

Contrôle Non Destructif des ouvrages d'arts: Un point de vue français sur l'organisation, les besoins et les développements en cours

Jean-François LATASTE

Université Bordeaux 1, I2M, CNRS-UMR 5295, B18, avenue des facultés, 33400 Talence,
France – jean-francois.lataste@u-bordeaux1.fr

Résumé

Dans les pays industrialisés tels que la France ou le Québec, bon nombre d'infrastructures ont été construites en béton armé et datent de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Ces structures peuvent présenter aujourd'hui des signes d'altération, d'endommagement, qui nécessitent des travaux plus ou moins lourds. Le contexte actuel fait qu'il est souvent plus avantageux de réhabiliter les ouvrages défectueux plutôt que d'en construire des neufs. L'intérêt est dans un premier temps économique, mais aussi environnemental si on considère la réduction du volume des déchets qui en résultent (tant au niveau des gaz émis lors des chantiers que des déchets solides finaux). Nous présentons ici l'état des préoccupations liées à l'auscultation des ouvrages, et plus particulièrement aux contrôles non destructifs (CND). Dans un premier temps un état de l'art sur l'organisation des CND est proposé. Il s'agit de situer le CND dans le paysage de la gestion des ouvrages : cerner leurs potentiels, leurs intérêts et leurs limites. La question des différents acteurs est aussi évoquée, en soulignant particulièrement les attentes des gestionnaires, celles des ingénieurs et celles des évaluateurs. Enfin quelques développements récents sont présentés dans le domaine des CND, présentant ainsi ce que pourrait être la nature des réponses données par le CND à court et moyen termes.

1. Introduction

Nombre d'ouvrages français datent de la période de reconstruction de la France après-guerre, et des trente années de prospérité économique qui suivirent. D'autres sont encore plus anciens et ont été érigés au début du siècle. Tous ces ouvrages ont vieilli et des altérations apparaissent avec le temps. Le contexte actuel fait qu'aujourd'hui il est souvent plus avantageux de réhabiliter les ouvrages défectueux plutôt que d'en construire des neufs. L'intérêt est dans un premier temps économique, mais aussi environnemental si on considère la réduction du volume des déchets qui en résultent (tant au niveau des gaz émis lors des chantiers que des déchets solides finaux). En France, les moyens nécessaires à la remise en état du réseau national (routes, équipements et ouvrages) sont estimés à plus de 2000 M€ et les moyens alloués par l'Etat pour le renforcement des ouvrages d'art du réseau national sont d'environ 100 M€/an⁽¹⁾. Au Québec, On trouve dans l'actualité récente plusieurs cas d'accidents liés au vieillissement des structures en béton armé (cas de l'effondrement sur l'autoroute Ville-Marie en août 2011⁽²⁾, ou le cas du Viaduc de la Concorde en 2006⁽³⁾ par exemple) qui traduisent l'importance de l'enjeu.

¹ <http://www.senat.fr/rap/r07-196/r07-196.html>

² <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/328507/effondrement-sur-l-autoroute-ville-marie-le-beton-encore-montre-du-doigt>

Face à cette problématique les maîtres d'ouvrage sont à la recherche d'éléments permettant une vraie politique de gestion des travaux. Les maîtres d'œuvres en charge des travaux ont à leur disposition plusieurs outils leur permettant d'approcher l'état de l'ouvrage. Nous présentons dans cet article les techniques de Contrôles Non Destructifs (CND), leurs intérêts, leurs avantages et limites et les futurs développements déjà en cours.

2. Définition des CND

2.1. Pourquoi ausculter ?

L'auscultation d'un ouvrage est un ensemble d'examen et de mesures spécifiques destinés à établir un diagnostic de l'état d'un bâti. Dans l'absolu le premier intérêt d'une auscultation est de vérifier la viabilité immédiate d'un ouvrage, s'assurer que l'ouvrage est sûr [1]. La notion de risque liée à une construction doit rester au premier rang des préoccupations du gestionnaire. Mais il existe plusieurs raisons susceptibles de motiver une auscultation :

- sur un ouvrage a priori sain, il peut s'agir d'estimer, de vérifier ou de contrôler les caractéristiques de la construction,
- sur un ouvrage supposé endommagé, l'auscultation peut être utilisée pour détecter l'extension de cet endommagement,
- sur un ouvrage visiblement endommagé, on peut faire appel à l'auscultation pour caractériser cet endommagement.

2.2 Limites des méthodes destructives

La collecte des informations est l'étape nécessaire à l'établissement du diagnostic d'un bâti. Le prélèvement d'échantillons pour analyses ou tests en laboratoire est la solution la plus fine pour décrire le matériau, étant donné l'ensemble des techniques possibles, et leur précision. Toutefois il existe quelques réserves à cette manière de procéder :

L'information obtenue est à l'échelle du prélèvement : or il existe plusieurs échelles pour l'étude d'un édifice. On peut en étudier soit (figure 1) :

1. la structure : il s'agit alors schématiquement d'étudier les éléments de dimensions supérieures au mètre (poutres, dalles,...)
2. le matériau à l'échelle macroscopique : c'est à dire les dimensions comprises entre le mètre et le millimètre et pouvant être à l'origine de désordres (tels que les fissures, délaminages, nids de cailloux, défauts qui peuvent altérer les fonctions mécaniques de l'ouvrage, ou d'étanchéité par exemple). Ces défauts peuvent expliquer des désordres à l'échelle de l'ouvrage.

³ http://www.cevc.gouv.qc.ca/UserFiles/File/Communiqués_de_presse/Communique_117.pdf

3. les caractéristiques microscopiques du matériau : celles inférieures au millimètre telle la porosité, les interfaces pâtes granulats, ou la nature de l'eau interstitielle. Elles sont déterminées en laboratoires pour la plupart.



Figure 1. Les échelles d'étude : Structure, élément de structure, matériau

Les grandeurs issues de mesures sur carottes sont locales : elles ne peuvent être généralisées sans hypothèse supplémentaire. De plus sans information préalable, la localisation du prélèvement est réalisée au hasard, donc dans des zones pas forcément représentatives.

Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements : soit pour des raisons d'accessibilité, soit pour des raisons de sensibilité de l'ouvrage (une centrale nucléaire par exemple ne peut subir sans préjudice de dégradation liée à un carottage).

2.3 Intérêt des méthodes d'Evaluation Non Destructives (END)

Les développements effectués dans des domaines tels que la géophysique permettent de mesurer dans les sols des caractéristiques voisines de celles considérées pour l'étude des bétons. Ces techniques sont adaptées aux conditions de mesures sur site, elles sont généralement rapides à mettre en œuvre, et d'un coût raisonnable [2]. L'ensemble de ces atouts permet de les utiliser en continu lors de l'étude d'ouvrages de grandes dimensions.

Il s'agit en général de mesurer des grandeurs physiques locales, pour ensuite en déduire des propriétés mécaniques qui leur sont directement liées. Les techniques d'Evaluation Non Destructive (END) sont utilisées pour obtenir des informations de différentes natures. Les possibilités de ces méthodes vis à vis des désordres sont :

- la détection (repérer une altération des caractéristiques du matériau)
- la localisation (préciser le site de l'altération par rapport à la zone auscultée),
- l'étendue (préciser les limites géométriques de cette altération),
- la caractérisation (déterminer le type d'altération observée),
- la quantification (donner l'importance de l'altération, par exemple : caractériser l'ouverture d'une fissure, ou le degré d'activité d'une corrosion d'armature),
- le suivi dans le temps (être capable d'observer une éventuelle évolution dans le temps de la gravité ou de l'étendue de l'altération, au cours de mesure successives).

Afin d'obtenir l'information la plus complète et étant données les possibilités de chacune des méthodes, l'exploitation des résultats peut être faite de différentes manières. On les combine souvent à d'autres sources afin d'en faciliter l'interprétation ou d'en enrichir le contenu :

Travail en relatif : il permet de suivre l'évolution des caractéristiques du matériau sur une surface, sur une population d'ouvrages identiques, motivant ainsi la localisation de prélèvements afin de les rendre plus pertinents tout en limitant leur nombre (Figure 2). La mesure en relatif peut aussi être réalisée dans le temps permettant un suivi de la cinétique du désordre.

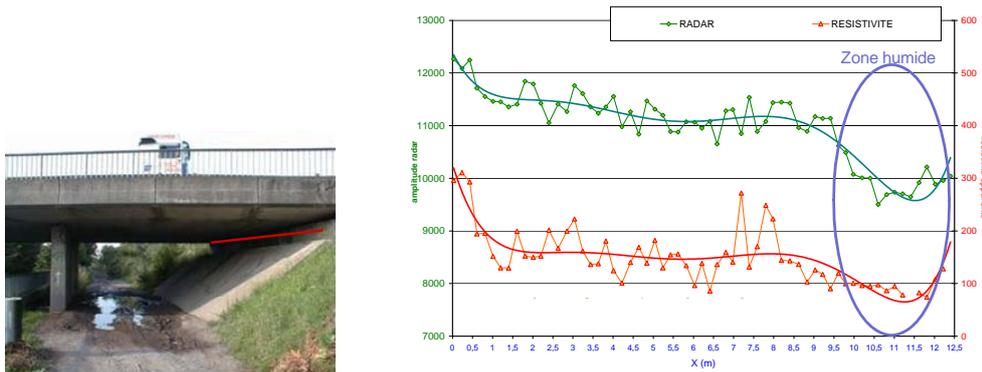


Figure 2. profil de mesure radar et résistivités électriques sur un chevron de pont – détermination de la zone humide

Travail en couplage avec d'autres CND : la combinaison de données issues de différentes méthodes peut permettre de limiter les hypothèses et d'affiner l'interprétation.

Travail en couplage avec des méthodes destructives ou semi-destructives : la technique CND permettant des mesures relatives, un recalage des valeurs par rapport à une donnée absolue (déterminée généralement par un essai destructif) permet de quantifier les valeurs en tout point de la surface auscultée.

Les méthodes d'auscultation non destructives sont donc souvent intégrées dans une « stratégie d'auscultation » réfléchie, qui combine les résultats de mesures à d'autres sources d'information.

3. Identification des besoins et des outils

3.1. Les besoins des maîtres d'ouvrage

Les données permettant l'évaluation de l'état d'endommagement d'un ouvrage sont multiples. On peut classer les informations recherchées classiquement en 4 catégories selon leur nature ou leur origine :

Caractéristiques de l'ouvrage

- mesure de l'épaisseur de béton

- mesure de l'enrobage des aciers
- positionnement du ferrailage passif / actif
- dimensionnement du ferrailage passif / actif

Caractéristiques de matériau

- évaluation de la résistance mécanique du béton
- détermination de la porosité
- détermination du degré d'humidité relative

Caractéristiques pathologiques

- détection et localisation de vides et d'hétérogénéités
- dimensionnement de vides et d'hétérogénéités
- détection et localisation d'une fissuration (normale à la surface)
- typologie des fissures (traversantes, actives...)
- dimensionnement d'une fissuration (normale à la surface)
- détection et localisation d'une microfissuration
- dimensionnement d'une microfissuration
- détection et localisation d'une délamination (parallèle à la surface)
- dimensionnement d'une délamination (parallèle à la surface)

Caractéristiques issues du vieillissement

- détection et dimensionnement d'une corrosion des aciers passifs / actifs
- détection et dimensionnement de dépôts en surface du béton (mousses ..)
- évolution de la solution interstitielle
- évolution microstructurale du béton (carbonatation par exemple...)

3.2. Les outils

De la même manière que les besoins peuvent être définis, on peut établir une liste des méthodes. Celle-ci est proposée ci-dessous, par famille.

Les inspections visuelles

La plus simple et la plus immédiate des méthodes, l'inspection visuelle n'en est pas moins une auscultation non destructrice d'une surface. Les pathologies les plus courantes ont été décrites afin d'aider à la reconnaissance et au diagnostic [2]. La technologie est aussi venue soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (caméras et appareils numériques), des moyens d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation. Le suivi topographique des ouvrages est aussi un moyen d'inspection qui va permettre de suivre déplacements ou déformation d'un ouvrage dans le temps.

Les méthodes soniques et ultrasoniques

Les techniques d'auscultation sonique sont largement utilisées dans les domaines de la métallurgie. Elles sont dérivées des méthodes géophysiques sismiques et reposent sur l'interprétation soit en temps soit en fréquence de l'onde réponse en fonction de l'onde émise (son ou choc). Les techniques sont : mesure de la vitesse de propagation du son, impact écho, émission acoustique, ultrasonic pulse velocity (UPV), ultrasonic pulse echo (UPE), analyse spectrale des ondes de surface, tomographie acoustique,...

Les méthodes radar et électromagnétiques

Le principe repose sur l'émission d'une onde électromagnétique, et de l'analyse du signal induit. Ce sont les développements des antennes à hautes et très hautes fréquences qui ont permis la transposition de ces méthodes au génie civil. Ce sont des méthodes particulièrement bien adaptées aux mesures de géométrie (épaisseur, enrobage, détection d'interface, ...)

Les méthodes thermiques

Il s'agit de mesurer la réponse d'un ouvrage aux variations de températures (naturelles ou artificielles). Les mesures sont effectuées dans le domaine de l'infrarouge. Ce sont des méthodes sans contact, adaptée à la détection.

Les méthodes électriques

Elles reposent sur la mesure des différences de potentiel, des intensités des courants ou de la capacité au sein du matériau, dus soit à des réactions électrochimiques dans le matériau, soit à des sollicitations artificielles. Cette famille regroupe les méthodes suivantes : mesure de la résistivité électrique, mesure du potentiel de corrosion (potentiel d'armature), mesure de la résistance de polarisation. Beaucoup d'application dans le domaines de la corrosion des aciers.

Les méthodes radiographiques

Il s'agit des techniques classiques de radiographie : la surface à ausculter est exposée à un rayonnement gamma, qui après avoir traversé le matériau impressionne un film photographique. Des techniques de radiographie aux rayons X (nettement moins dangereuses) sont en développement pour être transposables in situ. On distingue les méthodes suivantes : gammagraphie, radiographie, radioscopie. Elles restent des méthodes lourdes à mettre en œuvre, notamment du fait des aspects réglementaires.

Les méthodes de mesure des déplacements

On suit l'évolution des déplacements et déformations au cours du temps sous sollicitations de service, ou artificielles. L'étude de la relation contraintes-déformation de la structure permet d'évaluer l'état mécanique de l'ouvrage. Ces techniques sont utilisées notamment sur les ouvrages précontraints pour lesquels efforts et déformations vont être mesurés sur les câbles de précontrainte. Les méthodes de cette catégorie sont : la shearographie et l'holographie, ou

plus localement la méthodes de l'arbalète, la mesure de la libération des contraintes, et la mesure des moments de décompression.

4. Organisation générale de l'auscultation

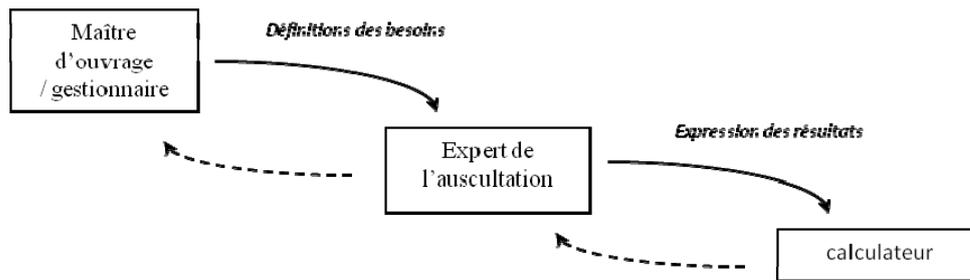
Les paragraphes précédents, présentant les symptômes et les différentes méthodes d'auscultation, illustrent l'étendue du problème. Chaque cas a sa réponse, et il est délicat de généraliser des règles dans le domaine de l'auscultation des ouvrages. Il peut donc exister un problème de communication entre les différents intervenants sur ce type de travaux, considérant que maître d'ouvrages, experts de l'auscultation et calculateur ont des cultures distinctes. Structurer les différentes phases d'une étude doit permettre de résoudre en partie ce problème.

4.1. Etude préliminaire à l'auscultation.

Il est nécessaire, avant toute auscultation, de connaître l'ouvrage. Ainsi l'âge, la destination initiale du bâtiment, ainsi que son utilisation effective sont des données qui permettront d'émettre des hypothèses quand au type de désordres que l'on peut trouver. L'évolution de l'environnement autour de l'ouvrage son utilisation et les travaux subis pendant son histoire sont aussi prépondérants. Cette étude doit servir à retrouver les plans initiaux (plan de ferrailage, étude de fondations...), plan d'exécution des ouvrages (PEO), ou dossier des ouvrages exécutés (DOE), qui pour la plupart des ouvrages ne sont plus disponibles [2].

Durant cette phase une visite du site s'avère utile afin de constater les conditions d'accessibilité, l'environnement,... . Ces observations, quoique très pratiques, peuvent être déterminantes dans le choix de la méthode d'auscultation qui sera utilisée ou même dans le type de réparations à envisager.

L'une des difficultés identifiées sur ce type de projet est la multiplicité des opérateurs. Sur une question posée (« faut il faire des travaux sur l'ouvrage ? ») chacun a son approche, ses objectifs, et ses réponses. De manière un peu caricaturale : le gestionnaire considèrera l'impact lié à la fermeture éventuelle de l'ouvrage, et le mettra en relation avec les coûts des travaux immédiats et à plus long terme ; l'expert de l'auscultation considèrera les mesures les mieux appropriées, leur nombre localisation et le type de réponses possibles concernant la caractérisation des altérations ; l'ingénieur structure considèrera les valeurs des paramètres mécaniques qui lui faut, les sections d'aciers et les coefficients de sécurité à prendre en compte. Leurs cultures sont diverses et il faut donc prendre un soin particulier à la phase de l'expression des besoins puis à celle du rendu des résultats. Les différents interlocuteurs ne pourront travailler efficacement que si leurs problématiques respectives sont correctement définies. Le schéma classique est le suivant :



4.2. Le « devis »

Cette étape correspond à l'expression des besoins et des objectifs du maître d'ouvrage à l'expert. A l'issue de cette étape le gestionnaire du projet veut connaître l'ampleur des pathologies afin de pouvoir estimer le type de travaux à entreprendre, la durée de chantier et le coût total de l'opération. L'auscultation est avant tout un outil d'aide à la décision.

Les études ont laissé apparaître que cette phase est primordiale et que toute ambiguïté sur la définition des données nécessaires à la poursuite du projet est préjudiciable. Il existe deux approches à ce problème :

- soit on présume de la nature des désordres que l'ouvrage présente et on choisit alors la technique que l'on sait être adaptée à cette recherche,
- soit, dans le cas d'absence d'opinion sur la pathologie de l'ouvrage, on choisit une méthode d'auscultation en connaissant les domaines d'application de celle-ci.

Quel que soit le cas considéré, l'établissement du programme d'investigations le plus adapté au problème passe par une collaboration étroite entre les gestionnaires et les experts, mais aussi les calculateurs. L'auscultation est finalement définie sous la responsabilité du maître d'ouvrage [1].

La différence de culture entre les intervenants du projet reste un problème majeur. Sur les chantiers importants, le gestionnaire peut déléguer son pouvoir de décision à une personne plus qualifiée que lui dans le domaine de l'END, afin d'exprimer les besoins de manière claire et de définir le programme d'auscultation le plus adapté. La difficulté reste entière pour les chantiers plus petits où la personne en charge de ce poste n'a pas forcément la capacité de le faire. La notion de superviseur est donc parfois évoquée par les différentes parties de ce type de projet ; cet intermédiaire (ayant la double culture nécessaire et restant neutre dans le projet) devant estimer les besoins d'auscultation et la pertinence des méthodes choisies.

4.3. La mesure et les résultats

Les techniques issues de la géophysique sont généralement des techniques fines et sensibles à beaucoup de paramètres. L'utilisation en boîte noire de ces méthodes n'est pas envisageable. Elles demandent que le manipulateur ait une connaissance des principes physiques de la technique afin d'en évaluer la pertinence (dès la phase de mesure !) au vue des conditions environnantes. Les sources et la nature des biais possibles doivent être estimées in situ.

Les techniques de contrôle non destructif requièrent souvent un haut niveau de technicité pour une interprétation correcte des résultats. La subjectivité de l'ingénieur chargé de cette tâche n'est pas négligeable. La part de l'expérience est importante dans ce domaine.

Il reste à mettre en forme les résultats de manière à les rendre compréhensibles pour le gestionnaire ou utilisables par le ordinateur (Figure 3).

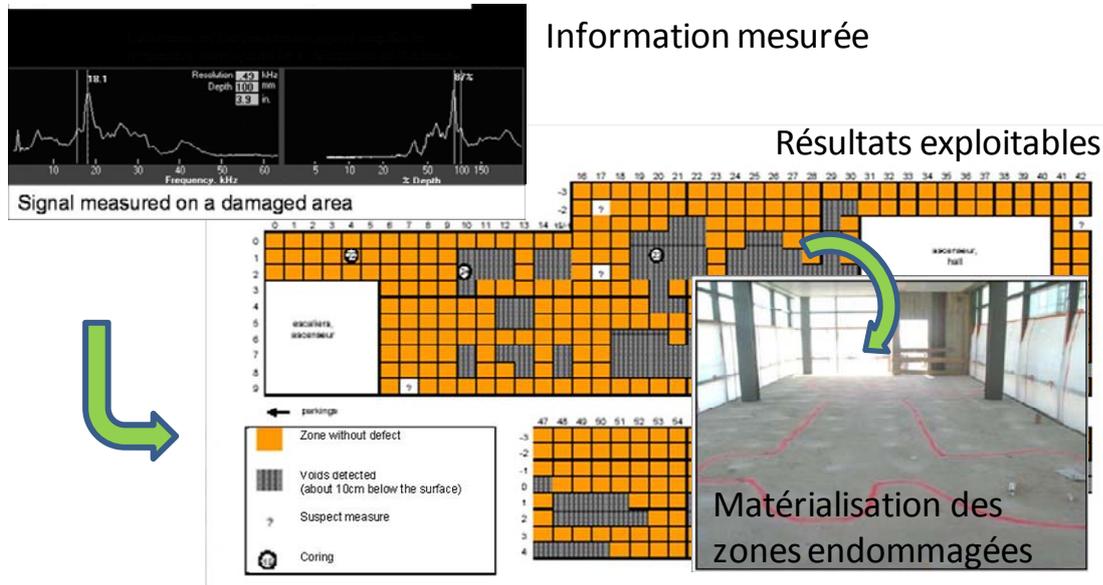


Figure 3. Détection et localisation de délamination

Les moyens informatiques actuels laissent apparaître les possibilités de représentations graphiques claires. Il est toutefois difficile pour les experts de donner des valeurs définies fixes aux calculateurs alors que l'interprétation des mesures géophysiques reste un domaine plein de nuances.

Les modèles de calculs sont alors exploités, différentes analyses des résultats sont possibles, mais généralement à ce jour l'exploitation des données vise à zoner un ouvrage (déterminer des secteurs homogènes, voire les « noter » par rapport à des seuils établis dans la littérature ou sur l'ouvrage par des prélèvements).

5. Limites actuelles et perspectives

5.1. Faiblesses des CND

Les techniques de CND sont de plus en plus utilisées car leur potentiel est de plus en plus évident face aux questions posées en terme d'évaluation de l'état des ouvrages. Toutefois, elles inspirent encore parfois manque de confiance qui réside principalement dans leur faiblesses. Elles sont de trois natures principalement.

La première raison est purement pratique : les experts en CND, vers qui le maître d'ouvrage peut se tourner pour avoir un avis sont rarement indépendants. Ainsi il y a toujours une crainte

que le conseiller ait un intérêt à suggérer une méthode plutôt qu'une autre qui pourrait être plus pertinente [3].

La seconde raison est intrinsèque aux techniques de CND : pour la plupart elles sont influencées par un grand nombre de paramètres (teneur en eau du béton, température de l'air, du matériau, état de surface, diverses sources de bruit...). Ainsi dans les cas les plus défavorables l'interprétation peut s'avérer particulièrement délicate voire impossible.

Enfin la dernière raison est la nature des résultats qui nécessitent généralement un traitement puis une phase d'interprétation. Les techniques CND mesurent des paramètres physiques qui sont reliés aux paramètres recherchés pour l'évaluation, par l'intermédiaire de lois de comportement (figure 4).

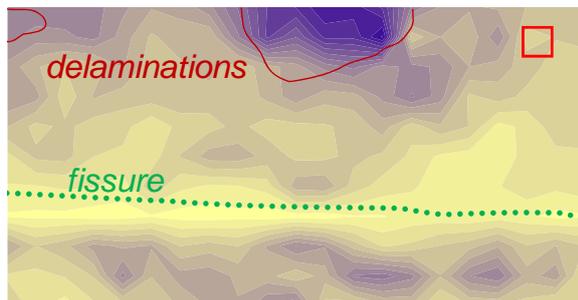


Figure 4. cartographie de résistivité électrique

Pour lever ces limites, et pour exploiter pleinement les potentiels de ces techniques la R&D poursuit les travaux dans différentes directions. En France des projets de recherche réunissent différentes équipes autour du CND (notamment à travers les projets ANR-SENSO⁴, ANR APPLLET⁵, et ANR EVADEOS⁶, C2D2-ACDC⁷). Les nouveaux développements en cours portent sur les points évoqués ci-dessous.

5.2. Amélioration de la représentativité des mesures

Une question qui accompagne toujours une valeur de paramètre doit être sa représentativité : « à quelle surface/volume puis-je étendre cette information ? », « quelle est l'information que je peux lui rattacher ? ». L'intérêt des techniques de CND est généralement qu'elles permettent de faire beaucoup de mesures, et donc d'appréhender la variations de propriétés. Leurs limites est la difficulté parfois à la rattacher au paramètre mécanique exploitable. Dans un premiers temps, il faut être capable d'identifier une variation significative de propriétés, distinguer la variabilité de la mesure liées à l'appareillage, et au protocole, de la variation de propriété du matériau (information recherchée – figure 5). Ce travail sur les différentes échelles de variabilité est pris en compte au niveau de la mesure (ainsi que de l'utilisation des

⁴ <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/SENSO/accueilSENSO.htm>

⁵ <http://or.lcpc.fr/applet/>

⁶ [http://www.agence-nationale-recherche.fr/programmes-de-recherche/energie-durable/villes-et-batiments-durables/fiche-projet-bvd/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-11-VILD-002](http://www.agence-nationale-recherche.fr/programmes-de-recherche/energie-durable/villes-et-batiments-durables/fiche-projet-bvd/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-11-VILD-002)

⁷ <http://www.lcnd.fr/presentation.html>

résultats pour l'évaluation voire la prévision de la durée de vie résiduelle du matériau, par des approches probabilistes).

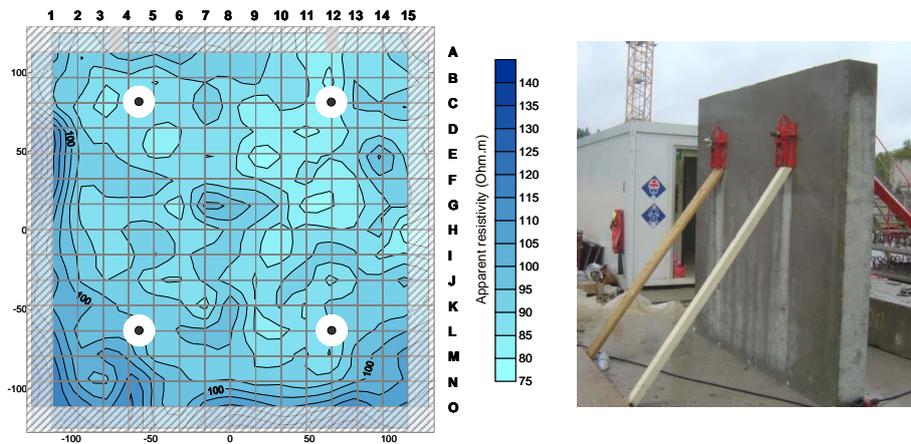


Figure 5. Variations des résistivités électriques sur un voile en béton armé (APPLET)

Le second point porte sur le calage entre la données directes mesurées en un point (résistance en compression à partir d'un prélèvement carotté par exemple) et la mesure physique (résistivité électrique, vitesse de l'onde, amplitude radar) obtenue en tout points de l'ouvrage mais qui ne sert pas à l'ingénieur calcul (Figure 6). Les méthodologies de calibration sont donc à l'étude afin de les optimiser pour limiter le nombre de prélèvements tout en assurant un niveau de confiance suffisant (et connu !).

Ainsi les travaux en développement portent d'un part sur l'identification d'une variation significative de propriétés mesurées en CND, d'autre part sur le calage des données CND et des paramètres mécaniques évaluées ponctuellement.

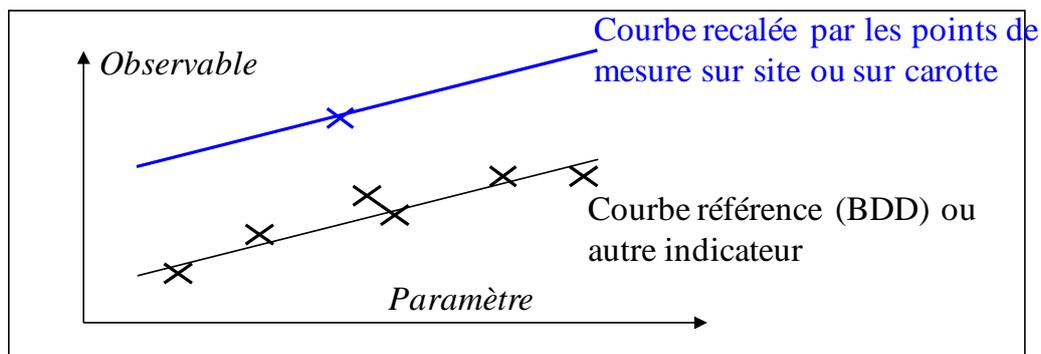


Figure 6. Schéma de principe d'une procédure de calage des données (ACDC)

5.3. Combinaison et fusion de données

Les techniques CND offrent une large gamme de sensibilité aux paramètres physiques. L'utilisation de différentes méthodes permet d'avoir une meilleure image de l'ouvrage que celle obtenue avec un seul outil. Soit que les données des différentes techniques soient complémentaires (porosité ET résistance mécanique par exemple), soit que les mesure

permettre de corriger les biais et donc d'obtenir une image plus fidèle du paramètre recherché (par exemple, correction des effets de la variations d'humidité dans le cas de l'évaluation de la porosité).

La technique SonReb (développée dans les années 80) par exemple, proposait déjà de combiner la mesure de la vitesse des ondes dans le béton, et les valeurs de rebond mesurées au marteau Schmidt pour déterminer le manière non destructive la résistance en compression du matériau. Dans ce même esprit, les travaux récents portent sur plus de techniques de CND (résistivités, vitesse du son, radar, rebond, ...) et pour la détermination de plus de paramètres (porosité, résistance en compression, teneur en eau et en chlorure, ...). L'objectif est d'améliorer la qualité du diagnostic par l'utilisation de plusieurs techniques CND redondantes ou complémentaires (figure 7).

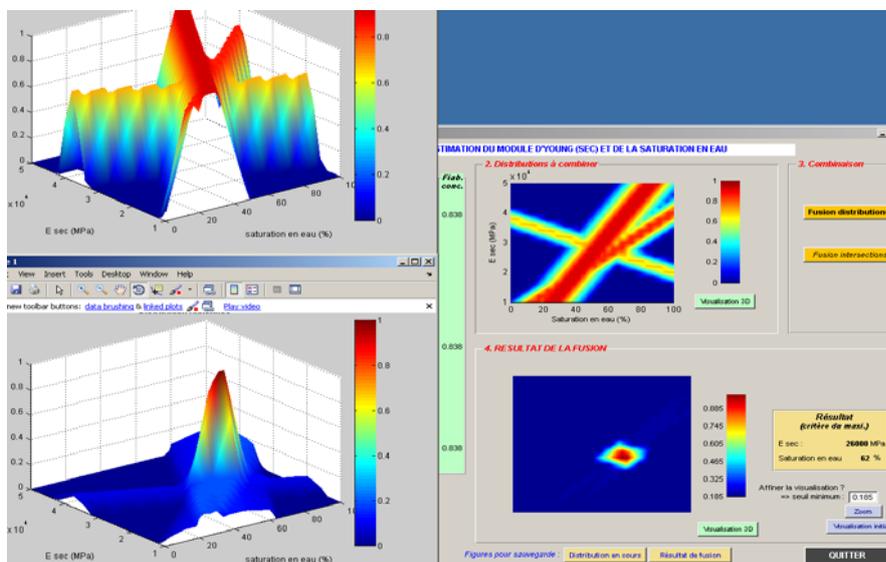


Figure 7. Fusion de données (ACDC)

5.4. Développement des techniques CND

Les recherches menées pour le développement des techniques représentent aussi un volet qui permet aux outils de couvrir de nouveaux champs d'investigations. Les méthodes de plus en plus performantes autorisent des diagnostics de plus en plus adaptés aux besoins.

Plusieurs voies sont exploitées :

- Le développement propre des techniques adaptées à de nouveaux objets, avec de meilleures caractéristiques métrologiques (par exemple : la caractérisation de l'orientation des fibres métalliques dans les bétons de fibres, ou l'étude des fissures).
- Le développement de nouveaux modes de traitement pour optimiser la caractérisation des objets, des altération (par exemple : l'utilisation des réseaux de neurones pour déterminer par radar le diamètre des aciers)

- Le développement technologique pour l'amélioration des cadences de mesures, ou de l'ergonomie (par exemple : le développement d'automates permettant de réaliser une ou plusieurs mesures à la fois).

Conclusion

Les méthodes CND sont un outil adapté au contexte actuel de la gestion du patrimoine. La gamme de réponses qu'elles offrent permet de traiter la plupart des cas en terme de diagnostic de structure. La qualité du résultat dépend autant de la bonne définition du projet que de la maîtrise des outils disponibles. Les développements en cours qui abordent la maîtrise de la mesure, les méthodologies d'investigation et de traitement, ainsi que le développement des méthodes garantissent, à l'approche CND, de devenir encore plus pertinente.

Références

- [1] « *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (2^{ème} partie) – Fascicule 03* », Direction des routes, Ministère de l'Équipement, 1998
- [2] « *Diagnostic des ouvrages en béton armé : état – méthodes – prévisions du vieillissement* » Journées d'études de la commission Construction-Bâtiment du CEFRAFOR, St Rémy-lès-Chevreuse, 12-13 octobre 1998.
- [3] « *Development priorities for Non-Destructive Examination of concrete structures in nuclear plant* » OECD-NEA, 1998.