Pour donner une idée sur l'importance des essais de carottage sonique on présente ci-dessous un tableau synthétique sur les dossiers traités entre fin 94 et fin 97.

Numéro	Affaire	Nombre (pieu/barr)	Hauteur auscultée
94267	PI4MY BOUSSELHAM	01	15
950015	PI RS 216 APK 113	16	336
950027	PONT SUR OUED MOULOUYA RS329	08	120
950032	PONT RP 21 PK 271+100 ERRACH	04	60
950087	PONT RP 21 PK 271+100 ERRACH	04	60
950162	PONT DOUAR OULAD YOUSSEF	08	120
95210	MISSOUR	08	120
950226	PONT BOUREGREG RABAT	80	2120
960180	PONT SUR OUED ELOUAAR TAN TAN	04	56
96216		07	98
96370		07	112
96420		09	207
96461		06	84
960251	PONT SUR OUED DRADER ARL	04	60
96368	PONT OUED RHAT	04	128
960390	PONT TENDIT	05	80
96392	PONT MEKKES	08	127
96394	PONT RHAT	04	128
96410	PONT TENDIT	06	67
96411	PONT MEKKES	12	264
96425	PONT SEBOOU	04	68
96457	PONT SEBOU	06	120
96459	PONT MEKKES	06	131
96475	TENDIT	06	96
96486	MEKKES	08	156
96513	SEBOU	01	7.0
96519	SEBOU	04	80
96544	OUCHKAT ARF TR2	16	338
96565	SOUK SEBT	01	15
960583	OUCHKAT	10	152
960584	PUCHKAT	10	160
96609	PONT BEHT	02	47
96612	DRADER	01	29
970001	SEBOU	06	138
970042	ARF BEHT	12	264
970046	PONT OURGHA	04	75
970070	PONT DE DAKHLA	03	55
970079	PONT OURGHA	04	77

970105	PONT DRADER	07	161
970111	PONT BEHT ARF	12	264
97157	DRADER	06	137
97186	EL KELL	12	180
97197	EL KELL	12	180
97230	BEHT ARF	16	496
97280	BEHT ARF	01	32
97327	EL KELL ARF	08	119
97336	PONT BOUKDIM	15	213
97337	PONT BEHT	16	496
97372	PONT OURGHA	08	75
97378	BOUHLOU	04	46
97387	BEHT	16	543
97391	EL KELL	04	88
97392	EL KELL	04	64
97432	EL KELL	24	518
97434	ISLY	06	90
97443	BOUHLOU	04	33
96384	SOTRAVO	14	85
97022	CENTOS	06	130
	57 affaires	496 éléments	10320.0m

d - Radiographie - Gammagraphie

Généralement utilisée en industrie pour le contrôle d'assemblage, la radiographie est actuellement appliquée au béton armé et plus souvent au béton précontraint.

Le principe consiste à placer une source de rayonnement X ou γ d'un côté de la paroi à ausculter et le flux de rayonnement, après avoir traversé la paroi vient impressionner un film photographique.

Le film est impressionné différemment suivant l'intensité reçue.

La loi d'atténuation sélective des photons par la matière est de la forme $I = I_0 e^{-mx}$

où I_0 est l'intensité du flux incident, I l'intensité du flux émergent, x est l'épaisseur traversée et m un coefficient d'atténuation fonction de :

- L'énergie des photons.
- La nature chimique Du matériau.
- La densité du matériau.

C'est la dernière propriété qui est exploitée.

La présence d'un corps plus dense que le béton (un acier par exemple) se manifeste par une trace plus claire (moins d'intensité émergente).

La présence d'un vide (manque de coulis d'injection par exemple) a pour effet un noircissement plus important du film (plus d'intensité émergente).

e - Les études sur prélèvements

Les échantillons sont le plus souvent utilisés comme référence d'étalonnage ou comme point de comparaison pour compléter les informations que l'on tire d'essais non destructifs.

e - 1 • Les essais mécaniques.

Il s'agit des essais classiques de compression, traction etc ..

La difficulté, est que ces essais sont généralement effectués sur des carottes les plus petites possible et en nombre limité dont la forme et la dimension diffèrent notablement de la forme et de la dimension des éprouvettes normalisées.

C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'établir une correspondance entre les résultats qu'on trouve sur des éprouvettes normalisées et sur des carottes extraites à l'occasion d'une auscultation.

e - 2 - Les essais physiques, chimiques et physico-chimiques (LPEE est accrédité par le COFRAC)

C'est la mesure de densité, de porosité, de teneur en eau mais aussi la mesure de la vitesse de propagation du son qui pourrait être utile lors de la corrélation des mesures non destructives.

Les essais chimiques et physico-chimiques sont généralement coûteux et nécessitent un choix préalable en fonction de la complexité du problème.

On peut citer par exemple pour le cas du Maroc les essais et analyses suivants :

- Les analyses métallographiques;
- Détermination des constituants élémentaires (la nature du métal, sa structure, ces propriétés) ;
- L'analyse chimique du béton permettant de déterminer le dosage des différents oxydes présents dans le béton (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O etc.) ;

- Les analyses pétrographiques permettant d'examiner la constitution minéralogique des granulats, leur texture, leur degré d'altération ;
- Détermination du dosage en ciment.

2 - SUR LE FONCTIONNEMENT

Les investigations effectuées sur les structures en vue d'apprécier leur fonctionnement global ou local sont également de type non destructifs.

a - Suivi des mouvements

Il s'agit notamment du suivi topographique et de nivellement

Les désordres se produisant dans les fondations sont liés à des mouvements d'appuis. Le suivi de la stabilité se fait par la méthode topographique sinon pour des ouvrages importants, chaque appui est équipé de cibles de visée.

Pour les tabliers, le procédé de suivi est simple en examinant l'alignement des garde-corps ; car vu la souplesse qu'ils présentent par rapport au tablier, les garde-corps suivent fidèlement tout mouvement du tablier.

b - Mesure de la déformation sous charge

Les ouvrages sont généralement soumis à des épreuves de chargement de réception avant mise en service. Ces épreuves sont considérées comme la première opération d'auscultation servant comme référence à toutes interventions ultérieures

Pour les ouvrages anciens défectueux, on a recours aux mesures de flèches pour étudier son comportement sous les charges de l'essai.

Le chargement est généralement progressif pour ne pas compromettre sa force portante.

Les mesures se font le plus souvent en mi-travées à l'aide de capteurs de déplacement électriques ; mécanique ou par nivellement topographique

c - La fissurographie

C'est une opération qui consiste en un relevé géométrique détaillé de la fis-

uration, ainsi que de son évolution dans le temps .

La fissuration traduit la manifestation extérieure du fonctionnement de la structure. Un relevé détaillé comporte le maximum d'information possible sur les fissures

- La nature des fissures (distinction entre les différentes fissures relevées) ;
- Les ouvertures (indication de l'ordre de grandeur des ouvertures de manière à pouvoir suivre leur évolution dans le temps) ;
- La date du relevé ou d'apparition pour les fissures nouvelles ;
- La profondeur : C'est une opération qui ne se fait pas généralement au stade du relevé. la détermination de la profondeur est généralement effectuée soit par injection de liquide coloré soit par carottage mécanique.

Extensométrie/Fissurométrie

L'extensométrie et la fissurométrie sont respectivement la mesure de la déformation locale d'une section et la mesure des mouvements relatifs des deux lèvres d'une fissure à la surface d'une pièce sous l'effet d'actions diverses.

On utilise l'extensométrie pour évaluer la variation du champ de contrainte en mesurant les déformations linéiques de l'équation générale de lamé :

$$\sigma_{ij} = E/(1+\nu) [(\nu/(1-2\nu)) \delta_{ij} \sum e_{ij} + e_{ij}]$$

σ_{ij} : Contraintes normales .

σ_{ij} : Contraintes tangentielles ou de cisaillement

e_{ij} : Déformations angulaires.

e_{ij} : Déformations linéiques ($\Delta l/l$)

E : module d'young du matériau.

ν : Coefficient de poisson du matériau.

$\delta_{ij} = 1$ pour $i = j$ et $\delta_{ij} = 0$ pour $i \neq j$

On utilise la fissurométrie généralement pour déterminer les tensions supplémentaires induites par des actions extérieures dans les armatures passives ou actives traversant une fissure.

Les appareils utilisés sont en général.

- Les jauges à fils résistants.
- Les extensomètres mécaniques.
- Les comparateurs.

d - La pachométrie

Il s'agit de mesures électromagnétiques réalisées essentiellement en parallèle avec les essais soniques, la détection de la corrosion et la fissurographie. Ce sont donc des mesures qui permettent de détecter l'emplacement des armatures, de déterminer leur diamètre et d'estimer leur enrobage. Au niveau des mesures soniques la pachométrie est nécessaire pour n'ausculter que le béton ; Pour la détection de la corrosion les mesures sont effectuées suivant le maillage des armatures ; Pour la fissurographie, il est très intéressant de repérer les fissures par rapport au quadrillage d'armatures ce qui facilite l'interprétation et le classement des fissures.

LES THÈMES DE RECHERCHES EN COURS AU MAROC DANS CE DOMAINE

Les principaux thèmes de recherches qui sont en cours actuellement au Maroc dans le domaine des ouvrages d'art sont les suivants :

- Corrélation vitesse - résistance à la compression dans le béton ;
- L'effet d'échelle ;
- L'effet des imperfections dans les structures en béton ;
- Les essais de portance des ouvrages d'art ;
- Les bétons de hautes performance ;
- L'élaboration de logiciels de calcul des ponts cadres biais.

TABLEAU 1

Tableau 1-Comparaison des investigations effectuées en matière d'auscultation des ouvrages d'art au Maroc et en Europe.

FRANCE	MAROC
Détérioration des revêtements	Détérioration des revêtements
• Visuel.	• Visuel.
• Mesure de l'impédance.	• Test d'arrachement.
• Test d'adhérence à la tension.	• Epaisseur de la couche sèche.
• Epaisseur de la couche sèche.	
Diagnostic de la détérioration des aciers.	Diagnostic de la détérioration des aciers.
• Visuel.	• Visuel.
• Essais de pénétration	• Essais aux ultrasons.
• Magnétoscopie.	• Magnétoscopie.
• Mesure de l'allongement.	• Mesure de l'allongement.
• Radiogammagraphie.	• Radiogammagraphie.
Béton.	Béton.
Corrosion des armatures et des câbles de précontrainte.	Corrosion des armatures et des câbles de précontrainte.
• Visuel	• Visuel
• Ecaillage de la couche supérieure du béton.	• Ecaillage de la couche supérieure du béton.
• Mesure électrochimique.	• Mesure électrochimique.
Fissuration dans le béton.	Fissuration dans le béton.
• Visuel.	• Visuel.
• Méthode par ultrason.	• Méthode par ultrason.
• Profondeur des fissures par prélèvement d'échantillon.	• Profondeur des fissures par prélèvement d'échantillon.
Carbonatation du béton.	Carbonatation du béton.
• Pulvérisation de phénolphthaléine.	• Pulvérisation de phénolphthaléine.
• Analyse aux rayons X	
• Microscopie électronique.	
Etat de pénétration (injection des câbles)	Etat de pénétration (injection des câbles)
• Visuel (après)	• Radiogammagraphie.
• Evaluation de la corrosion des câbles.	
• Méthode par ultrason.	
• Radiogammagraphie.	
• Fibre optique.	
• Emission acoustique.	
• Système scorpion en cours en développement.	
Emplacement et diamètre des aciers à béton armé et des câbles de précontrainte.	Emplacement et diamètre des aciers à béton armé et des câbles de précontrainte.
• Visuel par forage de trous.	• Visuel par forage de trous.
• Induction électromagnétique.	• Induction électromagnétique.
• Vagues électromagnétiques.	• Radiogammagraphie.
• Radiogammagraphie.	

Résistance du béton.	Résistance du béton.
• Scléromètre.	• Scléromètre.
• Auscultation dynamique	• Auscultation dynamique
Dégâts causés par le sel.	Dégâts causés par le sel.
• Fissurographie.	• Fissurographie.
• Résistance du béton.	• Résistance du béton.
• Teneur en chlore.	• Teneur en chlore.
• Corrosion des armatures.	• Corrosion des armatures.
Alcali-réaction	Alcali-réaction
• Fissurographie.	• Fissurographie.
• Rc du béton.	• Rc du béton.
• Prélèvement d'échantillon.	• Prélèvement d'échantillon.(ST)
formation de gel silicate alcalin	
analyse par rayon X des granulats.	
Test de mesurage de l'expansion	
test ASR par méthode chimique	
test ASR par méthode barre de mortier	

AUSCULTATION D'UN OUVRAGE D'ART.

VISITE DETAILLEE ET INTERPRETATION DES CONSTATATIONS.(1)

ELABORATION D'UN PROGRAMME D'AUSCULTATION. (2)

APPRECIER LA QUALITE
DES MATERIAUX.

MODE DE FONCTIONNEMENT
REEL

DISTINGUER LES TECHNIQUES ET LES MOYENS ELEMENTAIRES D'AUSCULTATION.

QUALITE DES MATERIAUX.

- Etudes et analyse sur prélèvements.
- Moyens in situ non destructifs.

FONCTIONNEMENT STRUCTUREL

- Moyens in situ non destructifs

- Essais soniques.
- Essais magnétiques.
- Essais électrochimiques.
- Essais radiographiques.

- Mesures géométriques.
- Mesures de forces.
- Mesures de déformations.
- Extensométrie fissurométrie.

REALISATION DES INVESTIGATIONS.(3)

INTERPRETATION ET SYNTHESE.(4)

schéma général d'auscultation d'un ouvrage d'art.

HAKIMI-ACHARHABI : Technique de diagnostic des désordres affectant les structures d'ouvrages d'art en béton (Expérience marocaine) Melbourne, Australie.

ENPC : Maintenance et réparation des ponts 1997.