

Chapitre 3 : Méthodes d'auscultation des constructions



Table des matières



Introduction	3
I - Investigations in-situ	4
1. Relevé visuel	4
2. Auscultation des bétons	4
2.1. L'auscultation sonore	5
2.2. Scléromètre	6
2.3. Impact-écho	7
3. Auscultation du béton armé	8
3.1. Localisation des armatures par des méthodes électromagnétiques	8
3.2. Caractérisation de l'état de corrosion des armatures par des méthodes électriques	10
4. Méthodes radiographiques	12
5. Méthodes thermiques	13
II - Investigations sur prélèvements	14
1. Les sondages carottés	14
2. Prélèvements d'aciers	14
3. Test à la carbonatation	14
4. Analyse minéralogique complète du béton	15
III - Choix des méthodes d'auscultation	16
IV - Complémentarité des essais	17
V - Conclusion	18

Introduction



L'identification précise des désordres, l'appréciation de leur étendue, la recherche des causes, et des mécanismes qui ont permis aux désordres de se développer... autant de points qu'il est nécessaire d'aborder avant d'entreprendre toute action de réparation.

C'est l'ensemble de ces investigations nécessaires que l'on appelle auscultation. Il n'existe pas de procédure type d'auscultation applicable à tous les ouvrages d'art, ni même à une famille donnée d'entre eux. Les explications recherchées, donc les méthodes d'auscultation à utiliser, diffèrent suivant la nature des désordres constatés. Les auscultations peuvent être de deux natures :

- auscultation du matériau et l'appréciation de son état ou ses propriétés ;
- auscultation de la structure et l'analyse de son mode de fonctionnement réel à vide et/ou sous chargement.

Assez souvent, ces deux types d'analyse existent dans une même campagne d'investigations. Il peut en effet arriver qu'une défectuosité du matériau ait une incidence directe sur le fonctionnement de la structure. Inversement, le mauvais fonctionnement d'un ouvrage pour des raisons structurelles se manifeste par une détérioration, au moins partielle, de certains des matériaux constitutifs (ITSEOA - Fascicule 03).

Ce chapitre s'intéresse aux méthodes d'investigation permettant d'apprécier l'état des matériaux. Elles peuvent être classées en en deux catégories soit :

- Investigations in-situ sur le matériau en place ;
- Investigations sur prélèvement.

Ces investigations font appel à divers moyens d'auscultation qui seront décrites dans la suite.

Investigations in-situ



1. Relevé visuel

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrages. Elle consiste à aller sur site et analyser chaque élément de la structure en détail. Cela permet de fournir des données utiles et globales sur l'ouvrage (caractéristiques géométriques, les matériaux constitutifs, les éléments porteurs, l'acheminement des charges...) et le degré de détérioration visible, comme l'apparition de la fissuration et des défauts, la corrosion des armatures, etc. Il est nécessaire de répertorier tous ces données sur les plans et de créer un dossier photographique des principaux désordres afin de pouvoir les visualiser au mieux.

Les dégradations sont repérées et localisés, moyennant des outils de mesure telle que :

- Le distancemètre sert à mesurer de distances.
- Le fissuromètre, il permet le suivi et mesures de l'évolution de la fissuration.

La topographie est aussi un moyen d'inspection, qui permet de suivre les déplacements ou les déformations d'un ouvrage.

Cette première étape permet de prévoir quels sont les autres moyens de diagnostic les plus adaptés à mettre en œuvre afin de répondre pleinement à la problématique. Ces investigations complémentaires on pour but de préciser les désordres observés lors du relevé visuel, mais aussi de recueillir des informations complémentaires concernant leur constitution ainsi que leur état[Moalic LA, 2011].

2. Auscultation des bétons

Les techniques les plus utilisées sont les méthodes d'évaluation non destructives par propagation d'ondes acoustiques. Ceux sont des méthodes fondées sur l'analyse du signal issu d'une onde mécanique qui se propage à travers ou en surface d'un matériau.

L'auscultation acoustique permet de contrôler le béton du point de vue maturité (jeune âge, prise), homogénéité (ségrégation, nature, zone), détection de défauts (fissures, amas, porosité, fuites, vides), suivi des défauts dans le temps (présence ou évolution), endommagement et caractérisation mécanique (microfissuration, vides, atteintes chimiques).

Tout un ensemble de possibilités d'auscultation ayant des objectifs distincts :

- Ultrasons dit auscultation sonique
- Impact écho

- Émission acoustique
- Tomographie sismique

2.1. L'auscultation sonore

La technique d'auscultation sonore a pour objectif de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores entre deux points dans le béton. Elle consiste à générer à l'aide d'un émetteur une impulsion électrique qui est convertie, grâce aux propriétés piézoélectriques de l'élément en béton à ausculter, en des ondes mécaniques ultrasonores. Ces ondes traversent le couplant et se propagent dans tout l'élément. Puis, elles sont reçues par le récepteur et sont converties en une impulsion électrique qui revient au générateur (Figure 1).

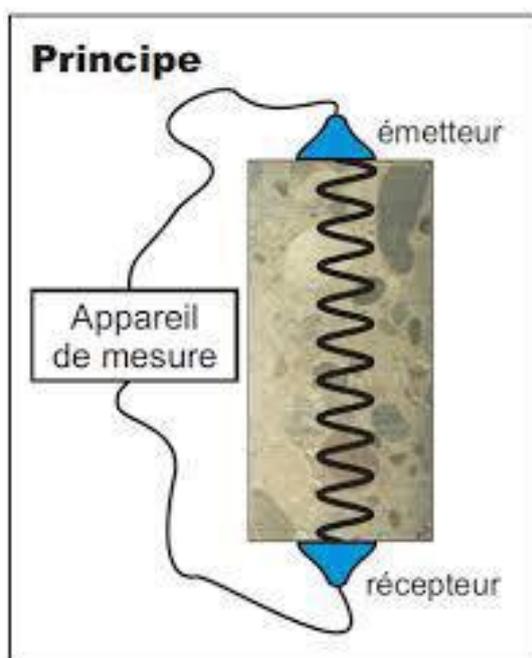


Figure 1: Mesure de la qualité du béton à ultrason

Le couplant utilisé est la pâte de contact blanche composée à 95% de vaseline. Il est appliqué à chaque nouvelle mesure afin d'avoir un bon contact entre les deux transducteurs et le béton.

L'essai peut être réalisé selon l'une des trois méthodes de configuration décrites dans la norme NF EN 12504-4 voir figure 2 : méthode directe dite « par transparence », méthode indirecte dite « de surface », ou méthode semi-directe dite « en semi-transparence ». Donc, Il n'est pas nécessaire d'avoir accès à deux faces et le matériau peut être ausculté en surface et à cœur, dépendant de la méthode de configuration.

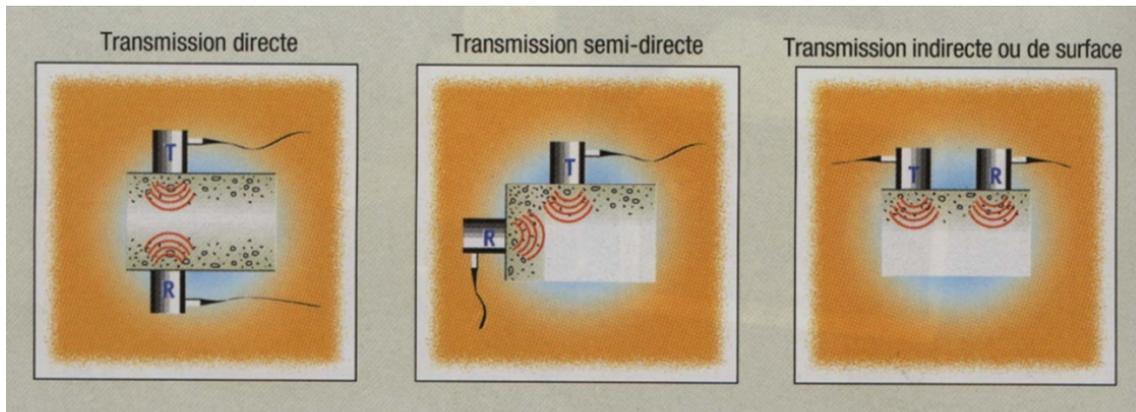


Figure 2: Type de propagations d'ondes

L'appareil mesure le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur. Connaissant la distance de l'émetteur au récepteur, notée L et le temps de propagation des ondes ultrasonores dans le béton, noté T en μs , il est possible de calculer la vitesse ultrasonore, notée V en m/s , par la relation suivante [Nguyen NT, 2014]: $V = L / T$

Cette méthode permet de déterminer la qualité physique du béton et son hétérogénéité telle que la présence et étendue des défauts, des vides ou des micro-fissurations. Mais, il est impossible d'ausculter sur un site très perturbé ou présentant un état de surface fortement altéré.

2.2. Scléromètre

C'est une technique simple, très économique pour le contrôle du béton. Son principe repose sur la corrélation entre la dureté du béton et sa résistance à la compression.

Pour déterminer la dureté du béton, la tige métallique du scléromètre est perpendiculairement appuyée sur le point de mesure, en comprimant un ressort. Lors de son rebond, le ressort entraîne un index coulissant sur une échelle graduée permettant de déterminer la valeur de rebond appelé indice sclérométrique « Is » [Nguyen NT, 2014]. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.



Figure 3: Scléromètre

Les mesures de rebond sont très locales. Il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures afin d'obtenir

un résultat cohérent. L'indice sclérométrique obtenu, qui est la moyenne des mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé, permet par des courbes graphiques spécifiques de relever la résistance présumée du béton.

Remarque

La mesure est normalisée par les normes NF EN 12504-2 et ASTM C805.

La valeur mesurée peut être affectée par différents paramètres tels que l'inclinaison du scléromètre, l'état de la surface à auscultée (rugueuse, délaminages, fissures ouvertes, traces d'eau, etc.), la répétition de mesure sur un ancien point ou encore la présence d'armatures affleurées au-dessous des points de mesure. Il peut être intéressant de coupler cette technique avec d'autres techniques non destructives (ex. ultrason) pour des analyses fiabilistes.

2.3. Impact-écho

La technique d'impact-écho a été développée à la fin des années 1980 [Nguyen NT, 2014]. Elle a pour objectif d'évaluer l'épaisseur d'éléments de structure en béton (poutres, plaques, etc.), détecter les vides, les fissures quasi-parallèles au parement, les délaminages ainsi que l'évaluation du module du d'Young dynamique béton et le repérage de gaines de précontrainte.

Le principe de cette technique repose sur l'interprétation dans le domaine fréquentiel de la réponse d'une structure soumise à un choc mécanique. Le choc et le capteur à pointe mesurant des déplacements de la surface auscultée sont situés à faible distance l'un de l'autre.

Remarque

L'analyse n'est valable que si le point d'impact est très proche du point de réception

La fréquence de résonance observable sur le spectre correspond au premier mode symétrique stationnaire d'une onde de Lamb [Gibson et al, 2005]. Elle permet de calculer le module élastique dynamique et le coefficient de Poisson. A partir de ces deux propriétés, il est possible de déduire la vitesse des ondes de compression [Villain G et al, 2011]. La présence de vides ou de délaminages dans le béton est repérée par des perturbations de la fréquence de résonance liées aux discontinuités mécaniques à cœur de l'élément.



Figure 4: Impact echo

3. Auscultation du béton armé

Diagnostic de l'état du béton armé avec des méthodes d'évaluation non destructives.

3.1. Localisation des armatures par des méthodes électromagnétiques

La localisation des armatures et l'estimation de leur diamètre et de leur profondeur d'enrobage se fait par des méthodes électromagnétiques qui sont des techniques sensibles à la présence d'armatures dans le béton.

3.1.1. Technique basse fréquence

Le relevé du ferrailage peut se faire à l'aide d'un pachomètre. C'est un appareil d'auscultation non destructif sert à localiser les armatures d'un ouvrage en béton armé, avec une précision de l'ordre de ± 5 mm, en mesurant la perturbation d'un champ magnétique généré en surface du béton. Il permet aussi de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil. Le pachomètre détecte la diffusion de ce champ magnétique ainsi que les modifications de la résonance magnétique induite par la présence d'aciers. Ainsi, l'appareil mesure la variation électromagnétique due à la présence d'éléments ferromagnétiques, les armatures [Moalic LA, 2011]. L'amplitude du signal mesuré dépend de diamètre des armatures et de l'enrobage des aciers par le béton. Plus le diamètre ou la densité d'armatures est important, plus le signal reçu par l'appareil sera important (Voir la figure 5). Au contraire, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal sera faible. Ainsi, la profondeur d'auscultation avec cet appareil est limitée couramment de l'ordre de 70 à 80 mm selon le type de bétons et le type d'armatures.

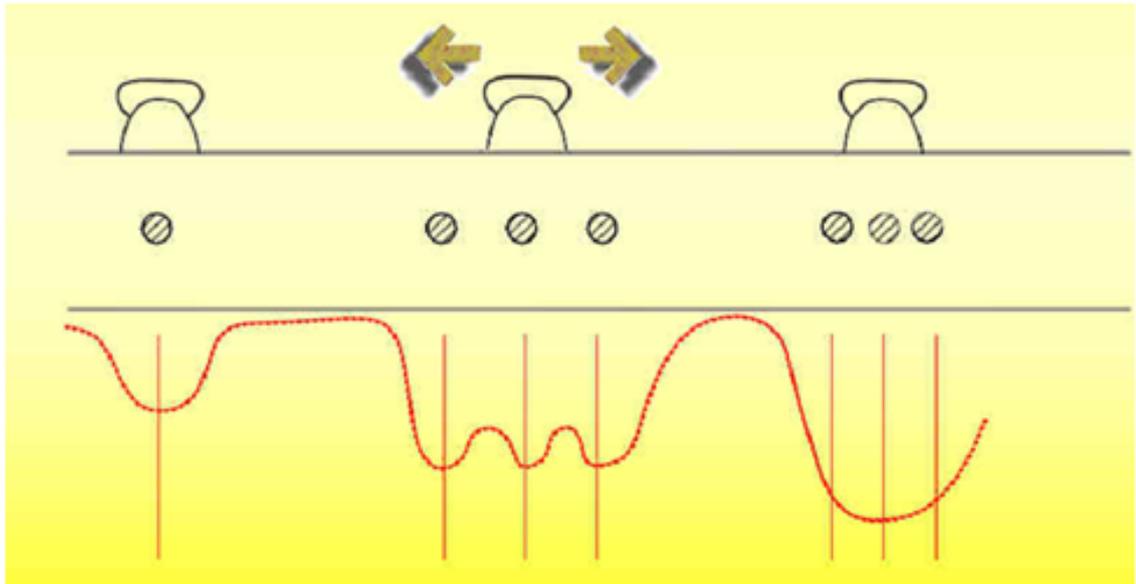


Figure 5: Réponse en fonction de la densité d'armatures [Moalic LA, 2011]

3.1.2. Technique radar

Le principe de cette technique consiste à enregistrer les signaux temporels des ondes électromagnétiques qui se propagent et se reflètent partiellement à chaque interface de deux matériaux électro-magnétiquement différents. La juxtaposition des signaux enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar le long d'un profil permet d'obtenir une image radar correspondant à une coupe temps en profondeur de l'élément ausculté.

Par ailleurs, il est nécessaire de connaître la vitesse ou l'amplitude des ondes électromagnétiques dans le béton pour transformer une coupe-temps en section. Car la vitesse et l'amplitude de l'écho radar dépendent de la constante diélectrique du matériau qui est dépendant des teneurs en eau et en chlorures des bétons.

Un avantage principal de cette technique est l'auscultation totalement non destructive et rapide à grande échelle et en profondeur (dépendant de la permittivité du milieu). Il est possible d'observer des signaux radars directement sur l'écran du système d'acquisition (figure). Cette technique est souvent réalisée en premier car les mailles d'armature sont repérées à l'avance. Les positions des axes des armatures sont par la suite tracées sur la surface auscultée [Nguyen NT, 2014]. Le radar permet aussi la localisation rapide des cavités et des défauts (vides, fissures, délaminages) ainsi que l'évaluation des épaisseurs des différents matériaux (sol en place, remblais, éléments de structure...).

4 Conseil

Cette technique peut être également utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres essais non destructifs plus locaux (résistivité électrique, ultrason) pour améliorer l'évaluation des propriétés des bétons (ex. saturation, porosité, résistance mécanique).

Remarque

Les applications de la technique radar sont présentées dans les normes ASTM D4748, ASTM D6087, ASTM D6429-99, ASTM D6432-99.

3.2. Caractérisation de l'état de corrosion des armatures par des méthodes électriques

Les méthodes électriques sont souvent utilisées pour caractériser l'état de corrosion des armatures dans le béton. Les techniques disponibles sont listées comme suivantes: le potentiel de corrosion, la résistance de polarisation (vitesse de corrosion) et la résistivité électrique.

3.2.1. Potentiel de corrosion

L'essai de potentiel de corrosion est l'essai le plus fréquemment utilisé pour détecter les zones de corrosion actives des éléments en béton armé.

Il s'agit de mesurer, à l'aide d'un voltmètre à haute impédance, la différence de potentiel entre l'armature du béton mise à nu (la connexion nécessite un forage) et une électrode de référence placée sur le parement de béton ausculté (Figure 6). Il est important d'assurer la conductivité électrique par un mouillage de la surface du parement. Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence.

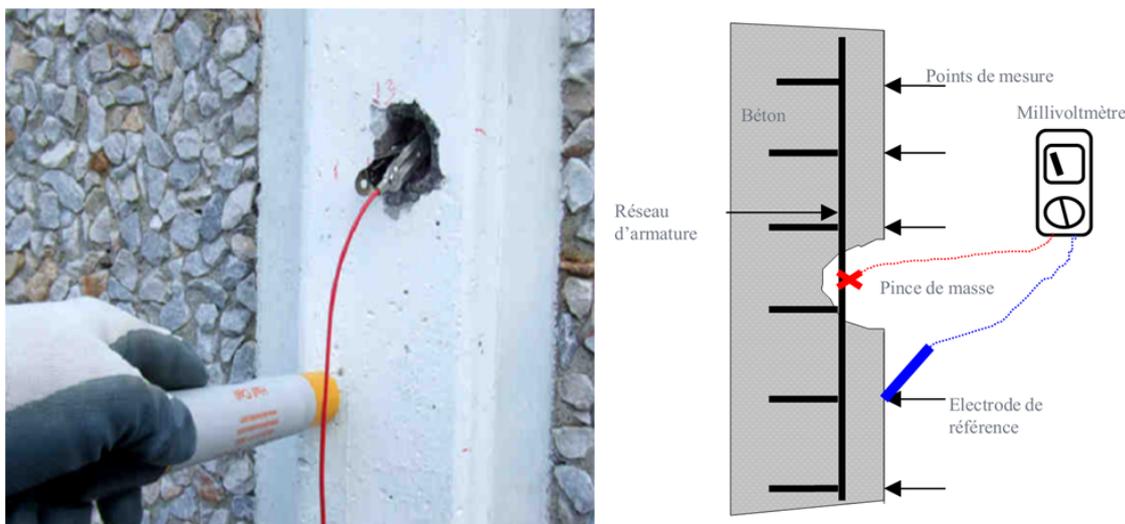


Figure 6: Mesure du potentiel de corrosion.

En effectuant ainsi des mesures en de nombreux points d'un élément, il est possible de présenter les résultats sur une cartographie complète de potentiel électrique (figure 7) et les interprétés par des seuils représentatifs d'une probabilité de corrosion. Ces seuils sont recommandés dans la norme ASTM C876-91 et la RILEM TC 154-EMC (2003).

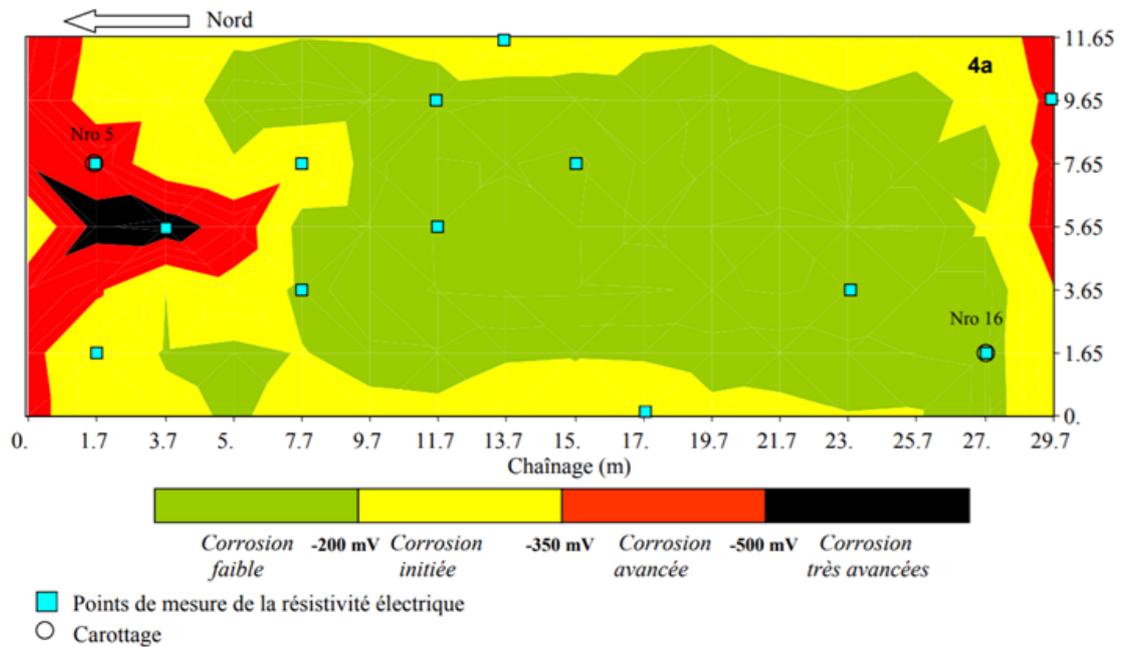


Figure 7: la cartographie de potentiel de corrosion.

3.2.2. La résistivité électrique

L'objectif de cette technique non-destructive est de mesurer la résistivité apparente des bétons de surface à l'aide d'une sonde Wenner à 4 électrodes alignées et équidistantes (Voir figure 8).

Elle est basée sur la diffusion d'un champ électrique dans un volume de béton situé sous la surface d'auscultation. Un courant électrique continu « I » est injecté dans le béton à l'aide de deux électrodes et une différence de potentiel résultant de ce champ électrique « V » (réponse du milieu) est mesurée entre deux autres électrodes. La résistivité « ρ » calculée dépend de l'espacement des électrodes « a ».

$$\rho = 2 \pi a V / I \text{ [k}\Omega\text{cm]}$$

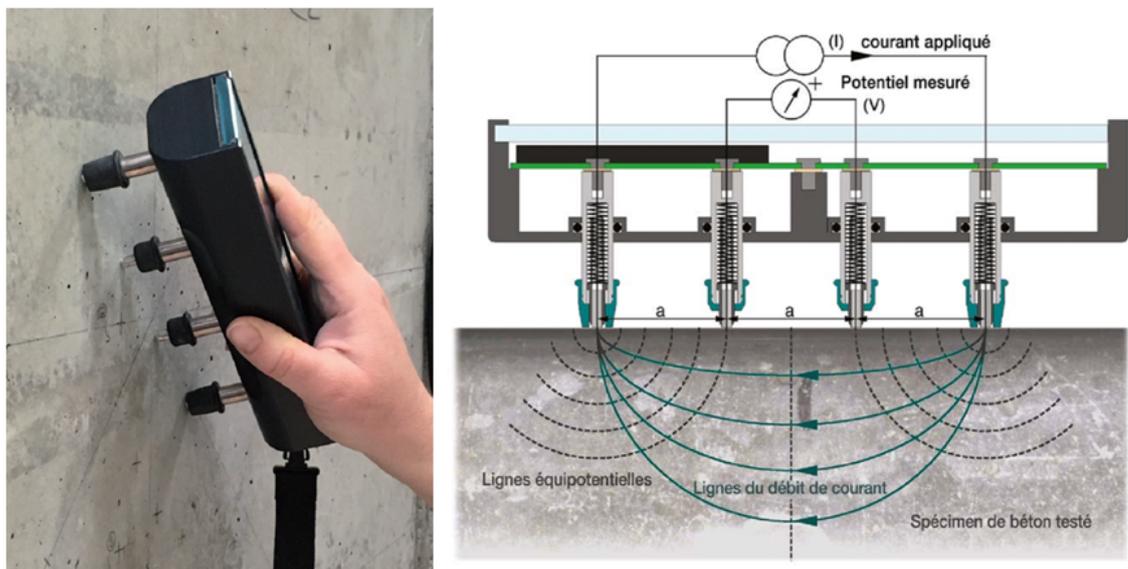


Figure 8: Résistivimètre de type Wenner

Les résultats des mesures de la résistivité électrique se présentent souvent sous forme de carte des iso-valeurs qui permet de quantifier la variabilité des bétons, localiser les zones de corrosion d'armature, Cartographier les gradients d'humidité ou de pollution ionique.

La recommandation RILEM TC 154-EMC (2001) présente une description générale de méthodes pour la mesure sur site de la résistivité du béton.

La mesure de la résistivité électrique sert d'abord comme une technique complémentaire aux mesures de potentiel de corrosion et la résistance de polarisation pour une meilleure évaluation de l'état de corrosion des armatures.

3.2.3. La résistance de polarisation

La mesure de résistance de polarisation repose sur la réponse du système acier-béton soumis à une faible perturbation électrique.

Elle dépend de l'épaisseur et de la résistivité électrique du béton d'enrobage. Les résultats s'expriment en termes de vitesse de corrosion, en millimètre d'acier perdu par an (mm/an). Les niveaux de corrosion sont classés dans la recommandation RILEM TC 154-EMC (2004).

Mesure de la vitesse de corrosion caractérise l'activité de corrosion, fournit une grandeur caractéristique quantitative de l'état instantané de corrosion, sous forme d'une cinétique de perte de métal.

4. Méthodes radiographiques

La radiographie est basé sur l'atténuation du rayonnement X ou γ (gammagraphie) émis par une source artificielle, en fonction de la nature, de la densité et de l'épaisseur du matériau traversé. Le résultat obtenu se présente sous forme d'une image en niveaux de gris. En cas de présence de défaut, ceci engendrera généralement des teintes plus sombres (présence d'air ou de gaz par exemple) ou parfois plus claires (présence d'inclusions solides particulières).

L'application de ces techniques concerne tous les types de structure, et les différents matériaux de construction (le béton, le béton armé, le béton précontraint, la pierre, les métaux, etc). Elle est une technique très fiable qui permet de :

- Observer les cavités présentes dans le matériau et les coulis d'injection dans les conduites de précontrainte ;
- Repérer les conduites, les câbles précontraints et les armatures ainsi que leurs diamètres ;
- Identifier les fils ou torons détendus ou rompus, les reprises de bétonnage, hétérogénéité, discontinuités de matière au droit des joints de construction, etc.

Cette technique nécessite un accès aux deux faces de la structure à étudier et elle est souvent utilisée à l'aide de films positionnés à la face opposée de la surface auscultée. Il s'agit d'une technique coûteuse, complexe, et d'exigences en matière de formation et de réglementation. Elle est courante jusqu'à une épaisseur de 60 cm, mais l'utilisation des rayons X à haute énergie produits par les

accélérateurs permet d'atteindre 120 cm.



Remarque

La mesure de radiographie est normalisée conformément aux normes françaises NF A 09-202 apparue en 1999, NF EN 25580, NF EN 1330-3, NF EN 584-1, NF EN 584-2.

5. Méthodes thermiques

Les méthodes thermiques sont connues dans le domaine d'auscultation non destructive sous forme de techniques de thermographie infrarouge.

Les techniques de thermographie infrarouge sont classées par la nature de source thermique en deux groupes principaux : la thermographie infrarouge passive et la thermographie infrarouge active. La technique la plus souvent utilisée pour l'auscultation d'ouvrages de construction et la mise en évidence d'anomalies c'est la thermographie infrarouge passive.

Le principe est basé sur le gradient de températures sous-jacentes naturelles ou artificielles du matériau hétérogène présentant une anomalie (discontinuité) ou un défaut (cavité, délaminage, décollement, fissure), un tracé d'humidité, un foyer d'incendie, etc.

C'est une technique non destructive à grand rendement. Les mesures peuvent être effectuées rapidement sans contact sur grande surface. Elle permet d'établir une carte de température de la surface auscultée à l'aide d'une caméra infrarouge mesurant des rayonnements thermiques. La carte de température s'affiche sous forme de thermo-grammes (une image bidimensionnelle de variations de température sous-jacente, qui permet une analyse qualitative des anomalies présentes à la surface auscultée). Les données enregistrées peuvent être étudiées à partir d'un ordinateur, équipé d'un logiciel de traitement d'image spécifique.

La thermographie infrarouge passive permet de localiser une anomalie, de distinguer certains types d'anomalies et de déterminer la dimension horizontale de ces anomalies. Mais avec une limitation au niveau de la détermination de la profondeur de défauts.

en violet [Moalic LA, 2011]. La profondeur de carbonatation du béton à mesurée est l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton.

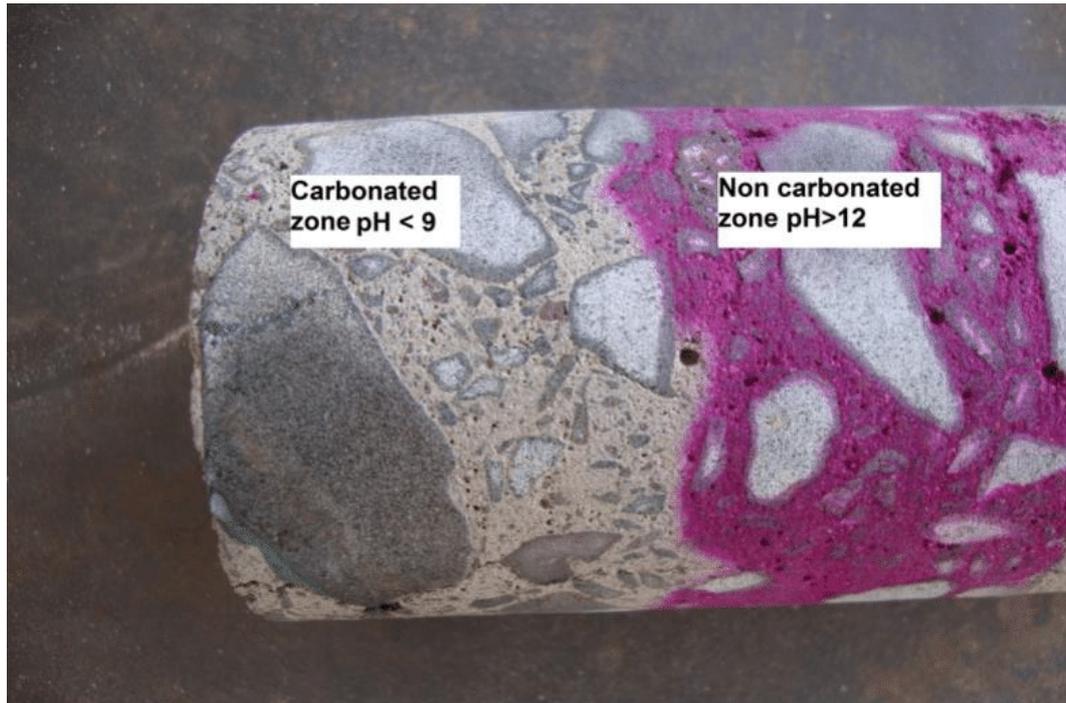


Figure 9: La profondeur de carbonatation sur carotte [E Possan et al, 2017]

4. Analyse minéralogique complète du béton

L'objectif est d'expertiser à l'aide d'analyses physico-chimiques un échantillon de béton suspecté de présenter une pathologie ou dont la composition est à évaluer.

L'analyse minéralogique détaillée permet de caractériser la compacité du béton, d'identifier la nature du liant et des granulats et de déterminer la formule simplifiée du béton (dosage en ciment, eau et granulats). Elle permet aussi de détecter la présence éventuelle de substances délétères à l'origine des désordres observés sur structure (gels d'alcali-réaction, ettringite différée, thaumasite, etc.) et de diagnostiquer des bétons incendiés.

Cette analyse peut éventuellement être complétée par des essais ou des mesures spécifiques, en fonction de la pathologie précise que l'on cherche à expertiser.

Choix des méthodes d'auscultation



La sélection des méthodes d'auscultation dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres [Moalic LA, 2011].

- Du type de mission à réaliser ;
- De la nature des matériaux ;
- Du type de structure ;
- De l'environnement de l'ouvrage ;
- De l'état de l'ouvrage ;

Donc, il est primordial d'évaluer ces paramètres afin de mettre en œuvre les moyens adaptés pour répondre pleinement à la mission. D'autres considérations doivent être prises en compte lors du choix de méthodes telles que : la disponibilité et la fiabilité des étalonnages, la précision des résultats, l'aspect économique...

Complémentarité des essais

IV

Toutes les méthodes d'essai qui sont disponibles pour l'évaluation de béton souffrent de limitations, et la fiabilité est souvent remise en question, donc l'utilisation successive, combinée ou simultanée de deux ou plusieurs méthodes peut aider à surmonter certaines de ces difficultés, ainsi que l'information fournie par le couplage sera alors plus riche que la simple somme des informations fournies par chaque méthode.

Conclusion



IV

Ce chapitre s'articule sur l'auscultation des ouvrages et les différentes techniques disponibles et utilisées pour déterminer les types de pathologies qui affectent l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet de faire des prévisions quant à l'évolution de ces endommagements et de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Il faut s'assurer aussi que les techniques de réparation adoptées sont durables en travaillant sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies similaires.

Les différents matériaux et méthodes de réparation des ouvrages endommagés sont le sujet du chapitre suivant.