

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
Concevoir et Construire pour le Développement Durable
Convention de subvention n° MGCS009

Analyse et Capitalisation pour le Diagnostic des Constructions

C2D2 - ACDC

Décembre 2010 à Mars 2014

Rapport Recueil de Recommandations

15 Mars 2014

Partenaires

LMA-LCND Aix en Provence

LMDC Toulouse

EC-Lille Lille

I2M Bordeaux

IFSTAR Nantes

EDF Chatou

SETRA Bagnaux



Réseau Génie Civil et Urbain

Coordonnateur : Vincent.garnier@univ-amu.fr

LMA-LCND

Sommaire

0	Préambule	3
1	Introduction.....	3
2	Définition du Cahier des Charges d’auscultation	4
2.1	Gestes relevant des obligations régaliennes du MOA	4
2.2	Définition des attentes du MOA.....	4
3	Relevés END sur Site et ED-END en laboratoire	6
3.1	Protocole général d’auscultation	6
3.2	Protocole par technique d’END sur site	8
3.3	Protocoles par technique d’ ED et END de laboratoire	8
4	Exploitation des données END de site et ED-END de laboratoire	10
4.1	Données mesurées et variabilité.....	10
4.2	Lois de corrélation	10
4.2.1	Initialisation	10
4.2.2	Recalage par les entrées.....	11
4.2.3	Recalage par les sorties	11
4.2.4	Protocole de recalage.....	11
4.3	Résultats	12
5	Evolutions potentielles.....	12
5.1	Pilotage d’une évolution	12
5.2	Evolution de la base de données de référence	12
5.3	Evolution de chaque protocole	12
5.4	Evolution de l’exécutable	13
5.5	Evolution du document « Recueil de recommandations »	13
6	Annexes	14

0 Préambule

Ce chapitre a trois vocations :

- La première, d'être un livrable du projet RGC&U-C2D2-ACDC, à ce titre le lecteur est renvoyé au corps du rapport et ses annexes pour les justifications scientifiques et techniques.
- La seconde, d'être révisé au gré de l'avancement des connaissances sur les techniques d'auscultation et des traitements de données. A ce titre deux possibilités sont offertes, la première consistant à réaliser l'indice de base dans le cadre de l'ANR-VD-EVADEOS, la seconde, qui peut être concomitante, sa prise en charge par un groupe de travail d'une association professionnelle telle que l'AFGC, l'IMGC, la COFREND ...
- La troisième, d'être diffusé à terme sous forme d'un guide indépendant.

In fine, ce document répond à l'objectif du projet ACDC d'être, tout à la fois, un document opérationnel qui :

- Permet le dialogue entre Maîtres d'Ouvrage (MOA) et Ausculteurs. Le terme MOA désigne en premier lieu le propriétaire de l'ouvrage, dans la suite du texte il peut être représenté par l'Exploitant ou le Bureau d'Etudes en charge de la gestion de l'ouvrage ou de sa maintenance. L'Ausculteur est un terme générique pour désigner l'entité en charge de l'auscultation de l'ouvrage, elle peut être constituée de plusieurs entreprises intervenantes ou de laboratoires d'expertises.
- Assure le transfert des acquis en laboratoire arrivés à maturité vers une mise en œuvre sur ouvrage réel.

Il est structuré pour permettre l'introduction :

- Des avancées scientifiques dans chaque thématique traitée,
- Des évolutions réglementaires et ou normatives nationales (exemple arrêté de 2010) ou internationales (ACI 349.3R-02).

Les termes techniques sont définis dans le glossaire propre au rapport.

1 Introduction

Le retour d'expérience du projet ACDC a permis d'établir les conditions d'obtention d'indicateurs fiables. Elles sont résumées sur un diagramme d'Ishikawa présenté sur la figure 1 sous forme d'articulation des thématiques à traiter. Le choix est fait de ne présenter que les thématiques liées à l'auscultation et l'exploitation des données qui en sont issues. Ces thématiques sont prises en compte sans échelles de temps, ni de coût, ni des contraintes réglementaires liées à une intervention sur l'ouvrage à ausculter. Elles seront définies dans le cadre de la relation contractuelle entre le MOA et l'Ausculteur.

Les actions techniques à réaliser dans chaque thématique sont déclinées dans les paragraphes 3 et 4 suivants. Au paragraphe 3 la préparation et la réalisation des interventions, au paragraphe 4 l'exploitation de l'ensemble des données. A cette occasion, si les interfaces entre acteurs ou actions techniques nécessitent quelques précautions d'ordre non techniques et n'influent pas sur les résultats, le lecteur en sera toutefois alerté. Le dernier paragraphe est dédié à la mise à jour de ces recommandations que comprend ce document ainsi que les outils support à sa réalisation (exécutable du logiciel de fusion, bloc de référence, techniques...).

DIAGRAMME D'ISHIKAWA DES CONDITIONS D'OBTENTION D'INDICATEURS FIALES

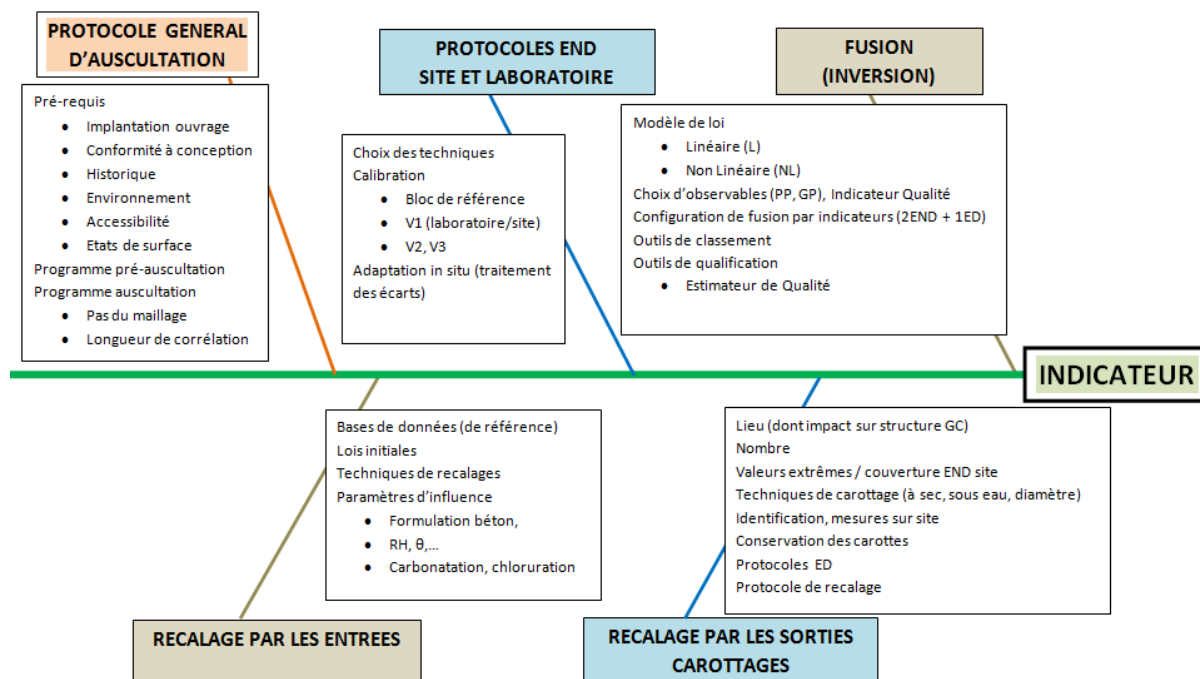


Figure 1 : Diagramme d'Ishikawa des conditions d'obtention d'indicateurs fiables

A l'issue du projet ACDC les indicateurs qui peuvent être obtenus de façon fiable sont par couple :

- La saturation et le module d'Young
- La saturation et la résistance à la compression R_c
- Dans le cadre des essais sur site du projet ACDC la porosité n'est pas un indicateur facilement évalué en raison de ses faibles variations observées sur site.

L'ensemble des techniques exploitées dans le projet ACDC et mises en œuvre, soit sur site, soit en laboratoire, sont présentées dans ce document. Leurs évolutions et les recommandations associées sont réalisables au fur et à mesure où l'obtention des dispositions, permettant d'accéder avec confiance à une meilleure évaluation ou à un nouvel indicateur, seront obtenues.

La première des recommandations est donc une appropriation de la documentation d'ACDC par ceux qui ont à gérer ou piloter des actions d'auscultation des ouvrages de génie civil, pour une bonne application de ce « Recueil de recommandations ».

2 Définition du Cahier des Charges d'auscultation

2.1 Gestes relevant des obligations régaliennes du MOA

Le MOA se doit d'avoir constitué une « base de données » papier ou numérique compilant l'ensemble des informations relatives à la vie et à la connaissance de ses ouvrages, depuis la conception, en passant par la construction, la réception et la mise en service, ainsi que l'historique des incidents et opérations de maintenance survenues sur ses ouvrages.

2.2 Définition des attentes du MOA

Le MOA est le représentant légal concernant toute action sur l'ouvrage. C'est sur sa demande que l'auscultation sera faite, et, c'est à lui, dans un premier temps, d'en définir le cadre (Cahier des Charges). Cela débute par la définition de ses objectifs :

- Définition des caractéristiques recherchées : le projet ACDC permet d'évaluer quatre caractéristiques du béton. Il s'agit du module d'Young, de la résistance à la compression et de la saturation, et dans une moindre mesure de la porosité. Il n'est pas nécessaire pour le MOA de rechercher ces quatre valeurs à chaque fois. Notons que l'évaluation se fait par couple d'indicateurs.
- Définition de la précision souhaitée des résultats : cette précision doit dépendre de l'utilisation ultérieure qui sera faite des caractéristiques déterminées. De son choix, (incertitude sur les valeurs obtenues des caractéristiques) dépendra le nombre de carottes et d'essais à réaliser sur site.
- Définition des parties d'ouvrages concernées.

Le MOA doit donc pouvoir mettre à disposition des Ausculteurs, coordonnés par un Chef de Projet, le maximum d'informations nécessaires à la formulation de leur réponse. Elles sont présentes en général dans le dossier d'ouvrage. Ces informations peuvent être multiples, cependant certaines seront systématiquement nécessaires. Cela concerne :

- La situation géographique de l'ouvrage et son environnement.
- Les contraintes liées à l'exploitation de l'ouvrage et à son accessibilité.
- La localisation in situ et la géométrie des parties de l'ouvrage à investiguer.
- Le plan de ferrailage, à consolider d'une détection des armatures sur site par un détecteur d'armatures ou par un radar permettant en outre de déterminer l'épaisseur d'enrobage si cela est nécessaire.
- Les spécifications du béton et ses caractéristiques à l'arrivée sur le chantier (si possible la formulation complète et précise du béton réalisé, notamment les types de granulats, d'adjuvants ...).
- L'ensemble des zones de l'ouvrage n'ayant pas de fonction structurelle où potentiellement les carottages pourraient être réalisés.

Les Ausculteurs doivent ensuite proposer au MOA un ou plusieurs plans d'auscultation (protocoles généraux et types d'essais envisagés pour obtenir les caractéristiques) afin de répondre aux objectifs fixés.

Cette étape devrait nécessairement inclure une visite sur site. Ainsi les Ausculteurs pourront vérifier visuellement les parties d'ouvrages à ausculter, l'état des surfaces et leur accessibilité physique (hauteurs etc.). En particulier, noter aussi les cas d'accessibilité aux deux faces d'une même paroi de la structure à ausculter, pour inclure la possibilité de relever les observables dont la mesure nécessite cet accès aux deux faces.

Sur la base des informations issues de cette visite, l'Ausculteur peut donc vérifier l'applicabilité des protocoles et plans de sondage proposés et les ajuster/modifier si nécessaire en fonction des conditions du terrain, et en se basant sur son expérience d'inspecteur d'ouvrage, la connaissance de l'historique, le fonctionnement mécanique et l'exposition de la structure. Pour optimiser le plan de mesure et le plan de carottage, afin de minimiser le nombre de prélèvements, l'Ausculteur peut s'appuyer sur des outils tels que « les longueurs de corrélation spatiale ».

A cette étape, l'Ausculteur établit et propose la liste des observables à mesurer et le plan de prélèvements.

Suite à ces propositions le MOA notifie les différents protocoles à appliquer.

3 Relevés END sur Site et ED-END en laboratoire

3.1 Protocole général d'auscultation

Une fois le choix du protocole général d'auscultation retenu par le MOA, celui-ci se décompose en quatre étapes :

1^{ère} étape : Réalisation des mesures d'END

Les Ausculteurs s'appuient sur leurs protocoles par techniques pour définir un plan de mesures permettant d'optimiser l'implantation des zones d'auscultation et le passage des techniques.

Selon les objectifs du MOA, une pré-auscultation peut être réalisée, sur la base de quelques techniques à grand rendement utilisées avec un large pas de mesures, pour pré-positionner les zones optimales à ausculter (correspondant aux valeurs extrêmes rencontrées). Cette pré-étape inclut le traitement des observables et l'optimisation du nombre de prélèvements.

Le plan d'auscultation, la liste des observables ainsi que des conditions d'accès physique aux éléments de structure à ausculter constituent le point de départ pour l'organisation du chantier. Cette organisation devrait respecter trois phases.

Phase 1 : Relevé des ferraillements et codification des mesures

Le plan de ferraillement doit être relevé au préalable du chantier d'auscultation afin de confirmer le nombre et la position des mailles à ausculter et de permettre la codification de celles-ci et l'organigramme de travail. A partir de ce plan (par exemple à la craie grasse), un repérage ligne/colonne par un couple (chiffre, lettre) annexe R.1 figure 1.1, indiquant la position de chaque maille, doit être établi. Ce repère ainsi défini permet de codifier les observables mesurées en fonction de la position de la maille auscultée. Si l'auscultation est réalisée sur deux faces opposés, il est important de placer ce repère précisément face à face et appliquer la même notation aux mailles se trouvant en vis-à-vis. Un exemple de repères réalisé sur un site est présenté en annexe R.1 figure 1.2. A cette étape, la profondeur d'enrobage et les dimensions moyennes des mailles seront également confirmées.

Phase 2 : Préparation de l'organigramme de travail

Le choix des observables pour la pré-auscultation est fixé (liste...). Les protocoles par techniques précisent à titre indicatif le temps nécessaire pour l'auscultation d'une maille. En se fondant sur le plan d'auscultation, il est alors possible d'estimer le temps d'intervention par technique en fonction du nombre de régions (zones de structures) et nombre de mailles à ausculter. L'annexe R.2 donne, à titre d'exemple, les temps d'intervention de différentes équipes, nécessaires pour ausculter 10 mailles sur une face accessible. Les chiffres montrent que ce temps est compris entre 1 à 2 heures pour les techniques dites « rapides (ou dite à grand rendement) » et est proche de 5 heures pour la technique « la plus lente (ou dite à faible rendement) ».

Les observables pour la phase d'auscultation sont choisies sur la base d'une configuration prédéfinie. Un plan de mesure, permettant d'optimiser l'implantation des zones d'auscultation et le passage des techniques, est établi en prenant en compte le temps d'intervention par équipe, le nombre d'équipes pouvant travailler en même temps sur une même zone d'intervention sans se perturber mutuellement, et en incluant les temps de déplacement et d'installation des matériels de mesure entre zones. A titre d'exemple l'annexe R.3 montre l'organigramme appliqué pour les mesures sur un site du Havre. Le plan de mesure doit également prévoir le temps additionnel nécessaire pour mesurer la variabilité V1 de chacune des techniques sur une même maille, représentative de la zone de structure auscultée.

A cette étape le format, commun pour les observables, doit être défini et communiqué aux équipes participantes. Il convient aussi de vérifier les possibilités d'alimentation électrique 220 V sur place et

de prévoir une solution de remplacement (groupes électrogènes avec mise à la terre pour éviter toute interférence électromagnétique).

Phase 3 : Réalisation des mesures

Il s'agit de réaliser l'organigramme de mesures. Avant de commencer les mesures, la maille pour les mesures de la variabilité V1 doit être fixée dans une zone a priori représentative de la structure. A l'issue de cette étape, les Ausculteurs doivent avoir documenté sous un format commun les valeurs des observables attendues (mesurées ou déduites), et les variabilités V1 et V2. Un exemple de résultats de mesures d'observables, est montré dans l'annexe R.4.

2^{ème} étape : Interprétation des mesures d'END

La qualité de ces mesures est estimée à partir des données V1 [variance de la répétabilité] et V2 [variabilité à l'échelle de la maille] qui accompagnent chaque observable. Dans le cas d'observables multiples, des estimateurs de qualité (EQ) permettent de quantifier la qualité et la fiabilité des observables et donc de choisir les configurations optimales pour la procédure de quantification des indicateurs (4^{ème} étape).

L'interprétation se fait sur la base du recalage décrit au chapitre 4. Elle fournit une valeur des indicateurs en chaque point.

Les Ausculteurs ont ainsi à disposition des cartographies d'indicateurs montrant des tendances dont l'objet est l'implantation des sondages destructifs.

3^{ème} étape : Réalisation des prélèvements

L'implantation des prélèvements se décide en fonction des cartographies de mesures issues de la 2^{ème} étape, en recherchant des positions correspondant à des valeurs extrêmes (maxima et minima), et éventuellement des valeurs intermédiaires d'observables. Pour une recherche de l'état d'humidité dans le béton, les Ausculteurs s'appuient sur les cartographies de mesures électromagnétiques (EM), tandis que pour l'estimation de R_c ou de E_{dyn} (la résistance à la compression ou le module d'Young dynamique), ils utilisent les cartographies Ultrasons. Le plan est fixé par l'accessibilité des zones à carotter et pour des valeurs d'observables équivalentes. A ce stade on peut déjà avoir fait une étape de fusion.

Le choix et le nombre de prélèvements dépend aussi du budget alloué par le MOA pour cette étape.

Les analyses doivent porter sur la porosité, le module d'Young et le coefficient de Poisson statique, la résistance à la compression, la teneur en eau (en suivant les préconisations de la RILEM et de l'AFREM suivant l'indicateur recherché).

Le protocole de réalisation des prélèvements est porté en annexe R.5.

4^{ème} étape : Quantification des indicateurs

A l'issue de l'étape précédente, les résultats d'analyse sur prélèvements servent aux Ausculteurs à donner des lois de recalage entre observables et indicateurs.

Dans cette étape, les Ausculteurs doivent recalculer les lois selon les principes détaillés dans le paragraphe 4 ci-après. Ils doivent relier les observables aux indicateurs pour proposer au MOA des cartographies de valeurs des indicateurs recherchés, avec les valeurs d'estimateurs de qualité (EQ) associées.

Suivant les attentes du MOA ou les résultats des essais destructifs, des calculs selon les deux approches sont réalisés pour une quantification locale (point par point) ou globale (valeur moyenne pour la zone considérée, associée à une variabilité). Le rendu au MOA peut se présenter sous forme de cartographie ou de valeurs points à points

3.2 Protocole par technique d'END sur site

Les techniques d'auscultation non destructives utilisées dans cette démarche doivent suivre des protocoles propres à chacune, avec pour objectif principal de définir leur mise en œuvre et les réglages.

Ces protocoles sont établis en 2 ou 3 pages en annexe R.6, en suivant une démarche commune dont les points principaux sont les suivants :

- Objectif de la technique – Domaine d'application – Définition des points de mesure par zone
- Calibration – Vérification du matériel – Mode opératoire
- Incertitudes – Sources d'erreur potentielles – Coût

Les détails des techniques et des valeurs mesurées ainsi que déduites sont présentés en annexe R.6

Chaque protocole présenté définit la mise en œuvre de la technique sur site, la valeur mesurée pouvant être éventuellement transformée en valeur déduite, qui sera l'observable (par exemple : temps en vitesse si on connaît la distance) utilisée pour la fusion des données.

3.3 Protocoles par technique d' ED et END de laboratoire

En ce qui concerne le nombre de carottes, il est défini par le MOA en fonction de ses besoins et de son budget. Il est recommandé, dans la mesure du possible, de disposer de 3 carottes par type de mesure, sachant que certaines mesures peuvent être réalisées sur une même carotte.

En ce qui concerne le plan de carottage, c'est-à-dire l'emplacement choisi pour chaque carotte et son exploitation future en laboratoire, il est établi sur les résultats de la pré-auscultation. En effet, il s'agit de choisir les emplacements correspondant aux caractéristiques extrêmes attendues (minimum et maximum) aussi bien pour les caractéristiques mécaniques que pour les conditions physico-chimiques du matériau. En outre, il faudra veiller à ne pas couper d'armatures. Le plan de carottage doit respecter notamment la norme EN 12504-1.

Le protocole de prélèvement et le choix des zones de carottage sont détaillés en annexe R.5.

La destination des carottes est de 2 types :

Carottage pour les mesures des indicateurs par des méthodes destructives (ED)

Les résultats seront utiles au protocole de recalage par les sorties (cf. paragraphe 4.1). Des recommandations détaillées sont spécifiées en annexe R.5.

Les indicateurs mesurés sont pris parmi :

- la résistance à la compression [norme EN 12390-1], en spécifiant pour chaque résultat si la carotte a été prélevée à cœur ou en surface,
- le module d'Young statique (mesuré sous presse en grandes déformations) [RILEM CPC-8],
- la porosité accessible à l'eau [APFC-AFREM, 1997, GranDuBé, 2005],
- la teneur en eau volumique et/ou le taux de saturation [APFC-AFREM, 1997, GranDuBé, 2005]. Une température de séchage à 105°C est préconisée, les effets sur les observables d'éventuelles évolutions physico-chimiques du béton du prélèvement sont jugées négligeables dans le cadre de ces essais.

On pourra compléter la caractérisation du béton de la structure étudiée par la détermination de paramètres de suivi des éventuelles dégradations comme :

- la profondeur de carbonatation [APFC-AFREM, 1997],
- la profondeur de pénétration des chlorures (ou les profils de chlorures libres et totaux) [GranDuBé, 2005].

En effet, ces derniers peuvent aussi constituer des facteurs de biais dans le calcul des indicateurs à partir de mesures non-destructives.

Carottage pour le recalage de lois reliant les observables aux indicateurs (END labo)

Les résultats seront utiles au protocole de recalage par les entrées (cf. 4.2.2). Des recommandations détaillées sont spécifiées en annexe R.5.

Actuellement, il existe 3 dispositifs (ultrasonore, électromagnétique et électrique) permettant de déterminer sur carottes l'équivalent des observables mesurables in situ. Ces dispositifs requièrent des carottes de diamètre égal à 75 mm et de hauteur égale à 70 mm. Etant donné que ces essais sont non destructifs, jusqu'à deux observables peuvent être obtenues par carotte, ainsi 3 carottes par zone à caractériser suffisent pour l'ensemble de ces essais et la mesure de la porosité accessible à l'eau.

Les observables déterminées sont les suivantes :

- la vitesse des ondes de compression à 250 kHz, et le module d'Young dynamique (en petites déformations) à 250 kHz,
- la permittivité diélectrique complexe entre 800 et 1000 MHz, et la vitesse de l'onde directe radar entre 800 et 1000MHz,
- la partie imaginaire de la permittivité complexe à 33 MHz, et la constante diélectrique à 33 MHz,
- le logarithme de la résistivité.

D'autres observables peuvent être déduites par extrapolation.

4 Exploitation des données END de site et ED-END de laboratoire

La démarche d'exploitation des END et ED est donnée en annexe R.9. Les exploitations se font à partir de la combinaison des données par des opérations logiques qui conduisent à des valeurs d'indicateurs attendus par le MOA et une estimation de la qualité du résultat.

Ces exploitations sont faites par le processus de fusion de données décrit dans le rapport du projet ACDC au chapitre 4. Ce processus de fusion de données consiste à combiner les données issues des mesures END de site en tenant compte de leur variabilité. La cohérence des mesures END permet alors l'identification des valeurs d'indicateurs. Les entrées de ce processus sont les mesures END aux points d'auscultations, la variabilité V2 de chaque observable, les lois de corrélation entre les observables mesurées et les indicateurs recherchés ainsi que les mesures d'indicateurs faites par ED en laboratoire. Les sorties de ce processus sont les valeurs des indicateurs aux points d'auscultation.

4.1 Données mesurées et variabilité

Les données doivent se présenter sous la forme de matrices dans un fichier (ASCII OU TEXTE). Les observables par ordre croissant de codage d'identification sont en colonne et les points évalués sont en ligne. Ils sont repérés (ligne colonne) par un couple (chiffre, lettre) qui permet de les positionner spatialement sur la surface auscultée de la structure. Les mesures d'indicateurs (ED) si elles sont disponibles, sont formatées de la même manière que les observables dans un fichier séparé. Leur repérage répond aux mêmes règles que celles des observables. En l'absence de valeur pour une observable ou un indicateur en un point évalué, il faut porter le terme « NaN » dans la case correspondante.

Les variances V1, V2, définies en annexe R.6, sont portées pour chaque observable par un tableau similaire dans un fichier séparé.

Le choix des observables est fondé sur des considérations de mise en œuvre pratiques que l'on retrouve dans les protocoles en annexe R.6 ainsi que par une étude de la sensibilité aux erreurs de mesure de la valeur estimée des indicateurs décrite en annexe R.7. Les configurations d'observables sont énoncées par le nom des observables retenus.

Les observables étant classées suivant leur pénétration dans le béton, le choix des observables de petites et grandes profondeurs (PP et GP) peut être un élément de sélection. Aujourd'hui la différenciation n'est pas déterminante. Les observables GP sont liés à des évaluations des indicateurs au cœur du béton qui ont moins évolué que ceux de la surface. Les observables de PP sont recommandés pour une évaluation en surface des indicateurs (inférieur à 4 cm, soit l'épaisseur d'enrobage sur de nombreux ouvrages).

4.2 Lois de corrélation

4.2.1 Initialisation

Le processus de fusion de données requiert la connaissance de lois de corrélation entre observables et indicateurs qui permettent de quantifier la cohérence des mesures END aux points d'auscultation et d'en déduire les valeurs des indicateurs attachées à ces points d'auscultation. Des corrélations générales et applicables à toute structure n'existant pas, ces corrélations sont dans un premier temps choisies, à partir d'une base de données liée à une auscultation pré-existante, sur site ou en laboratoire. Il est alors nécessaire dans un second temps de corriger ces lois de corrélation au contexte de l'auscultation à effectuer afin d'améliorer la cohérence des mesures END et d'identifier les valeurs d'indicateurs aux points d'auscultation. Cette adaptation est appelé recalage et elle est faite en deux étapes dites par les entrées ou par les sorties. La correction apportée aux lois de corrélation est validée par le degré de cohérence en fonction du contexte, défini par l'expert sur la base des estimateurs de qualité aux points d'auscultation ou de la sensibilité aux erreurs des configurations. Le résultat de ces corrections est porté en annexe R.8.

Enfin, notons que des corrélations non linéaires (puissance, quadratique...) peuvent être introduites. Nous nous limitons à ce jour à l'utilisation de corrélations linéaires ce qui induit des adaptations pour certaines observables, comme l'expression logarithmique des mesures électriques.

4.2.2 Recalage par les entrées

Ce recalage consiste à corriger les lois de corrélation sans tenir compte des résultats issus de la fusion de données. Les corrections apportées peuvent être de deux ordres :

- Centrage des valeurs moyennes des observables (moyenne des END) sur les valeurs moyennes des indicateurs. Les valeurs moyennes des indicateurs peuvent être des « a priori » au regard du cahier d'ouvrage ou issues de données d'expertises (calcul, ED...). Les principaux paramètres « a priori » identifiés à ce jour sont : les nature et taille des granulats, le type de ciment, les conditions de cure, la température lors des essais, les pathologies (carbonatation, taux de chlorure). Cette correction est limitée à une translation de chaque loi de corrélation (modification de la constante de la régression linéaire).
- Modifications des coefficients de dépendances des observables aux indicateurs (modification du coefficient directeur de la droite de régression). Comme pour le cas précédent, ce recalage peut être fait sur des « a priori » ou des ED.

4.2.3 Recalage par les sorties

Ce recalage consiste à corriger les lois de corrélation à partir de l'optimisation des résultats issus de la fusion de données. Cette optimisation des résultats est faite de trois manières :

- Amélioration de la cohérence des mesures END (COH) : il s'agit de mettre en œuvre une combinaison des estimateurs de qualité aux points d'auscultation pour quantifier le degré de cohérence des mesures END. Les lois de corrélations sont corrigées pour optimiser ce degré de cohérence. Du fait de l'expression mathématique complexe du degré de cohérence en fonction des coefficients des lois de corrélation des observables, cette optimisation est faite de manière exploratoire (évaluation du degré de cohérence pour différents jeux de coefficients) à partir d'un algorithme génétique. Le choix des limites des variations possibles des coefficients de dépendance aux indicateurs requiert l'intervention d'un expert de cette procédure.
- Correspondance aux valeurs d'indicateurs obtenues par ED (TA) : il s'agit ici d'identifier les coefficients nécessaires pour obtenir la correspondance entre les valeurs d'indicateurs identifiées par fusion de données et les ED aux mêmes points d'auscultation. Pour cela on fait l'hypothèse qu'il existe une transformation affine permettant de les relier. Notons que les valeurs d'indicateurs identifiées par fusion de données sont obtenues à partir des lois de corrélation corrigées par le recalage sur les entrées et/ou les sorties sur la cohérence.
- Modification des coefficients des lois reliant observables et indicateurs, ces lois étant obtenues par des essais ND de laboratoire (END labo) pratiqués sur des carottes prélevées sur la structure étudiée et donc constituée du béton de la structure.

4.2.4 Protocole de recalage

Le recalage par les entrées est réalisé en premier. Suite à celui-ci le recalage par les sorties peut suivre trois procédures :

- Si le degré de cohérence défini en annexe R.9 est suffisant alors un recalage TA est mis en œuvre.
- Si le degré de cohérence est insuffisant alors un recalage COH est utilisé. Lorsque le degré de cohérence devient suffisant, alors un recalage TA est mis en œuvre.

- Si le degré de cohérence est insuffisant après un recalage COH alors il faut signaler le problème d'auscultation. Les points pénalisants sont à mémoriser avant une suppression éventuelle. Il apparaît toutefois important de les étudier spécifiquement pour lever l'incertitude des résultats. Il faut s'assurer que les points en question ne sont pas symptomatiques d'une dégradation locale. Il est alors possible de réévaluer ces points par des mesures END identiques à la première auscultation pour valider les résultats antérieurs. Il est aussi possible de mettre en œuvre des techniques complémentaires si celles-ci sont implémentées dans le processus de fusion.

4.3 Résultats

La présentation des résultats peut se faire sous deux formes :

- Une cartographie qui représente la zone auscultée avec l'échelle dimensionnelle précisée. Cela nécessite un positionnement spatial rigoureux des points d'auscultation. L'échelle des indicateurs est précisée sous la forme d'un code couleur.
- Une distribution des valeurs des indicateurs point par point sous la forme d'un diagramme monodimensionnel ou d'un tableau. Les points doivent être repérés dimensionnellement par ailleurs sur un plan.

5 Evolutions potentielles

5.1 Pilotage d'une évolution

Comme postulé dans le préambule (paragraphe 0), les évolutions sont réalisables sous le pilotage d'un organisme professionnel et impliquant le LMA éditeur de l'exécutable. Les premières évolutions interviendront vraisemblablement dans le cadre du projet ANR-VD-EVADEOS, puis du PIA-RSNR-ENDE où globalement les mêmes partenaires sont impliqués.

5.2 Evolution de la base de données de référence

La base de données historique est celle issue du projet ANR-RGC&U-SENSO, maintenue et complétée des données acquises au cours du projet ACDC. Sous réserve de proposer des données strictement au même format, la banque de données peut être enrichie à condition de :

- Préciser la composition et l'état des éprouvettes sur lesquelles les mesures sont réalisées,
- Les protocoles des essais END sur éprouvettes, et les conditions environnementales de leur mise en œuvre,
- Les protocoles des essais END et ED sur prélèvements dans ces éprouvettes.

5.3 Evolution de chaque protocole

Les protocoles joints, pour en simplifier la gestion ultérieure, sont tous considérés à l'indice 0 à l'issue du projet.

Dans la mesure où une évolution de protocole ne concerne que la technologie mise en œuvre (changement de porteur, de forme de sonde, ...), sans modification des lois physiques, liant les couples observable-indicateur, ni le domaine d'application (gamme de béton, nature de granulats, plage de fréquences de validité des lois, ...), alors une montée d'indice du protocole est possible. Pour ce faire, il sera nécessaire d'argumenter la proposition d'évolution sur la base d'une documentation de la révision et, d'autre part, de fournir les mesures et répétabilité sur des dalles étalons et des dalles de béton du matériau étudié. Le résultat attendu est en principe l'obtention de

valeurs de V1 et V2 resserrées, ou pour des valeurs identiques des variances une réduction du coût machine ou du temps d'intervention.

5.4 Evolution de l'exécutable

A la clôture du projet ACDC le logiciel dénommé « Fusion-Prototype » est en version V2014-0. Il est la propriété du LMA-LCND qui en assure la maintenance. Le LMA-LCND met à disposition un exécutable accompagné de son manuel d'exploitation.

La demande doit être adressée au LMA-LCND, accompagnée de la documentation scientifique décrite dans le chapitre 5 du rapport final du projet ACCD, afin de pouvoir dérouler la démarche de validation de l'outil à une version supérieure. Pour une évolution liée à l'introduction d'une nouvelle observable, ou d'un nouvel indicateur, remettre a minima :

- La définition de la nouvelle observable ou du nouvel indicateur,
- Le protocole de la technique, avec domaine d'application de la technique,
- Les lois physiques scientifiques ou expérimentales liant observable-indicateur permettant le pilotage des lois de recalage par les entrées ou les sorties,
- La banque de données ayant permis d'établir la corrélation entre observables et indicateurs, et les tests en laboratoire ayant permis d'établir le protocole de mesure, et des valeurs de référence pour V1 et V2 sur béton,

5.5 Evolution du document « Recueil de recommandations »

Les raisons pour faire évoluer ce document sont classiquement :

- Son enrichissement par le retour d'expérience de sa mise en application,
- L'ajout de références liées aux évolutions décrites dans les paragraphes 5.2 à 5.4 ci-dessus

6 Annexes du recueil de recommandations du projet ACDC

Annexe R.1 : Repérage des points de mesure

Annexe R.2 : Définition des techniques rapides

Annexe R.3 : Planning de la semaine de mesure à Marly

Annexe R.4 : Extrait de présentation des résultats

Annexe R.5 : Protocole prélèvements sur ouvrages-indice 0

**Annexe R.6 : Protocole des techniques de mesure non destructives :
Evaluation des observables**

Annexe R.7 : Sensibilité aux erreurs de mesure et choix des observables

Annexe R.8 : Exemple de lois de corrélation issues de Senso.

Annexe R.9 : Principe d'inversion des données END et ED

Annexe R.1 : Repérage des points de mesure

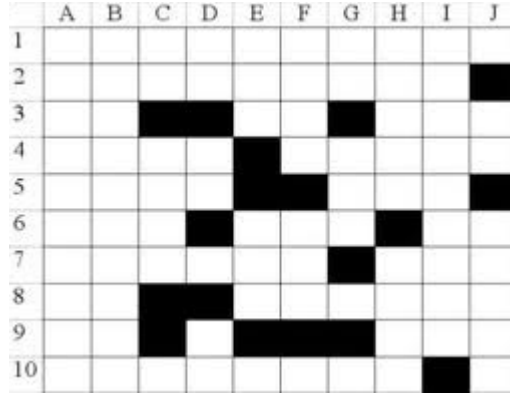


Figure 1.1 : mode de repérage du maillage conseillé

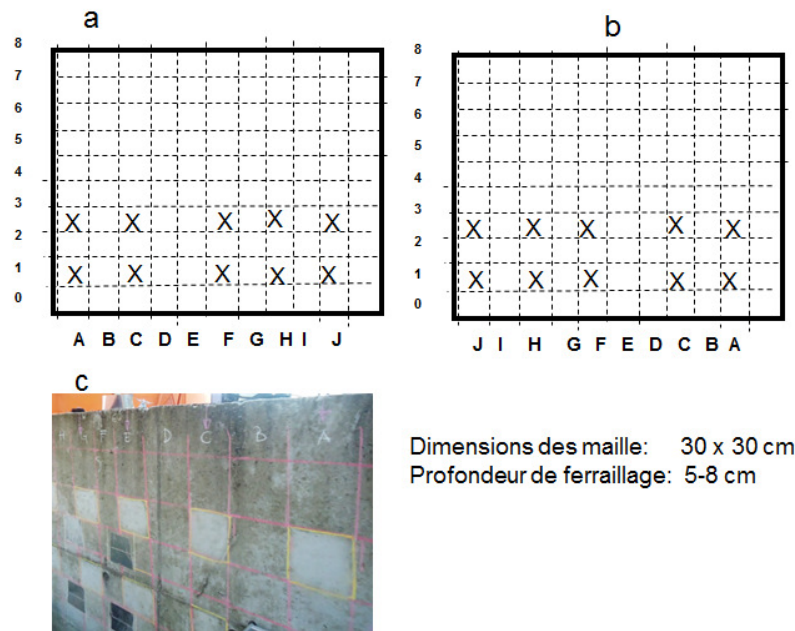


Figure 1.2 : Exemple du plan de repérage (a),(b) ; Plan de ferrailage et les repères sur les deux faces (a) et (b) du même mur (notez que les mailles de même notations se trouvent en vis-à-vis) ;

(c) Photo du mur avec son repérage

Annexe R.2 : Définition des techniques rapides

		Techniques rapides				
equipe	technique	temps	temps	temps	temps	temps
		instalation	auscultation	pre auscultation	auscultation	auscultation
		materiel	par maille	10 mailles=1face	total 1 face	total 1 face
		minutes	minutes	minutes	minutes	heures
IFSTTAR	Impact echo	30	6	60	90	1,5
IFSTTAR	Radar	30	6	60	90	1,5
LMDC	Radar	30	6	60	90	1,5
IFSTTAR	Capacité	30	6	60	90	1,5
I2M	Resitivité	30	10	100	130	2,2
LCND	Ondes P ,	60	10	100	160,0	2,7
I2M	Rebound hammer	10	3	30	40,0	0,7

		Techniques lentes					
equipe	technique	temps	temps	temps	temps	temps	temps
		instalation	auscultati	auscultati	auscultation	auscultati	auscultati
		matériel	on par	on 1	10 mailles =1	total 1	total 1
		minutes	profil	1 maille	face	face	1 face
		minutes	minutes	minutes	minutes	minutes	heures
EC Lille	ondes surface sans contact	60	4	16	208	268	4,5
IFSTTAR	ondes surface laser	60	20	20	260	320	5,3

Figure 2.1 : Exemple de temps d'auscultation pour 10 mailles sur un mur

Annexe R.3 : Planning de la semaine de mesure à Marly

Jour 1 Lundi Formalités et debut de mesures				
heure	Mur I face N	Mur I face S	Mur III face N	Mur III face S
8-9	formalites d'entree			
9-10				
10-11			Relevés ferailage	Relevés ferailage
11-12			Implantation zones	Implantation zones
12-13	repas			
13-14	repas			
14-15	Relevés ferailage	Relevés ferailage	ondes surface	ondes surface
15-16	Implantation zones	Implantation zones	IFSTTAR	EC Lille
16-17	Impact echo UPE	Radar Capacite	Ondes P LCND	GhyMac Resistivité
17-18	IFSTTAR IFSTTAR	IFSTTAR IFSTTAR		Resistivité
18-19				
Jour 2 Mardi auscultation				
heure	Mur I face N	Mur I face S	Mur III face N	Mur III face S
8-9	Ondes P LCND	Impact echo UPE	ondes surface	ondes surface
9-10	Rebound hammer	IFSTTAR IFSTTAR	EC Lille GhyMac	IFSTTAR Radar
10-11		Rebound hammer	Resistivité	Resistivité
11-12				
12-13	repas			
13-14	repas			
14-15	Radar Capacite			
15-16	IFSTTAR IFSTTAR	GhyMac	Rebound hammer	Rebound hammer
16-17		Resistivité	Rebound hammer	
17-18		Resistivité	Rebound hammer	
18-19				
19-20				
Jour 3 Mercredi Auscultation				
heure	Mur I face N	Mur I face S	Mur III face N	Mur III face S
7-8				
8-9	GhyMac ondes surface	ondes surface	Impact echo UPE	Radar Capacite
9-10	Resistivité IFSTTAR	EC Lille	IFSTTAR IFSTTAR	IFSTTAR IFSTTAR
10-11	Resistivité			
11-12				
12-13	repas			
13-14	repas			
14-15	Radar		Radar Capacite	Impact echo UPE
15-16	LMDC		IFSTTAR IFSTTAR	IFSTTAR IFSTTAR
16-17	Definition des positions de carottes			
17-18				
18-19				
Jour 4 Jeudi Auscultation methodes longues et Carottage				
heure	Mur I face N	Mur I face S	Mur III face N	Mur III face S
7-8				
8-9	ondes surface	ondes surface	Carottage	Carottage
9-10	EC Lille	IFSTTAR		
10-11				
11-12				
12-13	repas			
13-14				
14-15				
15-16				
16-17				
17-18				
Jour 5 Vendredi Carottage				
heure	Mur I face N	Mur I face S	Mur III face N	Mur III face S
7-8	Carottage	Carottage	Carottage	Carottage
8-9				
9-10				
10-11				
11-12				
12-13	repas			
13-14				
14-15				
15-16				
16-17				

Figure 3.1 : Exemple d'organigramme de travail

Annexe R.4 :

Extrait de présentation des résultats

MUR I	Code observable	1		2		3		4		5		6		
		Maille	Val	Ec	Val	Ec	Val	Ec	Val	Ec	Val	Ec	Val	Ec
Cote N	B1		2,064E+03	5,338E+01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,046E+02	2,383E+01
	B2		NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	7,714E+01	3,671E+01
	B3		2,004E+03	1,303E+02	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,548E+02	6,481E+01
	D1		2,292E+03	7,978E+01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,003E+02	2,022E+01
	D2		2,070E+03	8,030E+01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	4,045E+03	9,590E+00	9,207E+01	3,297E+01
	D3		2,116E+03	3,869E-01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,539E+01	4,350E+01
	F1		NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	4,080E+03	2,890E+01	7,550E+01	2,814E+01
	F2		2,240E+03	1,316E+02	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,221E+02	5,184E+01
	F3		2,034E+03	6,080E+01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,116E+02	2,891E+01

Figure 4.1 : Exemple de résultats de mesures d'observables : valeur moyenne Val et V2 écart-type Ec.

Annexe R.5 :

Protocole prélèvements sur

ouvrages : indice 0

1 Introduction

Le prélèvement a pour objectif de produire des échantillons du béton de l'ouvrage afin de réaliser l'évaluation destructive (ED) ainsi que la procédure de recalage basée sur des mesures d'END sur carottes (END labo) (proposée par IFSTAR) en vue d'obtenir les indicateurs visés par les END sur site. Ces prélèvements sont essentiellement réalisés par des carottages sous eau à l'aide de tubes carottiers diamantés et d'une perforatrice portable adaptée. Vis à vis de cette dernière il faut veiller que des dispositifs soient prévus pour qu'elle puisse être maintenue fermement en place pendant toute la durée du carottage. Cette recommandation vise à décrire les protocoles de carottage, de conservation des échantillons et d'essais sur ces échantillons en laboratoire.

Il est de la responsabilité du Maître d'Ouvrage de fournir les données d'entrée nécessaires à la conduite des essais décrits ici comme la taille du plus gros granulats, la résistance à la compression spécifiée ou obtenue suite aux essais de convenance réalisés au cours de la construction.

2 Carottage

Zones de carottage :

Les zones de carottage sont définies après une pré-auscultation par END ou bien par un examen visuel.

Le choix des zones à carotter doit toutefois respecter les éléments stipulés par la norme EN 12504-1 qui précise que l'extraction des carottes :

- ne doit pas affecter l'intégrité de la structure en se plaçant à distance des joints et des arêtes
- doit se situer le plus loin possible des armatures. Pour les essais de résistance en compression il faut proscrire toute carotte qui contient une armature.

Elles doivent obtenir l'accord du Maître d'Ouvrage.

Nombre et dimensions des carottes :

Le diamètre des carottes doit être suffisamment important pour contenir le volume élémentaire représentatif. La norme EN 12504-1 précise que le rapport entre la dimension du plus gros granulats et le diamètre de la carotte doit être inférieur à 1/3. Au-delà de cette valeur la norme précise qu'une incidence est à craindre sur les résultats de résistance en compression. Pour la procédure de recalage (END labo) le diamètre des carottes spécifiquement nécessaires est fixé à 75 mm par les appareils de mesure utilisés à l'heure actuelle.

Une fois fixé ce diamètre, la hauteur de la carotte doit satisfaire un élancement (rapport hauteur sur diamètre) a minima de 2 (cf § 6.3.1) pour la mesure de la résistance en compression et a minima de 1 (cf § 6.3.2) pour la mesure de la porosité et du degré de saturation. Il demeure toutefois possible de prélever une carotte de plus grande longueur et de la tronçonner ensuite en plusieurs morceaux.

Tenir compte du fait que le diamètre final de la carotte correspond au maximum au diamètre intérieur du tube carottier, et donc qu'il faut être précis avec l'intervenant sur les dimensions attendues des carottes (généralement l'écart entre le diamètre extérieur du carottier et le diamètre effectif de la carotte extraite est de 5 à 6 mm).

Observation visuelle et mesurage des carottes :

Une observation visuelle doit être pratiquée sur les carottes afin de détecter toute anomalie et de la documenter (fissure, plans de clivage, bullage important, défaut de rectitude...). Le diamètre et la longueur doivent être mesurés au mm et notés. Normalement, les recommandations pour mesurer la profondeur carbonatée à la phénolphthaléine imposent de le faire sur une surface fracturée. Elle peut être faite sur la carotte sur site uniquement à titre indicatif.

Conservation des carottes après carottage :

Une fois la carotte retirée de l'ouvrage celle-ci doit être soigneusement référencée, séchée à l'aide d'un papier absorbant afin d'enlever l'excès d'eau de carottage puis placée dans un sac plastique étanche parfaitement scellé. Les carottes doivent ensuite être rangées, callées, dans une caisse suffisamment robuste pour permettre leur transport jusqu'au laboratoire d'essais.

Au laboratoire les éprouvettes doivent être conservées dans le sac étanche à une température de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

1. Mesures sur carottes pour déterminer les indicateurs (ED)
 - a. Mesure de la résistance en compression et du module d'Young.

Préparation des carottes

Après avoir contrôlé que les carottes satisfont bien au critère d'éclatement 2 on doit procéder à un usinage de leur deux extrémités afin de les rendre planes et parallèles tel que stipulé dans la norme EN 12390-1. Cet usinage se fait à l'aide de meules diamantées. Après usinage les éprouvettes sont mesurées avec une précision du dixième de mm et les dimensions finales sont consignées sur le rapport d'essai.

Conditionnement des carottes

Les carottes sont ensuite saturées par immersion dans l'eau « du robinet » jusqu'à poids constant à 20°C . {A ce stade, il n'y a pas de recommandations particulières sur l'eau, car la mesure est rapide, les possibilités de modification de la microstructure sont réduites. En outre dans ce cas précis le béton est mature}. Les carottes sont alors recouvertes de papier aluminium pour stopper le séchage et sont placées à l'air libre à 20°C .

Collage des jauges de déformation pour la mesure du module d'Young

Trois jauges de déformation résistives sont collées dans la direction de l'effort de compression répartie sur la périphérie de la carotte à 120° l'une de l'autre. Le choix de la taille des jauges de déformation doit être au minimum la taille des granulats et au maximum la hauteur de l'éprouvette moins le diamètre. Pour coller les jauges on procède à un fenêtrage de la couche de papier aluminium.

Essai

L'essai destiné à mesurer le module et la résistance en compression doit être fait moins de 24 heures après le collage des jauges de déformation.

L'essai est fait en respectant la recommandation de la RILEM CPC-8. Cette recommandation stipule de réaliser 5 cycles de chargement-déchargement jusqu'à une charge correspondant à 30% de la charge de ruine. Le module est mesuré au cours du cinquième cycle. L'éprouvette est ensuite rompue et on mesure la charge de rupture. La vitesse de chargement est de 0,5 MPa/s ce qui est conforme à la norme EN 12390-3 qui recommande 0,6 ±0,2 MPa /s.

b. Mesure de la porosité accessible à l'eau et du degré de saturation.

Ces mesures sont faites suivant les recommandations publiées par l'AFPC-AFREM [1997] et « GranDuBé ». Elles consistent à sécher l'éprouvette pour en extraire l'eau libre et à la saturer sous vide pour connaître le volume d'eau pouvant accéder à la porosité. On pourra à partir de ces mesures évaluer le volume d'eau contenue dans la carotte après le prélèvement et donc son degré de saturation, puis la porosité.

Mode opératoire :

- mesure de la masse de l'éprouvette à 20°C à la sortie du sac étanche : $M_{20^{\circ}\text{C}}$
- séchage de l'éprouvette à 105°C et mesure de la masse : $M_{105^{\circ}\text{C}}$
- saturation de l'éprouvette sous vide et mesure de la masse saturée : $M_{\text{saturée}}$
- pesée hydrostatique de l'éprouvette saturée pour évaluer son volume : M_{hydro}

Calcul de la porosité accessible à l'eau P :

$$P(\%) = \frac{M_{\text{saturée}} - M_{105^{\circ}\text{C}}}{M_{\text{saturée}} - M_{\text{hydro}}} \times 100$$

Calcul du degré de saturation Sr :

$$Sr(\%) = \frac{M_{20^{\circ}\text{C}} - M_{105^{\circ}\text{C}}}{M_{\text{saturée}} - M_{105^{\circ}\text{C}}} \times 100$$

Nota : pour cette détermination du degré de saturation on fait l'hypothèse que l'apport d'eau durant le carottage ne modifie pas de façon significative la teneur en eau du béton.

Les résultats sont donnés à une décimale près et en pourcentage.

2. Mesures sur carottes pour recalcr les lois reliant les observables aux indicateurs (END labo)

Il s'agit de mesurer des observables non destructives par des essais de laboratoires sur carottes pour recalcr les lois reliant les observables aux indicateurs.

La pré-auscultation, le choix des zones de carottage et les essais ED sur carottes permettent de disposer a priori de carottes prélevées dans les zones de caractéristiques mécaniques ou de porosité minimales et maximales. Il s'agit maintenant de mesurer les observables sur carottes à des degrés de saturation contrôlés très différents.

Actuellement, il existe 3 dispositifs (ultrasonore, électromagnétique et électrique) permettant de déterminer sur carottes l'équivalent des observables mesurables in situ. Ces dispositifs requièrent des carottes de diamètre égal à 75.0±0.1 mm (ou 74.0±0.1 mm) et de hauteur égale à 70.0±0.5 mm.

Il est recommandé de disposer de 3 carottes par zone à caractériser. Le préconditionnement pour contrôler le degré de saturation des carottes est commun à toutes les mesures END labo.

a. Pré-conditionnement des carottes

Les carottes de 75x70 mm sont pré-conditionnées en chambre climatique de manière à obtenir un taux de saturation visé (par exemple $S_{visé} = 30\%$, 65% et 100%). L'état sec (ou quasi sec) est peu recommandé parce que les bétons des ouvrages en France n'atteignent pas un tel taux de saturation et que des effets non linéaires ont été observés sur les vitesses des ondes ultrasonores aux faibles taux de saturation [Villain et al. 2009, Garnier et al. 2013].

Lorsque le taux de saturation visé est atteint et que l'humidité est répartie de manière homogène dans chaque échantillon, les essais non-destructifs sont réalisés à l'aide des 3 dispositifs ultrasonore, électromagnétique et électrique.

b. Mesure des vitesses des ondes de compression et de cisaillement grâce à un dispositif ultrasonore en transmission.

Un dispositif de mesures en transmission a été développé spécifiquement pour cette application de recalage sur carottes d'ouvrage avec la forte contrainte sur les dimensions des carottes imposées par celles de la cellule électromagnétique (75x70 mm). Les caractéristiques du dispositif et le mode opératoire sont détaillées dans l'article de [Benmeddour et al. CBM 2012].

Mode opératoire :

Le dispositif comprend des capteurs concentriques émetteurs et récepteurs en ondes de compression P et de cisaillement S. Le câblage est modifié pour enregistrer alternativement le signal P et le signal S.

Les capteurs sont accolés pour mesurer le temps de propagation des ondes P (t_{op}), respectivement des ondes S (t_{os}). L'éprouvette est mise en place pour mesurer le temps de propagation des ondes P, on la tourne 10 fois de 30 degrés environ en recommençant l'enregistrement. Le temps de propagation utilisé est la moyenne des 10 mesures (t_p). On procède de même pour obtenir le temps de propagation des ondes S (t_s).

Connaissant la hauteur de l'éprouvette, on calcule la vitesse de propagation des ondes P (V_p), respectivement des ondes S (V_s) et les incertitudes associées. La mesure de la vitesse des ondes P est aisée car le rapport signal sur bruit est très grand. En revanche, la mesure de la vitesse des ondes S est très délicate et doit être améliorée [Benmeddour et al. 2012].

Connaissant les dimensions et la masse de l'éprouvette, on peut alors déduire le module d'Young dynamique (E_{dyn}) et le coefficient de Poisson dynamique (ν_{dyn}).

Observables obtenues

La fréquence des signaux émis étant centrés autour de 250 kHz, les valeurs obtenues correspondent à cette fréquence. Par conséquent, l'observable obtenue correspond à l'observable mesurée in situ :
➔ **observable N°5 - vitesse des ondes de compression à 250 kHz.**

Pour déduire d'autres observables utilisées actuellement in situ (vitesse des ondes de cisaillement, vitesse des ondes de surface ou module d'Young dynamique) à d'autres fréquences, un recalage est nécessaire. En effet, les résultats du projet SENSO ont montré la dépendance fréquentielle des lois reliant les observables aux indicateurs [Garnier et al. 2013].

c. Mesure de la résistivité électrique dans une cellule multi-électrodes.

Un dispositif de mesures en transmission a été développé spécifiquement pour cette application de recalage sur carottes d'ouvrage avec la forte contrainte sur les dimensions des carottes imposées par celles de la cellule électromagnétique (75x70 mm). Les caractéristiques du dispositif et le mode opératoire sont détaillées dans l'article de [Du Plouy et al. 2012].

Mode opératoire :

Le dispositif comprend deux électrodes plates d'injection du courant et 5 électrodes annulaires réceptrices. Le degré de saturation des éprouvettes doit être suffisamment élevé pour pouvoir réaliser la mesure.

Deux mesures sont réalisées en inversant le sens de chaque éprouvette.

Etant donné la géométrie complexe du dispositif, les coefficients géométriques ont été calculés par éléments finis (logiciel COMSOL) [Du Plooy et al. 2012]. On les utilise pour obtenir la résistivité de l'éprouvette au niveau de chaque électrode. Dans le cas d'éprouvette homogène, la résistivité est la moyenne de ces valeurs pour les 2 positions de l'éprouvette. En présence de gradient (éprouvette carottée en surface), il est nécessaire de calculer la profondeur d'investigation des mesures in situ pour les comparer aux résistivités correspondantes en fonction de la position des électrodes annulaires rapportée à la surface du parement.

Observables obtenues

Après calcul du logarithme de la résistivité, l'observable obtenue pour une carotte prélevée à cœur correspond plutôt à l'observable mesurée in situ avec le dispositif ayant un espacement inter-électrode de 10 cm :

➔ **observable N°12 – logarithme de la résistivité,**

tandis que, pour une carotte prélevée en surface, l'observable obtenue correspond plutôt à l'observable mesurée in situ avec le dispositif ayant un espacement inter-électrode de 5 cm ou la sonde Wenner avec un espacement de 5 cm :

➔ **observables N°11 et 13– logarithme de la résistivité.**

d. Mesure de la permittivité complexe dans une cellule électromagnétique.

Une cellule électromagnétique (75x70 mm) a été développée pour déterminer les courbes de dispersion de la permittivité diélectrique complexe du matériau béton en fonction de la fréquence entre 50 et 1600 MHz. Les caractéristiques du dispositif et le mode opératoire sont détaillées dans l'article de [Adous et al. 2006].

Mode opératoire :

L'éprouvette est placée dans la cellule, une mesure des coefficients de réflexion est réalisée, fréquence par fréquence, l'éprouvette est retournée et une seconde série de mesures est réalisée.

Un processus d'inversion [Adous et al. 2006] permet alors d'obtenir les courbes de dispersion de la partie réelle et de la partie imaginaire de la permittivité complexe. Ces courbes peuvent être ajustées par un modèle universel de Jonscher puis extrapolées sur une plus large bande fréquentielle [Ihamouten et al. 2011]. Il est alors possible de déterminer la permittivité réelle (ou constante diélectrique) à la fréquence correspondant au dispositif de mesure électromagnétique utilisé in situ : 33 MHz pour les sondes capacitives, autour de 800 ou de 1000 GHz pour les radars GPR.

Observables obtenues :

En tenant compte de la profondeur d'investigation des sondes capacitives selon la taille des électrodes et la position de la carotte (prélevée à cœur ou en surface), l'observable obtenue à 33 MHz correspond aux observables mesurées in situ :

→ observable N°9 – Constante diélectrique à 33 MHz, mesurée à l'aide des grandes électrodes,

→ observable N°10 – Constante diélectrique à 33 MHz, mesurée à l'aide des électrodes moyennes, tandis que, après calcul de la vitesse apparente, l'observable obtenue entre 800 et 1000 MHz correspond à l'observable mesurée in situ avec les radars GPR :

→ observables N°15 et 16 – vitesse de l'onde directe dans le matériau entre 800 et 1000 MHz.

e. Droites de régression pouvant être utile au recalage.

A l'issue de la campagne de mesure (durant 2 à 3 mois), il est possible d'obtenir la courbe de calibration reliant chacune des observables au taux de saturation entre 30 et 100%. Elle peut alors être injectée dans le processus de fusion (cf. 4.2).

Il est plus difficile d'obtenir à partir des carottages, la courbe de calibration reliant chacune des observables à une caractéristique physique (porosité) car la porosité varie normalement dans une gamme étroite par rapport à la précision de cette mesure ou à une caractéristique mécanique (résistance ou module) car il est difficile voire impossible de réaliser ces mesures destructives au même endroit que les mesure ND sur carottes.

Il est toutefois recommandé de s'efforcer de tester des zones extrêmes en termes de caractéristiques physiques et mécaniques, en cas de malfaçon de la structure (béton localement anormalement poreux, sur-dosé en eau, en entraîneur d'air....)

Pour relier observables (END labo) et indicateurs (ED), il est recommandé de réaliser une base de données indiquant la zone de prélèvement.

Références :

Normes :

EN 12504-1 : essais pour bétons dans les structures

EN 13791/CN : évaluation de la résistance en compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton

EN 12290-1 : Essais pour béton durci - Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules

Recommandations :

Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, « GranDuBé », sous la direction de Ginette Arliguie et Hugues Hornain, Pages 381-385, Presses Nationales des Ponts et Chaussées, 2007

CPC 8, Modulus of elasticity of concrete in compression, in "RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials", Publisher- E & FN SPON, pp.25-27,

[Benmeddour et al. 2012] Benmeddour F., Villain G., Abraham O., Choinska M., Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair, Construction and Building Materials, Volume 37, December 2012, pp.934–942.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.038>

[Garnier et al. 2013] Garnier V., Piwakowski B., Abraham O., Villain G., Payan C., Chaix J.-F., Acoustical techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistencies,



Construction and Building Materials, Vol. 43, June 2013, pp. 598–613.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.035>.

[Du Plooy et al. 2013] Du Plooy R., S. Palma Lopes, G. Villain, X. Dérobert, Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition, NDT and E International, Vol. 54, 2013, pp. 27–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>

[Adous et al. 2006] Adous M., Quéffélec P., and Laguerre L., Coaxial/cylindrical transition line for broadband permittivity measurement of civil engineering materials, Meas. Sci. Technol., vol. 17, pp. 2241–2246, 2006.

[Ihamouten et al. 2011] Ihamouten A., Chahine K., Baltazart V., Villain G., Dérobert X., On the variants of frequency power law for the electromagnetic characterization of hydraulic concrete, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, n°11, 2011, pp. 3658-3668.

Annexe R.6 :

Protocole des techniques de mesure non destructives : Evaluation des observables

Protocoles des techniques de mesures non destructives

Tableaux de synthèse des informations concernant les protocoles 1/2

Technique (n° protocole)	Valeur mesurée/déduite observables	Nombre de points de mesure / maille	Étalonnage
Résistivité électrique (1) Quadripôle carré Et Sonde Wenner	LogRes	4	Oui, sur bâtis calibrés
Capacitive (2)	Permittivité relative	5	Périodique, O/N Mes. différentielles (air)
Radar (3)	Vitesse de groupe Vitesse de phase Amplitude	5 10	O/N Mesures dans l'air
Impact-Echo (4)	Edyn Vitesse de phase	5	A définir, sur dalle de référence
US-ondes de surface (5)	Vitesse de groupe Vitesse de phase Atténuation Facteur Q	1 mesure (moy. 256) M profils, N mesures	A définir, sur dalle référence Oui, sur plaque plexiglas
US-ondes de surface laser (6)			
US-transmission (7)	Vitesse de transmission	6	Oui, sur cylindre d'aluminium
Rebound Hammer (8)			
Pundit (9)			
UPEV (10)			

Tableaux de synthèse des informations concernant les protocoles 2/2

Technique (n° protocole)	Incertitudes	Sources d'erreur	Coût
Résistivité électrique (1) Quadripôle carré Et Sonde Wenner	V1, V2, V3 (analogue au projet SENSO)	Mauvais contact humidité éponges HR_{amb}, T_{amb}	2 op. qualifiés 8 M/h, 1 jour Traitement ~5k€
Capacitive (2)	Ecart-type / maille	Mauvais contact Centrage maille HR_{amb}, T_{amb}	1 op. qualifié 50-60 M/h, 1,5 jours Traitement ~15k€
Radar (3)	O/N – Mesures dans l'air	Mauvais contact Centrage maille HR_{amb}, T_{amb}	2 op. qualifiés 20-30 M/h, 1-2 jours Traitement ~30k€
Impact-Echo (4)	Ecart-type / maille	Non planéité Hétérogénéité HR_{amb}, T_{amb}	2 op. qualifiés 10-40 M/h, 3 jours Traitement ~15k€
US_ondes de surface (5)	Ecart-type / maille	Etat de surface Mauvais contact	2 op. qualifiés 2 M/h, 1 jour Traitement ~100-200k€
US-ondes de surface laser (6)			
US-transmission (7)	V1, V2, V3 (analogue au projet SENSO)	Etat de surface Mauvais couplage	2 op. qualifiés 4 M/h, 1/2 jour Traitement ~10k€
Rebound Hammer (8)			
Pundit (9)			
UPEV (10)			

Les variances définies dans le tableau sont attachées aux résultats des mesures des observables

- V1 est la variance attachée à la variabilité d'une observable en un point d'auscultation, la répétabilité
- V2 est la variance attachée à la variabilité des mesures sur une zone où le matériau est supposé être homogène, la reproductibilité. Pour le projet ACDC, cette zone est définie par la maille de ferrailage du béton.
- V3 est la variance attachée à la variabilité d'une zone intermédiaire de la structure auscultée. Pour le projet ACDC, cette zone est définie par une face de pile de pont (essais de Marly) ou une face de mur (essai du Havre).

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°1-indice 0

Mesure de la résistivité électrique (Obs N°11, 12 et 13)

1 Objectif de la technique

Mesurer la résistivité apparente du béton de surface à l'aide d'un dispositif à 4 points.

Soit les électrodes sont situées aux angles d'un carré de 5cm de côté (Obs n°11), aux angles d'un carré de 10cm de côté (Obs n°12) ou alignées (sonde type WENNER) avec un espacement de 4cm (Obs n°13).

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- La densité de ferrailage doit être telle que l'espacement des armatures ne soit pas voisin ou inférieur à 20 cm. Dans le cas contraire, un aménagement du protocole est alors nécessaire.
- L'épaisseur de la structure étudiée doit être supérieure au plus grand espacement entre électrodes (respectivement, 5cm, 10cm et 12cm pour les observables 11, 12 et 13).
- Un béton trop « sec » va se comporter comme un diélectrique avec une conductivité quasi-nulle, sa résistivité sera impossible à mesurer
- Un béton présentant une couche isolante en surface (altération importante, revêtement d'étanchéité, peinture, graisse, ..) peut s'avérer impossible à ausculter du fait de la résistance de contact trop importante.
- Paramètres d'influence : nature des granulats, ferrailage, type de ciment, porosité, non planéité de la surface, teneur en eau, température, carbonatation, fissuration.

3 Définition des points de mesure

Cas des observables 11 et 12 (quadripole Carré)

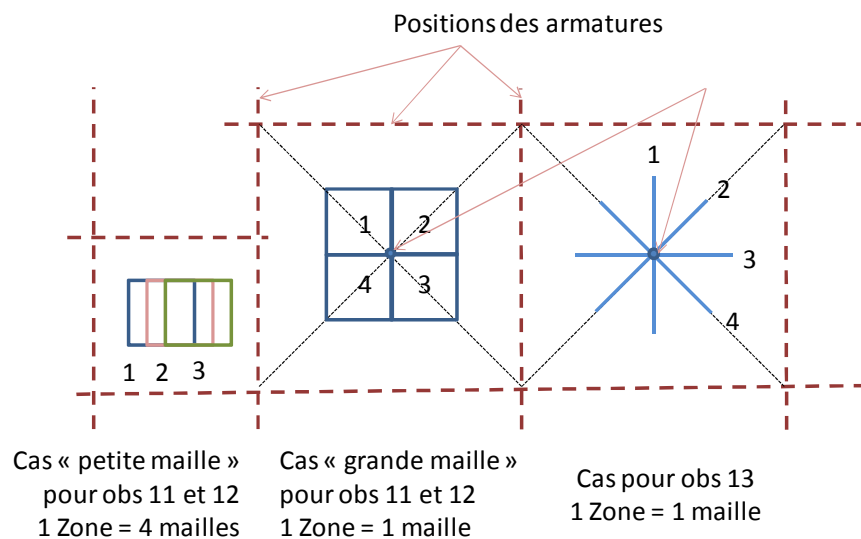
- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille (classiquement pour les mailles supérieures à 30cm). Dans le cas de mailles d'armatures plus serrées une zone correspond à 4 mailles. Les mailles sont repérées à l'avance par radar ou pachomètre. Les positions des axes des armatures sont alors tracées sur la paroi.
- Le nombre et la position des points de mesure sont définis ainsi :
 - Dans le cas des grandes mailles (dont l'espacement est supérieur à 30cm) correspondant à une zone, 4 mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure – voir figure). Les 4 mesures sont positionnées de manière à ce que successivement les 4 électrodes du dispositif de 5cm, soient positionnées au centre de la maille de ferrailage. Pour chaque appareil, 2 mesures sont réalisées en chaque point (correspondant aux 2 orientations des côtés du carré). Cela représente donc dans chaque zone 4 points de mesures auscultés selon 2 orientations d'appareil, soit un total de 8 valeurs par zone

pour un observable (11 ou 12 c'est-à-dire une dimension de sonde).

- Dans le cas des mailles réduites (dont l'espacement est inférieur à 30cm), 3 mesures par mailles sont réalisées en déplaçant légèrement le dispositif de mesure (1 à 2 cm latéralement). Puis 4 mailles sont auscultées. Pour chaque mesure 2 orientations du dispositif, pour les 2 dispositifs sont considérées. Cela représente pour chaque zone 3 points de mesures selon les 2 orientations, dans 4 mailles soient un total de 24 valeurs par zone pour un observable (11 ou 12 c'est-à-dire une dimension de sonde).
- Indistinctement de l'orientation de la position et de la maille d'armature, l'ensemble des données par dispositif (5 ou 10 cm de coté) permet de déterminer la variance V2 (écart type de la population).

Cas de l'observable 13 (sonde Wenner)

- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille. Les mailles sont repérées à l'avance par radar ou pachomètre. Les positions des axes des armatures sont alors tracées sur la paroi.
- Le nombre et la position des points de mesure sont : les 4 mesures réalisées en orientant le dispositif verticalement, horizontalement et suivant les deux diagonales (voir figure). Cela représente donc un total de 4 mesures par maille a minima.
- La moyenne des mesures est affectée au centre de la maille. L'écart-type de ces mesures par maille est retenu comme la variance V2 de la maille.



Représentation des 4 positions de mesure par maille, pour les dispositifs carrés et Wenner.

4 Calibration – vérification matériel

Avec le quadripôle carré (Obs 11 et 12), un test sur bâti calibré est réalisé dès l'arrivée sur un nouvel élément de structure. Il n'y a pas de calibration de l'appareil de mesure Wenner (Obs 13).

5 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Type d'appareil utilisé :
Résistivimètre MEGGER DET 5/4D et sondes carrées (de 5 et 10 cm entre électrodes) ou sonde Wenner à 4 pointes avec espacement de 4 cm. A l'extrémité des électrodes, des éponges sont fixées afin de faciliter le contact électrique entre le béton et l'électrode.
- Considération générale et dispositions préalables :
Avant de débiter les mesures il faut s'assurer du bon repérage de la position des aciers. S'assurer que l'état de surface de l'ouvrage va permettre le bon contact électrique. Avant chaque mesure les éponges aux extrémités des électrodes doivent être humidifiées.
- Acquisition :
La sonde doit être maintenue fermement sur la surface du béton afin d'assurer un bon contact.

Maintenir le bouton « 4 piquets » enfoncé pendant 3 sec, relâcher. L'appareil effectue une série de tests de manière autonome (quelques secondes), puis indique la valeur de résistance électrique du milieu. On lit la valeur de la résistance R en Ohm ou kOhm.

Pour les obs. 11 et 12 une fois la mesure commencée, l'opérateur manipulera le commutateur afin d'acquérir successivement les informations avec les 2 orientations et pour les 2 dimensions de sonde sur un point de mesure.

La mesure est manuelle et nécessite la prise en note des résultats.

- Signaux d'erreur :
Pendant la mesure : si les voyants R_p ou R_c s'allument, cela signifie que la résistance de surface est trop élevée ou bien que le contact avec une des électrodes est mauvais donc le courant ne passe pas bien. On peut alors ré-humidifier les électrodes, humidifier légèrement le béton ou changer légèrement la position de l'électrode. Si les voyants s'allument à nouveau et même si l'appareil affiche une valeur, celle-ci doit être rejetée. De la même façon, si la valeur affichée n'est pas stable au bout de 10 sec, la mesure doit être refaite. Si la dérive est toujours présente, il est alors nécessaire de rejeter la mesure. L'appareil arrêtera d'injecter du courant au bout de 30 sec. Il est important de noter que ce type d'appareil n'est pas capable de mesurer des résistances supérieures à 20 kOhm.
- Documentation
Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier

Noter les altérations de l'état de surface, la présence de fissures, de vides en surface, etc...

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

A partir de la résistance R mesurée sur site, calculer la résistivité apparente ρ par respectivement les relations :

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} \cdot R \quad \text{avec } a = 0,05\text{m et } 0,10\text{m (resp. obs 11 et 12)}$$

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad \text{avec } a = 0,04\text{m (obs. 13)}$$

La résistivité sera exprimée en Ohm.m ou kOhm.m.

La valeur de résistivité apparente ρ_{app} par zone est la moyenne des valeurs mesurées sur l'ensemble de la zone (soit 8 ou 24 valeurs pour obs 11 et obs 12, et 4 valeurs pour obs 13).

6 Incertitudes

Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :

Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques intervenant sur le site.

Variabilité (V2) :

Pour les observables 11 et 12 il s'agit de la variance calculée sur chaque zone à partir des points de mesure pour un observable.

Pour l'observable 13, la valeur de V2 est la variance calculée sur chaque maille à partir des 4 points de mesure a minima. La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les mailles traitées.

Les calculs se font sur la totalité de la population par la relation :

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Sous Excel 2007, les fonctions sont désignées par "ECARTYPE" et "VAR.P".

7 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.
- Une synthèse de chaque maille avec la valeur moyenne et l'écartype sur la totalité de la population est proposée sous forme de tableau.

8 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais contact des électrodes,
- Sonde trop proche d'une armature,
- Dérive du signal
- Hygrométrie et température ambiantes, à mesurer lors de la campagne expérimentale

9 Coût

- 1 opérateur qualifié
- Rendement à raison de 16 mailles par mètre carré :

- Pour observable 11 et 12 :
15 mailles/h

Traitement des données (par jour de chantier) : 1/2 jour

- Pour observable 13 :
20 mailles/h

Traitement des données (par jour de chantier) : 1/2 jour

- Matériel : 3 k€ (à amortir)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°2-indice 0

Technique capacitive

Mesure de la permittivité (obs n°9, 10)

1 Objectif de la technique

Mesurer la fréquence de résonance d'un circuit électronique oscillant (autour de 33 MHz) de type RLC dont la capacité est composée d'électrodes planes posées sur le matériau à ausculter. Plusieurs patins d'électrodes sont proposés pour ausculter une profondeur variant de quelques millimètres à quelques centimètres (7-8 cm).

Un étalonnage sur matériau homogène, de permittivité connue, (relation linéaire entre fréquence et permittivité) permet de remonter à une valeur de permittivité.

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- La densité de ferrailage doit être telle que l'espacement des armatures doit rester supérieur à 20 cm.
- L'épaisseur de la structure étudiée doit rester supérieure à 15 cm (pour des épaisseurs plus faibles, on peut craindre des biais de mesure de la nappe d'armature de la face opposée).
- La surface de structure à ausculter doit être plane
- Paramètres d'influence :
Nature des granulats, ferrailage, type de ciment, porosité, non planéité

3 Définition des points de mesure

- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille. Les mailles sont repérées à l'avance par radar haute ou basse fréquence. Les armatures sont alors tracées sur la paroi.
- Dans chaque maille repérée au préalable sur la structure et sur le plan, cinq mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure) en déplaçant légèrement le système d'auscultation, suivies de deux mesures dans l'air. La moyenne des mesures est affectée au centre de la maille. L'écart-type des ces cinq mesures a minima est retenu comme la variance V_2 de la maille.

4 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure se fait sur la base de mesure dans l'air, explicitée dans le mode opératoire, et d'un contrôle de mesure réalisé en laboratoire, au préalable de la campagne de mesure, sur un ou quelques matériaux étalons.

5 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Type d'appareil utilisé :
Matériel IFSTTAR : capteur capacitif avec liaison hertzienne pour le transfert des données, PC portable pour l'acquisition des mesures, jeu de 2 patins d'électrodes (10*70 mm nommé ME et 40*70 mm nommé GE)
- Il n'y a pas de réglage de paramètre d'acquisition
- Acquisition :
Préchauffe du capteur pendant 20 minutes

Implantation des armatures de façon à positionner les mailles au centre desquelles vont être faites les mesures (action possible pendant les acquisitions réalisées par le LMDC par des profils horizontaux et verticaux).

Enregistrement d'un fichier par zone de mesure et par patin

Acquisition de 5 signaux dans l'air par patin au préalable des acquisitions

Acquisition maille par maille, sur toute la zone en fixant le patin ; chaque changement de maille étant séparé par 2 acquisitions dans l'air
- Documentation
Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier

Sauvegarde du fichier

En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,

Sauvegarde sur clé USB

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

Utilisation d'un logiciel de type Tableur classique (Excel, OpenOffice...) pour traiter et visualiser les résultats :

- Calcul de la variation en fréquence entre la mesure sur matériau et la mesure dans l'air
- Moyennage des mesures par maille (moyenne et écart-type).
- Estimation de la permittivité (moyenne et écart-type) par maille à l'aide des droites d'étalonnage de chaque patin.

6 Incertitudes

Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :

Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée par la mesure de V1 doit être identique pour toutes les techniques intervenant sur le site (si biais il y a, il sera le même pour toutes les techniques).

Variabilité (V2) : variance calculée sur chaque maille à partir des cinq ou dix points de mesure a minima pour Ifsttar et le LMDC respectivement. La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les mailles traitées.

Sous Excel 2007, les fonctions sont désignées par "ECARTYPEP" et "VAR.P".

7 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.

8 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais contact des patins (non planéité du matériau), effet rapidement dramatique pour les patins PE très sensibles aux premiers centimètres du béton.
- capteur capacitif trop proche d'une armature,
- Hygrométrie et température ambiantes, à mesurer lors de la campagne expérimentale

1. Coût

- 1 opérateur qualifié
- Rendement : (à raison de 16 mailles par mètre carré, hors implantation des mailles) : 3 à 4 m²/h)
- Traitement des données (par jour de chantier) : 1,5 jours
- Matériel : ~10 k€ (à amortir)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°3-indice 0

Technique radar

Vitesse des ondes directes (obs n°15-16)

Temps de propagation (obs n°17)

Amplitude (obs n°14)

1 Objectif de la technique

Mesurer le temps de parcours et l'amplitude de l'onde électromagnétique se propageant en surface du béton à ausculter. La vitesse des ondes directes en est déduite.

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- La densité de ferrailage doit être telle que l'espacement des armatures doit rester supérieur à 20 cm.
- L'épaisseur de la structure étudiée doit être supérieure à 15 cm en mode bistatique (antennes indépendantes), et à 12 cm avec une seule antenne.
- Un béton trop conducteur (saturé, poreux, chloruré, ...) peut trop atténuer les signaux radar, les rendant inexploitable, principalement pour des configurations bistatiques.
- Paramètres d'influence :
Nature des granulats, ferrailage, type de ciment, porosité, non planéité

3 Définition des points de mesure

- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille. Les mailles sont repérées à l'avance par radar haute ou basse fréquence. Les armatures sont alors tracées sur la paroi.
- IFSTAR : Dans chaque maille repérée au préalable sur la structure et sur le plan, cinq mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure) en déplaçant légèrement l'ensemble des antennes, suivies de deux mesures dans l'air. La moyenne des mesures est affectée au centre de la maille. L'écart-type de ces cinq mesures a minima est retenu comme la variance V2 de la maille.
- LMDC : Cinq mesures autour du centre de la maille sur le profil horizontal et la même chose sur le profil vertical, soit 10 mesures pour chaque centre de maille. La moyenne des mesures est affectée au centre de la maille. L'écart-type de ces dix mesures a minima est retenu comme la variance V2 de la maille.

4 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure se fait sur la base de mesure dans l'air explicitée dans le mode opératoire.

2. Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Type d'appareil utilisé :
Matériel GSSI, modèles SIR3000 (IFSTTAR) et SIR20 (LMDC), antenne(s) nominale(s) 1,5 GHz
- Réglages des paramètres d'acquisition (antennes 1,5 GHz) :
Acquisition : en mode point (IFSTTAR), à l'aide d'une roue codeuse (1 signal / cm – LMDC)

Echantillonnage des signaux : 1024 points en 16 bits

Temps d'écoute : 5-6 ns

Filtres fréquentiels : suivre le manuel d'utilisation du matériel (optionnel)

Matériel IFSTTAR : FIR-PB = 0 MHz, FIR-PH = 80 MHz,
IIR-PB = 3000 MHz, IIR-PH = 300 MHz

Matériel LMDC : Sans filtrage (valeurs mises à 0)

Pas de gain

Sommation (stacking) : 32 (IFSTTAR), 72 (LMDC)

- Acquisition :
Préchauffe du radar pendant 20 minutes

Implantation des armatures de façon à positionner les mailles au centre desquelles vont être faites les mesures (action possible pendant les acquisitions réalisées par le LMDC par des profils horizontaux et verticaux).

IFSTTAR : Un fichier par secteur de mesure

Acquisition maille par maille, sur toute la zone, en fixant l'offset,

Du plus petit offset (espacement entre émetteur et récepteur) au plus grand (7cm 10,1cm 13cm et 14,4cm)

Acquisition de 5 signaux dans l'air par offset au préalable des acquisitions sur zone, chaque changement de maille étant séparé par 2 acquisitions dans l'air

LMDC : Un fichier par profil, horizontal et vertical, passant au droit du centre des mailles

A la fin de chaque profil acquisition d'un signal dans l'air

- Documentation
Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier
Sauvegarde du fichier
En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,
Sauvegarde sur clé USB

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

Utilisation d'un logiciel de visualisation et traitement des données radar (type ReflexW, Radan ou Matlab).

IFSTTAR :

- Pointé des arrivées (premier maximum) des ondes directes pour toutes les mesures (dans l'air comme dans matériau)
- Calcul des temps de propagation entre antennes émettrice et réceptrice, connaissant l'offset et les temps d'arrivée. Il est fait l'hypothèse que l'instant d'émission de l'onde t_0 est stable entre les mesures dans l'air et celles sur matériau. Ce calcul est réalisé à partir de chaque offset, où t_0 est recalculé pour minimiser une éventuelle dérive des mesures.
- Moyennage des mesures (temps de propagation \sim observables t_i) par maille (moyenne et écart-type).
- Estimation de la vitesse de propagation V_{OD} par maille

LMDC :

- Pointé de l'amplitude pic à pic sur 5 signaux au centre de la maille et calcul de la moyenne (une valeur moyennée par maille)

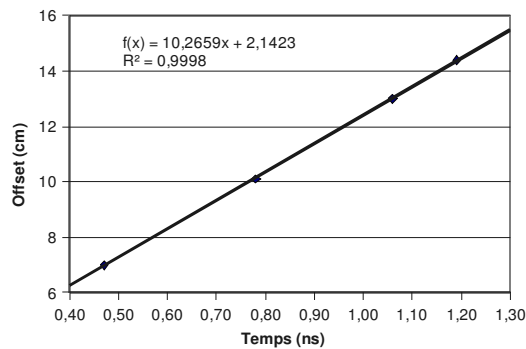


Figure 1 : Exemple de calcul de vitesse de propagation de l'onde directe à partir des mesures de temps d'arrivée pour 4 offsets (IFSTTAR).

5 Incertitudes

Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :

Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques intervenant sur le site.

Variabilité (V2) : variance calculée sur chaque maille à partir des cinq ou dix points de mesure a minima pour IFSTTAR et le LMDC respectivement. La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les mailles traitées.

Les calculs se font sur la totalité de la population par la relation :
$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Sous Excel 2007, les fonctions sont désignées par "ECARTYPEP" et "VAR.P".

6 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.
- Une synthèse de chaque maille avec la valeur moyenne et l'écartype sur la totalité de la population est proposée sous forme de tableau.

7 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais contact des antennes (non planéité du matériau),
- cale entre antennes non plaquée contre le matériau (IFSTTAR),
- ensemble des antennes (émetteur-cale-récepteur) trop proche d'une armature,
- dérive du signal (au niveau de l'instant d'émission, en cas de préchauffage insuffisant)
- Hygrométrie et température ambiantes, à mesurer lors de la campagne expérimentale

8 Coût

- 2 opérateurs qualifiés
- Rendement : (à raison de 16 mailles par mètre carré)
IFSTTAR : 20 mailles/h
LMDC : 20 minutes par m²
- Traitement des données (par jour de chantier) :
IFSTTAR : 2 jours (1 personne)
LMDC : 1 jour
- Matériel : ~30 k€ (à amortir)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°4-indice 0

Technique Impact Echo (IE)

Module d'Young dynamique (IE_Edyn, obs n°7)

Vitesse des ondes de compression (IE_Vp, obs n°8)

1 Objectif de la technique

Mesurer la fréquence caractéristique du 1^{er} mode symétrique stationnaire des ondes de Lamb, complété si possible par d'autres fréquences et/ou des hypothèses (voir ci-dessous).

Le module d'Young dynamique (E_{dyn}) et la vitesse des ondes de compression (V_p) en sont notamment déduits.

Remarque : Codification ANR-SENSO (IE_Edyn, obs n°22) et (IE_Vp, obs n°25)

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- La face opposée à la face d'auscultation doit être parallèle (ou quasi parallèle) à la face d'auscultation.
- Une surface plane (ou faiblement rugueuse) est requise.
- Il est préférable d'éviter les armatures donc de placer le dispositif au centre des mailles.
- Paramètres d'influence :
Formulation, ferrailage, teneur en eau

3 Définition des points de mesure

Dans chaque maille repérée au préalable sur la structure et sur le plan, cinq mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure) en déplaçant légèrement l'ensemble du dispositif. La mesure est affectée au centre de la maille.

4 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure pourrait se faire sur une dalle de référence (ce protocole reste à définir).

5 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Type d'appareil utilisé :
 - Matériel de marque Olson Engineering (IFSTTAR)
 - Matériel de marque Euro Physical Acoustic S.A. (CEREMA-Laboratoire de Lyon)
- Charge de la batterie du système d'acquisition pendant la nuit précédente.
- Implantation des armatures par GPR de façon à positionner les mailles au centre desquelles vont être faites les mesures.
- Test préalable pour choisir la source optimale (taille de la bille ou source automatique)
- Réglages des paramètres d'acquisition :

Acquisition : signal temporel

Echantillonnage des signaux : 2048 points

Echantillonnage temporel : $t = 5 \mu\text{s}$ (respectivement $7 \mu\text{s}$)

Echantillonnage fréquentiel : $f = 97.7 \text{ Hz}$ (respectivement 69.8 Hz)

Absence de filtrage

Géométrie : structure place, épaisseur de la structure à renseigner

- Acquisition :
 - Un fichier par zone de mesure
 - Acquisition maille par maille, sur toute la zone de mesure,
 - Acquisition de 5 signaux au centre de chaque maille,
- Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier (T et HR comprises)
- Sauvegarde du fichier brut
- Traduction en fichiers « texte » et sauvegarde du répertoire correspondant
- En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,
- Sauvegarde sur clé USB des fichiers bruts et des fichiers « texte ».

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

Utilisation d'un module (1) de visualisation et de traitement des mesures (type Scilab ou Matlab) pour calculer et visualiser les transformées de Fourier (FFT) des signaux temporels et détecter automatiquement (amplitude supérieure à un seuil fixé) les fréquences remarquables.

Utilisation d'un module (2) de calcul des observables (type Scilab ou Matlab).

Vérification préalable :

- Suppression et renumérotation éventuelle des fichiers erronés (selon le cahier de chantier),
Détection automatique des fréquences remarquables (module 1) :

- Choix du seuil optimal de détection,
- Paramétrage du module (nom du répertoire, nombre de mailles, nombre de mesures),
- Détection automatique (amplitude supérieure au seuil fixé) des fréquences remarquables,
- Enregistrement du tableau de résultats par zone dans un fichier de type « texte ».

Vérification préalable :

- Suppression éventuelle des fréquences supplémentaires détectées (ne correspondant pas aux hypothèses physiques retenues).
- Sauvegarde du fichier vérifié.

Choix du modèle physique et hypothèses correspondantes :

- Cas de dalles de petites dimensions, fréquences recherchées :
 - Fréquences de résonance de la structure (3 premières fréquences de résonance F1, F2, F3)
 - Fréquence du 1^{er} mode symétrique stationnaire des ondes de Lamb (FS1)
 - Hypothèse facultative sur la valeur de la densité du matériau (mesure sur carotte).
- Cas de structures quasi-infinies (poutre, dalle,...), fréquences recherchées :
 - Fréquence du 1^{er} mode symétrique stationnaire des ondes de Lamb (FS1)
 - Fréquence du 2nd mode antisymétrique stationnaire des ondes de Lamb (FA2)
 - Hypothèse nécessaire sur la valeur de la densité du matériau (mesure sur carotte).
- Cas difficile de structures où seule une fréquence est détectable :
 - Fréquence du 1^{er} mode symétrique stationnaire des ondes de Lamb (FS1)
 - Hypothèses nécessaires sur la valeur de la densité du matériau (mesure sur carotte) et sur le coefficient de Poisson du béton ($\nu=0.2$)

Calcul des observables (module 2) :

- Paramétrage du module (nom du répertoire, nombre de mailles, nombre de mesures)
- Entrée des données nécessaires selon les hypothèses (épaisseur de la structure, densité et, éventuellement coefficient de Poisson estimé du béton)
- Estimation des inconnues (densité, module d'Young et coefficient de Poisson) par minimisation de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques calculées par le modèle physique choisi, en tenant compte de la précision en fréquence ($f/2$) pour calculer les incertitudes.
- Calcul des observables désirées :
 - Module d'Young dynamique (E_{dyn} , observable n°7)
 - Coefficient de Poisson dynamique (ν_{dyn})
 - Vitesse des ondes de compression (V_p , observable n°8)
 - Vitesse des ondes de cisaillement (V_s)
- Moyennage des observables par maille (moyenne et incertitude composée).
- Enregistrement du tableau de résultats par zone dans un fichier de type « texte ».

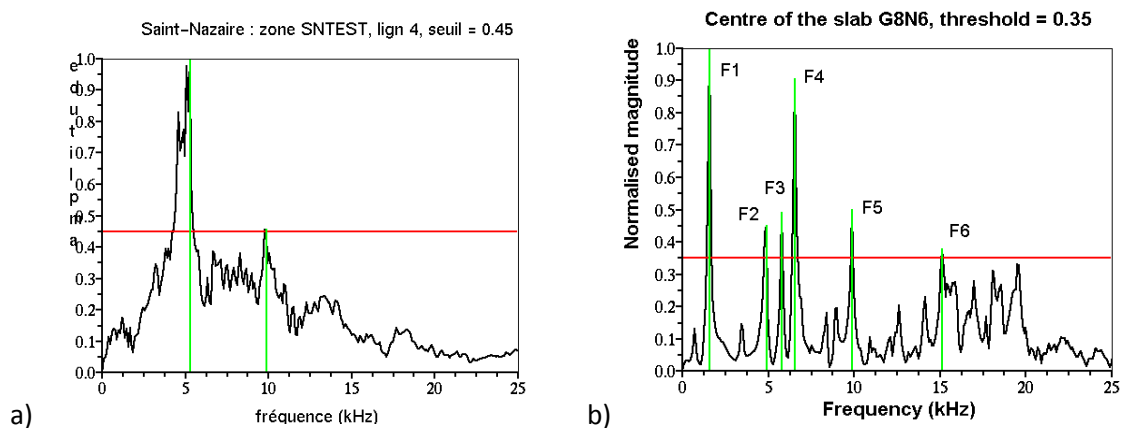


Figure 1 : Exemple de spectres de mesures par impact écho – a) sur une poutre du quai du GPM de Nantes-Saint Nazaire – b) sur une dalle 50x25x12cm du projet ANR-SENSO [Villain et al. 2012].

6 Incertitudes

- L'incertitude est une incertitude composée, calculée à partir de l'incertitude d'inversion et de l'écart-type calculé pour chaque maille.
- Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :
- Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même

point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques intervenant sur le site.

- Variabilité (V2) : variance calculée sur chaque maille à partir du point de mesure (Sous Excel, choisir la fonction « écart-type P »)

7 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ASCII ou EXCEL :
 - la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée,
 - la 2^{ème} colonne donnant la valeur moyenne de l'observable déduit,
 - la 3^{ème} colonne l'incertitude sur cette observable.

8 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais contact du récepteur (non planéité du matériau),
- Choc « mou » de la bille sur le matériau (faible rapport signal sur bruit),
- Ensemble du dispositif trop proche d'une armature,
- Présence d'un objet enfoui (câble, vide, nid de cailloux, objet non identifié....).

Remarque : il est préférable de mesurer l'hygrométrie et la température ambiantes sur chantier.

9 Coût

- 2 opérateurs qualifiés
- Rendement très variable selon le matériau et la structure : (à raison de 16 mailles par mètre carré)
 - minimum : 10 mailles/h
 - maximum : 40 mailles/h
- Traitement des données (par jour de chantier) :
 - 3 jours (1 personne)
- Matériel : ~15 k€ (à amortir)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°5-indice 0

Technique Ondes de Surface sans contact (Obs N°1, 6, 18, 21, 23 et 24)

1 Objectif de la technique

Mesurer les différentes vitesses et l'atténuation des ondes ultrasonores de surface se propageant à la surface du béton à ausculter. La vitesse et l'atténuation sont déduites à partir de la connaissance du temps de parcours et des amplitudes des ondes sur une distance connue.

Le tableau 1 ci-dessous présente les observables SENSO issues de la technique Ondes de Surface sans contact, leurs anciennes numérations introduites au cours du projet SENSO, des nouvelles numérotations introduites en cours du projet C2D2-ACDC, ainsi que les nouvelles observables (18, 21, 23, 24) introduites au cours du projet C2D2-ACDC.

Tab.1 Liste des observables issues de la technique Ondes de Surface sans contact

Technique	N°	Nom	Code	Nom Observable	Nouvelle
	SENSO	SENSO	SENSO	unité	Numérotation ACDC
Ultrasons	1	US 1	USgr	Ultrasons Surface - vitesse de OS moyenne (m/s)	1
Ultrasons	15	US 8	USat	Ultrasons Surface - atténuation moyenne (dB/m)	6
Ultrasons	17	US15	USq	Ultrasons surface-coefficient de qualité Q	Pas retenu pour ACDC
Techniques/observables nouvelles					
Ultrasons				Ultrasons Surface - vitesse 3 cm (m/s)	18
Ultrasons				Ultrasons Surface - vitesse 3.5 cm (m/s)	21
Ultrasons				Gradient vitesse des ondes de surface m/s/mm	23
Ultrasons				Ultrasons Surface - vitesse 5 cm (m/s)	24

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- Surface de béton plane (ou quasi plane)
- Si la profondeur d'auscultation (étant proche de λ_s) dépasse la profondeur de ferrailage, la densité de ferrailage doit être telle que l'espacement des armatures doit rester supérieur à 15 cm.
- Un état de surface trop mauvais peut perturber la mesure. Ainsi la peinture etc.
- Paramètres d'influence : nature des granulats, type de ciment, porosité, teneur d'eau, micro et macro fissurations, qualité de la surface

3 Mode opératoire

3.1 Positionnement de l'appareil

- Positionner l'appareil sur la surface à ausculter, voir les figures 1. c et d.
- La zone de mesure correspond à la surface définie d'habitude par la surface d'une maille Les mailles sont repérées à l'avance par radar haute fréquence. Les armatures (mailles) sont alors tracées sur la paroi (Fig.1.b).
- Dans chaque maille, nous définissons à minima $M=4-5$ des profils parallèles de mesure (Fig.1.b). Les distances entre λ_y entre les profils doit être telles que $\lambda_y > 1 \text{ à } 2 \times \lambda_s$, et ou $\lambda_y > 1 \text{ à } 2 \times$ taille de granulat, afin d'assurer les faibles corrélations spatiale entre elles où λ_s est la longueur d'onde d'étude fixée par l'opérateur. Les profils de mesure seront repérés préalablement.

3.2 Réglages des paramètres d'acquisition : voir la figure 1.a

Nombre de points de mesure par profil : N, avec $1 < N < \infty$

Distance entre les points de mesure : λ_x , avec $0 < \lambda_x < 22 \text{ cm}$

Nombre de profils M $1 < M < \infty$, type $M > 4$, conseillé : $M > 10$

Puissance moyenne d'émetteur : $P < 5W$

Sommation (détection synchrone) : K, avec $1 < K < \infty$, type $K=32$

Temps d'écoute, type 300 μs

Longueur d'impulsion : λ_t avec valeur type $1 \text{ ms} < \lambda_t < 15 \text{ ms}$

Gain générateur : 10- 100 mV, en fonction de la puissance P

Angle d'attaque proche de 10° , à régler pour obtenir un signal maximum

Bande de fréquence : $f_{\min}-f_{\max}$ est à adapter en fonction du choix de transducteurs (transducteur type pour le béton : $B=50-150 \text{ kHz}$)

$B= 40-100 \text{ kHz} \Rightarrow$ transducteur 50 kHz

$B= 50-150 \text{ kHz} \Rightarrow$ transducteur 70 kHz

$B= 100-300 \text{ kHz} \Rightarrow$ transducteur 200kHz

$B = 200-500 \text{ kHz} \Rightarrow$ transducteur 350 kHz

Limites de sweep, f_{\min} et f_{\max} \Rightarrow adaptées à la bande B f_{\min} impose $\lambda_{\min} = V/f_{\min}$ ou V la vitesse d'onde de surface, V type : (2100-2500 m/s)

Ainsi l'opérateur fixe la fréquence d'étude ou $f_c \approx (f_{\min} + f_{\max})/2$ et la longueur d'onde d'étude $\lambda_s \approx V/f_c$

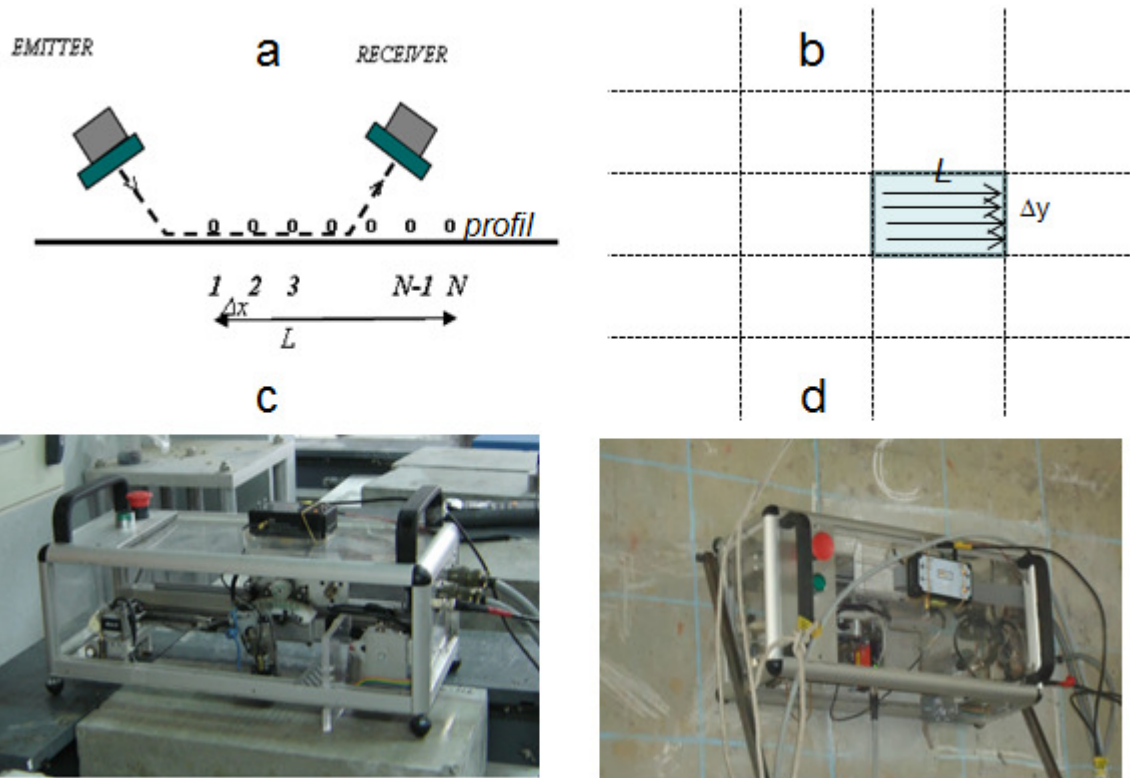


Figure 1. **a** Géométrie et principe de mesure sans contact **b** Maillage et $M=4$ profils dans une maille de mesure. **c** L'appareil (scanner US sans contact) positionné sur une dalle de béton, **d** L'appareil positionné sur un mur à ausculter avec les armatures (mailles) tracées sur ce mur

3.3 Acquisition :

- Pour chaque profil acquisition de N signaux $s_i(t)$ $i=1...N$
- Acquisition sur M profils avec le déplacement manuel du robot de Δy entre chaque profil.
- Un fichier avec les données est obtenu pour une maille (i.e.) M profils
- Sauvegarde du fichier
- En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,
- Sauvegarde sur clé USB

3.4 Valeurs déduites – après traitement (au bureau)

Les données sont ensuite traitées dans la deuxième phase par un « logiciel **OS** » (créé en environnement MATLAB, par ECLille). L'**OS** détermine pour chaque profil :

Selon la codification SENSO (ref Tableau 1) :

- La caractéristique de dispersion des ondes de surface en fonction de la fréquence $v_{ph}(f)$

(Fig.2.c)

- observable 1 = Vitesse apparente V_a de l'onde de surface qui représente une moyenne des deux vitesses de groupe et de deux vitesses de phase calculées de manière différente (Fig.2.b)
- L'atténuation en fonction de la fréquence $\alpha(f)$ (fig.2.d)
- Observable #15 = L'atténuation $\alpha_c = \alpha(f=f_c)$ ou f_c est la fréquence d'étude fixée par l'opérateur (Fig.2.c)
- Observable #17 = coefficient de qualité $Q(f_c) = \frac{V_g}{V_p} \text{ ou } \alpha_c = V_a/f_c$ (Fig.2.c)

Selon de la codification ACDC (ref Tableau 1 et Fig.2.c)

- Observable #18 = La vitesse de phase $V_{ph}(\varnothing_m=3 \text{ cm})$
- Observable #21 = La vitesse de phase $V_{ph}(\varnothing_m=3.5 \text{ cm})$
- Observable #24 = La vitesse de phase $V_{ph}(\varnothing_m=5 \text{ cm})$
- Observable #23 = Le gradient G qui exprime la variation de vitesse en fonction de la profondeur définie comme

$$G = \frac{\Delta V \left[\frac{m}{s} \right]}{\Delta \lambda [mm]} = \frac{V_p - V_s}{\lambda_p - \lambda_s}$$

ou \varnothing_p et \varnothing_s sont choisies par l'opérateur, typiquement comme $\varnothing_p = V(f_{min})/f_{min}$ et $\varnothing_s = V(f_{max})/f_{max}$

Les observables 1 à 9 sont ensuite moyennés pour M profiles. La valeur moyenne plus l'écart type constituent les paramètres de sortie (résumés dans les tableaux 2.1 et 2.2 et illustrés sur la figure 2). Ils sont enregistrés automatiquement sous format Excel.

4 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure se fait sur la base de mesure sur la plaque de plexiglas, La vitesse obtenue devrait être proche de $V_a=1270\pm 10$ m/s pour $B= 100-300$ kHz

Tab.2.1 Observables 1 à 5 déterminées à partir les signaux enregistrés pour M profils

Grandeur calculée	Vitesse apparente V_a	Courbe de dispersion $V(f)$	L'atténuation α_c	Courbe d'atténuation $\alpha(f)$	Coefficient de qualité Q
Unité	m/s	m/s	dB/m	dB/m	Sans unité
Valeur finale de l'observable de sortie pour M profils	Valeur moyenne de V_a + écart type σ_{V_a}	Valeur moyenne des courbes de dispersion $V(f)$ + écart type $\sigma_{V(f)}$	Valeur moyenne α_c + écart type σ_{α_c}	Valeur moyenne des courbes d'atténuation $\alpha(f)$ + écart type $\sigma_{\alpha(f)}$	Valeur moyenne des Q + écart type σ_Q

Tab.2 Observables 6 à 9 déterminées à partir les signaux enregistrés pour M profils

Grandeur calculée	Vitesse de phase $V_{ph}(3\text{cm})$ $V_{ph}(\Delta=3\text{ cm})$	Vitesse de phase $V_{ph}(3.5\text{cm})$ $V_{ph}(\Delta=3.5\text{ cm})$	Vitesse de phase $V_{ph}(5\text{cm})$ $V_{ph}(\Delta=5\text{ cm})$	Le gradient de vitesse G
Unités	m/s	m/s	m/s	m/s/mm
Valeur finale de l'observable sortie pour M profils	Valeur moyenne de V_{ph} + écart type $\sigma_{V_{pv}}$	Valeur moyenne de V_{ph} + écart type $\sigma_{V_{pv}}$	Valeur moyenne de V_{ph} + écart type $\sigma_{V_{pv}}$	Valeur moyenne des G + écart type σ_G

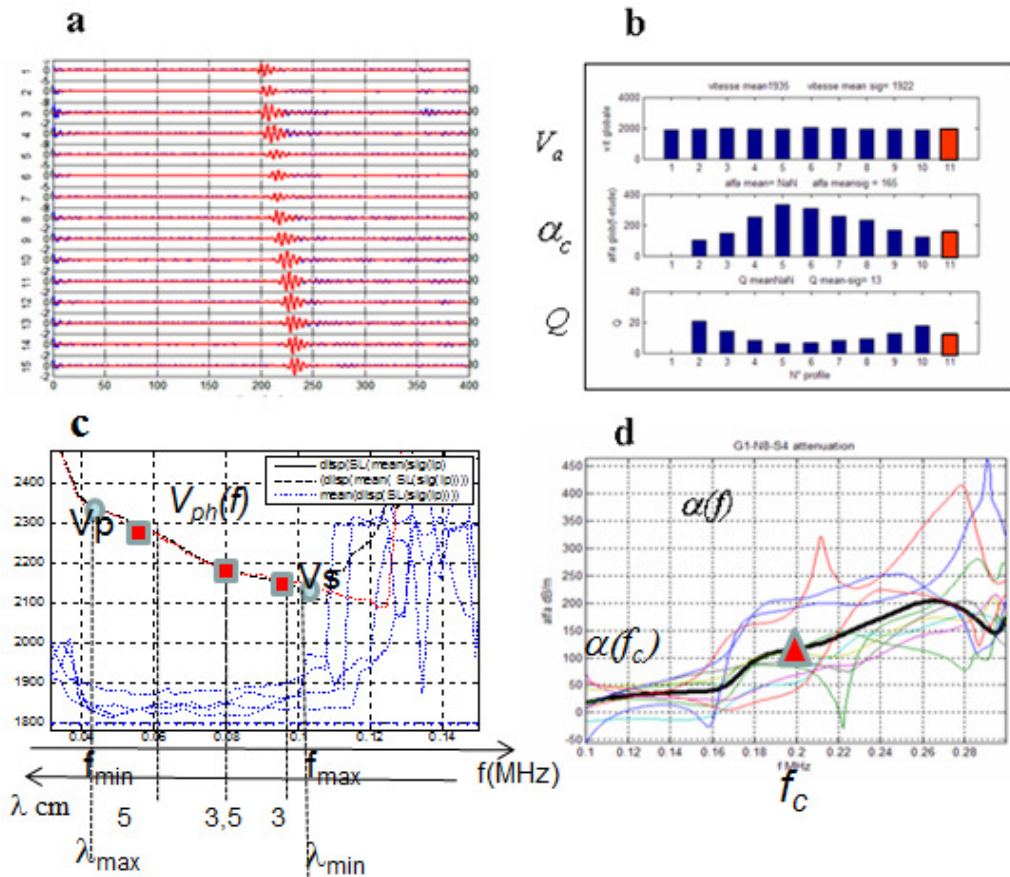


Figure 2. Exemple des résultats obtenus sur une dalle de béton à partir de la mesure comprenant $M=10$ profils **a)** données d'entrée $x_i(t)$ (1 profil) pour $i=1... N=15$ **b)** Vitesse V_e , atténuation $\alpha(f)$ et $Q(f)$ pour le profil 1, 2,...10 et leurs valeurs moyennes (valeurs #11 en rouge); **c)** Caractéristiques moyennes de la dispersion de vitesse $\alpha(f)$ pour une maille avec $M=1,2,3,4$ avec l'illustration des vitesses V_s , V_p cercles bleus) et vitesses $V_{ph}(\lambda=3\text{ cm})$, $V_{ph}(\lambda=3.5\text{ cm})$, $V_{ph}(\lambda=5\text{ cm})$ (carrés rouges). **d)** caractéristiques de l'atténuation $\alpha(f)$ pour $M=1, 2...10$ la caractéristique moyenne et $\alpha_c = \alpha(f=f_c)$

5 Incertitudes et variabilité

- L'incertitude des mesures est obtenue à partir de l'écart-type calculé sur une maille (pour M profils)
- Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :
- Variabilité (V1): variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques non destructives intervenant sur le site.
- Variabilité (V2): variance calculée sur chaque maille à partir des $M=4$ points de mesure à minima. La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les mailles traitées.
- Les calculs des écart-types se font par les relations:

$$Var = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{et} \quad \text{Ecart type} = \sqrt{Var} ;$$

Sous Excel 2007, ces fonctions sont désignées par "ECARTYPEP" et "VAR.P".

6 Format de données

- Les valeurs des observables obtenues sont listées en format Excel : la 1^{ère} colonne donnant

des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduite, la 3^{ème} colonne donne son écart type.

7 Sources d'erreur

- Déplacement du récepteur non parallèle à la surface inspectée (non planéité du matériau), aciers dans la maille prospectée, microfissures, signal trop faible.
Nota : Toutes ces erreurs peuvent être évitées/minimalisés/compensées par un réglage correct de l'appareil ainsi qu'a posteriori à l'étape de traitement.
- la surface inspectée devrait être propre et dépoussiérée.

8 Conditions et limites d'utilisation

- La profondeur de ferrailage doit être supérieure à 2,5
- L'épaisseur de la structure étudiée doit rester supérieure à 200 cm.
- Un béton trop dégradé et poreux peut trop atténuer les signaux, les rendant inexploitable

9 Coût

- 2 opérateurs qualifiés
- Rendement : une maile (à raison de 5 profils par maille) => 30 min sans compter l'installation
- L'installation : 1h
- Calibration : 0.5h
- Déplacement d'une zone à une autre 0.5h
- Traitement des données : 2-3 jours pour 1 jour de chantier
- Matériel : ~60 k€ (à amortir)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°6-indice 0

Technique onde de surface (mesure avec un interféromètre laser)

Vitesse de phase à la longueur d'onde X-cm (obs n°3 ou n°4)

Vitesse apparente (similaire vitesse de groupe si milieu non dispersif, obs n°2)

1 Objectif de la technique

Mesurer la courbe de dispersion de la vitesse de phase de l'onde de surface qui est fonction de propriétés mécaniques du matériau (module de cisaillement et densité). Quelques vitesses de phase, à différentes longueurs d'onde, sont extraites de la courbe de dispersion pour fournir les observables retenues dans le projet SENSO. Si ces vitesses diffèrent une modification des propriétés mécaniques du béton avec la profondeur peut être suspectée.

Mesurer une vitesse apparente obtenue par pointé des maxima (si le milieu est non dispersif correspond à une vitesse de groupe).

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- L'état de surface doit être suffisamment lisse.
- La zone d'expérimentation doit être protégée de la pluie.
- La profondeur d'investigation est de quelques centimètres.
- Le profil (ou ligne de mesures) ne doit pas suivre un acier.
- Paramètres d'influence :
Formulation du béton, endommagement, fissure

3 Définition des points de mesure par zone de mesure

- Une zone de mesure est composée de 4 mailles.
- Dans chaque maille repérée au préalable sur la structure et sur le plan, une unique mesure est réalisée autour du centre de celle-ci (point de mesure) suivant un profil d'un peu moins de 0.4m. La mesure est affectée au centre de la maille. Le profil est vertical.

4 Calibration – vérification matériel

Il n'existe pas encore de dispositif d'étalonnage. Un bloc de verre de dimension similaire à celle des dalles du projet SENSO (0.5 m x 0.12 m x 0.25 m) est envisagé.

5 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Le banc de mesure réalisé comporte : un interféromètre laser Polytec (OFV-505 + OFV-5000 + VD-02), une carte d'acquisition et une carte de génération GAGE CS1610, un amplificateur RITEC, un capteur piézoélectrique IMASONIC centré sur 120 kHz, un moteur pour le déplacement du robot, une règle optique, un programme de pilotage sous labwindows CVI.
- Alimentation en 220V nécessaire.

- Pour les mesures sur les piles du SETRA un dispositif spécifique (Fig.1) est en cours de réalisation (disponible fin 2012). Sa maniabilité n'est pas connue à ce jour.
- Le centre des mailles les plus basses devra se situer à plus de 1,3 m de hauteur (abaissement de cette limite à 0.9 m en cours d'étude) du niveau du sol. Du côté du talus cette hauteur sera revue à la hausse lors des premiers essais.

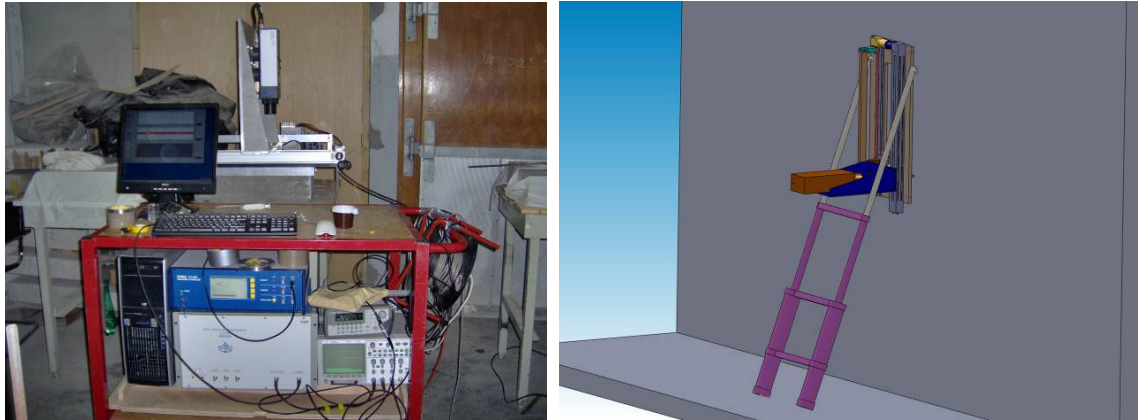


Figure 1. A gauche : photographie du matériel ; à droite : représentation schématique du dispositif envisagé pour les piles de pont du SETRA.

- Préchauffe du matériel pendant 20 minutes
- Collage d'un scotch verticalement sur une longueur de 0.4 m centré sur le point de mesure
- Mise en position du robot et de la source
- Vérification du rapport signal sur bruit en trois point du sismogramme (1er point, dernier point, point milieu)
- Réglages des paramètres d'acquisition
 - Echantillonnage temporel des signaux : 10MHz sur 16 bits théoriques sur 13000pts
 - Echantillonnage spatial : 0.5 cm
 - Aucun filtre
 - Sommation (stacking) : 256
- Acquisition : un fichier par maille
- Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier
- Sauvegarde du fichier
- En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,
- Sauvegarde sur clé USB

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

Utilisation d'un programme de traitement du signal sous scilab.

- Calcul de la vitesse apparente du train d'onde de surface (régression linéaire sur les pointés des maxima) en supprimant les traces trop bruitées manuellement et écart-type correspondant.
- Calcul de la courbe de dispersion de vitesse de phase des signaux fenêtrés (Fig.2) à partir de l'ensemble des traces.
- Extraction de la vitesse de phase pour six longueurs d'onde (1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 6cm). Moyenne sur les valeurs obtenues ± 5 mm.

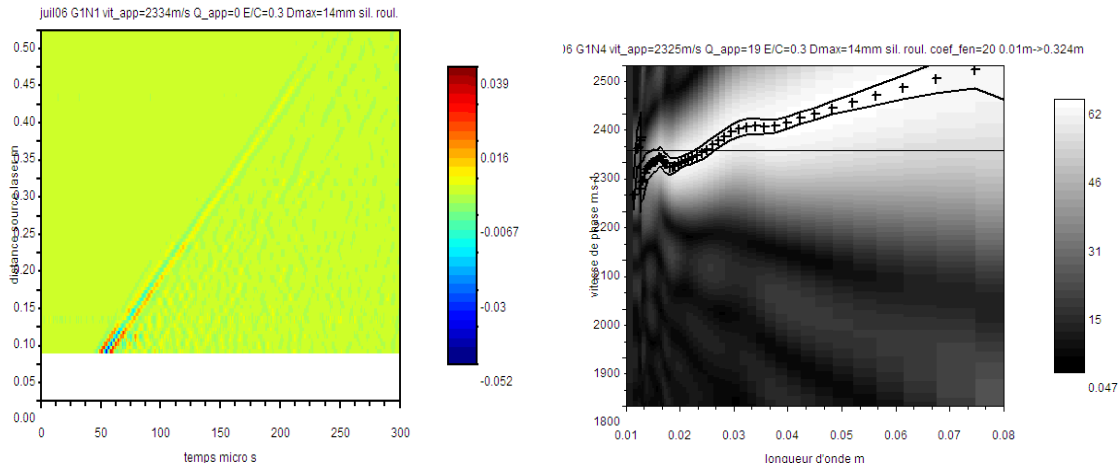


Figure 2. A gauche : sismogramme brut. A droite : Courbe de vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde.

6 Incertitudes

- Un écart-type, issue du calcul de la courbe de dispersion, est associé à chaque valeur de vitesse de phase.

7 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne la valeur de l'observable déduit et la 3^{ème} un écart-type.

8 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais état de surface.
- Mauvais contact de la source.

9 Coût

- 2 opérateurs qualifiés
- Rendement très faible: 2 mailles par heure attendues sur les piles du pont du SETRA. A cette durée devra s'ajouter l'amené et le repli du matériel (s'il est nécessaire de démonter le dispositif chaque jour le nombre de maille mesurée en sera notablement affecté).
- Traitement des données (par jour de chantier) : 1 jour
- Matériel : ~200 k€

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°7-indice 0

Technique ultrasonore

Vitesse par transmission des ondes de pression (obs n°11)

1 Objectif de la technique

L'objectif est de mesurer le temps de parcours de l'onde mécanique. La vitesse des ondes directes est déduite à partir de la connaissance de la longueur du trajet de l'onde de pression.

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés en transmission ou en réflexion sous les conditions suivantes :

- L'épaisseur des parois à ausculter peut atteindre jusqu'à 60 cm en transmission.
- Pour des essais en réflexion l'épaisseur pouvant être auscultée est sensiblement plus faible et se limite fréquemment à 20 cm.
- La mesure se fait en transmission avec un transducteur émetteur et un transducteur récepteur de fréquence centrée autour de 250 kHz.
- La mesure se fait en réflexion avec un transducteur émetteur-récepteur de fréquence centrée autour de 250 kHz.
- Un béton trop poreux peut atténuer de façon importante les signaux les rendant inexploitable.
- Un état de surface trop mauvais peut perturber le contact des transducteurs avec le béton.
- Paramètres d'influence :
Nature des granulats, ferrailage, type de ciment, porosité, non planéité, teneur en eau, température, vieillissement, fissuration

3 Définition des points de mesure

- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille. Les mailles sont repérées à l'avance par radar haute ou basse fréquence. Les armatures sont alors tracées sur la paroi.
- Dans chaque maille, nous définissons à minima 4 points de mesures décorrélés spatialement. Les points de mesure et de positionnement des transducteurs seront repérés préalablement sur les faces recto et verso des piles.
- La valeur moyenne pour chaque maille est affectée au centre de la maille. L'écart type de ces 4 mesures à minima est retenu comme la variance V_2 de la maille.
- Dans le cas où la taille de la maille est trop petite pour réaliser plusieurs mesures décorrélées, la zone de mesure est alors définie sur quatre mailles voisines. La moyenne générale des mesures pour une zone de mesure est alors affectée au centre des 4 mailles.

4 Traçage des points de mesure

Vérifier la correspondance géométrique des points de mesure entre les deux faces et dans les mailles.

Repérer et tracer les 4 points à minima de mesure dans chaque maille sur chaque face à ausculter.

5 Mesure des épaisseurs des piles

Mesure de l'épaisseur à différentes positions aux extrémités de la paroi.

Vérification de la planéité de chaque face et interpolation pour obtenir la valeur spécifique de chaque zone de mesure

Si les carottes réalisées pour faire les ED sont traversantes, il est important de mesurer la longueur exacte de chaque carotte pour étalonner les mesures d'épaisseurs.

6 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure se fait au début et à la fin des mesures sur chaque pile (4 zones) sur la base de 6 mesures en transmission à travers un cylindre d'aluminium de 20 cm de longueur et de 8 cm de diamètre. Si un décalage apparaît par rapport à la valeur usuelle enregistrée en laboratoire il faut le noter et en tenir compte ci comme élément correctif sur la mesure du temps.

7 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Le couple de transducteurs ultrasonores génère des ondes de pression (longitudinales) de fréquence centrale 250 kHz.
La bande passante dans la pièce de référence en aluminium est 120 à 370 kHz à -6dB
La bande passante dans le béton est limitée généralement suivant l'épaisseur à 150 à 200 kHz.
- Le couplant est un gel échographique de type médical ou une graisse de type silicone
- Type d'appareil utilisé :

Ensemble de génération amplificateur Le contrôle ultrasonore est effectué par transmission à l'aide de transducteurs émetteur et récepteur placés au contact de la pièce. La chaîne de mesure est présentée par la figure ci-dessous.

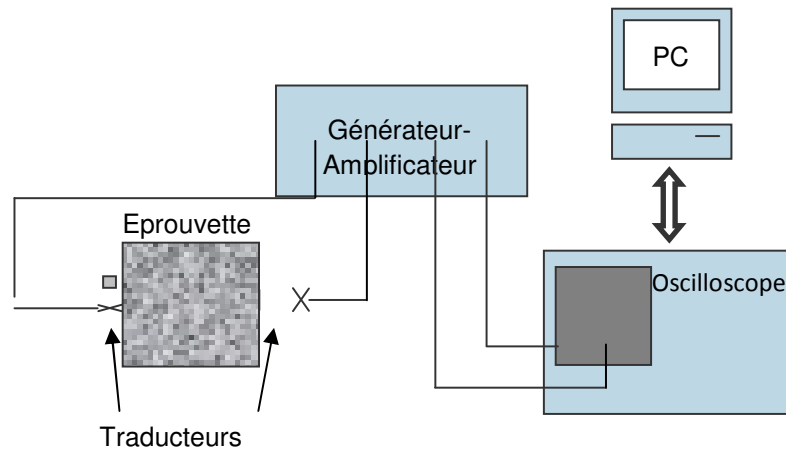


Figure 1: Chaîne d'acquisition

Configuration 1 :

Le générateur d'impulsion est un Sofranel 5058 PR

L'oscilloscope utilisé pour l'ensemble des mesures est un Lecroy. L'acquisition est effectuée sur un ordinateur portable équipé d'une carte d'acquisition.

Réglages des paramètres d'acquisition:

Fréquence de répétition	100 Hz
Tension	400 V
Damping	50
Gain	40 dB
Atténuation	0 dB
Filtre Passe Haut	30 kHz
Filtre Passe Bas	Out kHz
Base temps oscilloscope	10 μ s
Amplification oscilloscope	50 mV
Nombre de points	10 ⁵

Configuration 2 :

Le générateur – oscilloscope est de type picoscope associé à un amplificateur de puissance.

Les paramètres sont en cours d'optimisation sur la base d'essais préliminaires à travers un corps d'épreuve de 50 cm et seront à ajuster sur place.

- Acquisition :

Mise sous tension de l'ensemble et essai de vérification sur la pièce de référence en aluminium.

Positionnement du traducteur émetteur sur un des points de mesure.

Positionnement du masque de mesure pour la réception centré sur le point de mesure correspondant. Le masque est une plaque ayant une découpe circulaire de deux fois le diamètre du traducteur.

Acquisition en déplaçant en rotation régulière le traducteur récepteur dans l'espace libre du masque le masque. Acquisition d'un signal moyenné sur 100 acquisitions. Durée d'une acquisition 10 sec.

- Format des acquisitions

Un signal par point de mesure soit 6 points par maille et 24 signaux par zone de mesure.

La notation sera faite de 1 à 24 pour une zone de mesure avec depuis le point haut gauche vers le point bas droite de chaque maille et depuis la maille haute gauche vers la maille basse droite.

- Documentation

Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier

Vérification de la taille des fichiers et sauvegarde sur clef USB à la fin de chaque zone de mesure

En fin de chantier exploitation et sauvegarde sur disque dur.

Valeur déduite – après traitement (sur place)

Sur une application Matlab propre au LCND,

Chargement automatique des fichiers d'une zone de mesure

Visualisation des signaux pour chaque mailles et repérage des signaux aberrants

Pour chaque signal détermination de la droite statistique en amont du signal ultrasonore.

Détermination du bruit électronique

Extraction du point d'arrivée du signal ultrasonore.

Détermination de la vitesse par mesure, par maille

8 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur chaque point de chaque maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.
- Une synthèse de chaque maille avec la valeur moyenne et l'écartype sur la totalité de la population est proposée sous forme de tableau.

9 Variabilité des mesures

Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :

Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques non destructives intervenant sur le site.

Variabilité (V2) : variance calculée sur chaque maille à partir des 4 points de mesure à minima. La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les mailles traitées.

Les calculs se font sur la totalité de la population par la relation
$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Sous Excel 2007, les fonctions sont désignées par "ECARTYPEP" et "VAR.P".

10 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais couplage des traducteurs
- Mauvais repérage des armatures
- Armatures croisées sur le parcours en profondeur
- Surface rugueuse
- Dérive de l'électronique et du signal en raison de variation de conditions environnementales évoluant (Hygrométrie et température ambiantes, à mesurer lors de la campagne expérimentale)

11 Coût

- 2 opérateurs qualifiés
- Traçage des points de mesure 2 heures
- Acquisition : 15 mn par maille
1 heure par zone de mesure
- Traitement des données : 10 mn par zone de mesure si données correctes et si traitement automatique.
- Matériel : ~10 k€

Protocole par technique-C2D2 – ACDC-n°8-indice 0

Mesure par la technique du rebond (Obs N°19)

1 Objectif de la technique

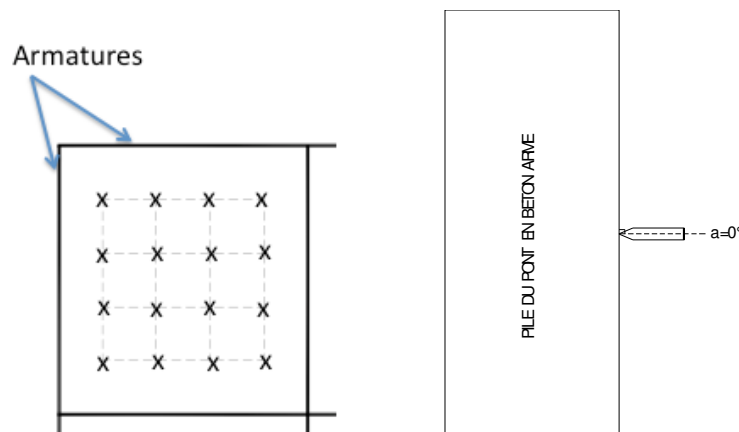
Mesure de l'indice de rebondissement « sclérométrique » pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de surface de l'élément en béton (ou en béton armé). La dureté est corrélée à la résistance mécanique par des lois de calibration.

2 Domaine d'application

- Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas des nids de gravier, des écaillages, une rugosité élevée ou des armatures.
- Facteurs influents : angle d'inclinaison de l'appareil, épaisseur de l'élément à ausculter, l'état d'humidité de la surface étudiée, type du ciment, nature et dimensions des granulats, armatures, rugosité de surface du béton, épaisseur carbonatée.

3 Définition des points de mesure par zone d'essai

- Une zone d'essai est composée d'une maille d'armatures. Une maille est d'une taille minimale de 15x15 cm².
- La surface de mesure est divisée en grille de points avec un espacement $d = 30$ mm. Dans chaque maille, 16 mesures de rebondissement sont effectuées.



4 Appareillage - Etalonnage

- Scléromètre SCHMIDT 2000 pour un béton usuel.
- Pierre à polir :

La pierre à polir est une pierre abrasive de texture à grains moyens. Elle est utilisée pour la préparation des surfaces de mesures. Elle en élimine les irrégularités les plus marquées qui peuvent perturber les mesures.

- Bloc d'étalonnage

La vérification du bon fonctionnement de l'appareil est effectuée sur un bloc en acier. On pose le bloc d'étalonnage sur une assise rigide et plane, 2 séries de 16 mesures espacées de 10 secondes et on calcule la moyenne de l'indice de rebondissement \bar{R} de la deuxième série. La position de l'appareillage doit être verticale. Selon le type d'appareil utilisé :

si $\bar{R} = 80 \pm 2$: le fonctionnement de l'appareillage est satisfaisant.

si $\bar{R} > 82$ ou $\bar{R} < 78$: l'appareillage est défectueux

5 Mode opératoire

- Contrôler au préalable l'état du scléromètre par l'essai d'étalonnage sur le bloc en acier.
- Préparation de la surface : La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent ou à poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau doit être essuyée.
- Localiser des points de mesure sur la surface par un marqueur et une plaque de gabarit avec des trous ayant un espacement de 30 mm.
- Réaliser les 16 mesures (une mesure par point). L'appareillage doit rester perpendiculaire à la surface de mesure.
- Le temps entre deux mesures doit être d'au moins 10 secondes pour éviter la dérive et la diminution des constantes de ressort après plusieurs utilisations.
- Noter les valeurs de rebondissement sur la feuille de mesure.

6 Incertitudes (V1, V2, V3)

- V1 n'est pas possible à évaluer car la répétition des mesures sur le même point affecte fortement la mesure (l'impact répétitif endommage ponctuellement la surface du béton).
- V2 est obtenue sur la base de la variance entre les 16 mesures d'une zone d'essai.
- V3 est obtenue sur la base de la variance entre plusieurs zones de mesures sur le même élément (ex : une face d'une pile).

7 Format des données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.

8 Source d'erreur potentiel

- Une surface rugueuse : des nids de gravier, des écaillages, une porosité élevée ou des armatures proches de la surface de mesure ;
- Répétition de mesure sur un ancien point ;
- Dérive des constantes de ressort du scléromètre (ex : temps entre deux mesures inférieur à 10 secondes).
- Inclinaison de l'appareil de mesure par rapport à la surface auscultée

9 Coût

- 1 opérateur
- Rendement : Avec un opérateur, moins de 5 minutes pour mesurer le rebondissement d'une zone d'essai constituée de 16 points de mesures.
- Traitement des mesures : 2 heures pour une journée de mesures
- Matériel : 450 euros (source : www.metland.fr)

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°9-indice 0

Technique ultrasonore

Vitesse par transmission indirecte d'ondes ultrasonores (Obs n°20)

1 Objectif de la technique

Mesure de la vitesse des ondes ultrasonores en transmission indirect. La vitesse ultrasonore indirecte d'ondes ultrasonores est déduite par l'espacement fixé entre deux transducteurs piézoélectriques (7 cm dans le cas de cette étude).

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sous les conditions suivantes :

- Évaluation de l'homogénéité du béton afin de détecter des zones de nature différente (ségrégation, composition, couche) ou d'endommagement particulier.
- Estimation de la résistance en compression, du module d'élasticité et du coefficient de Poisson du béton.
- La mesure ne dépend pas de l'épaisseur de la structure qui doit être d'au moins 7 cm.
- La mesure se fait en transmission indirecte avec un émetteur (E) et un récepteur (R) de fréquence centrée autour de 200 kHz (voir figure) ayant un espacement prédéfinie de 7 cm. La mesure est possible avec une fréquence plus faible (ex 54 KHz), dans ce cas l'espacement doit être augmenté.

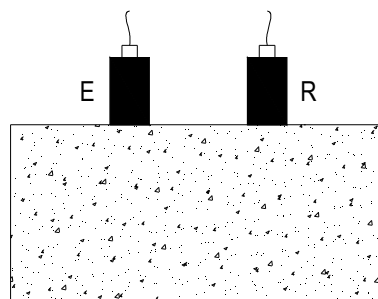


Fig. 1. Configuration de mesure en transmission indirecte

- Un béton trop poreux peut atténuer de façon importante les signaux les rendant inexploitable.
- Un état de surface trop mauvais peut perturber le contact des transducteurs avec le béton.
- Paramètres d'influence :
Nature des granulats, ferrailage, type de ciment, porosité, non planéité, teneur en eau, température, vieillissement, fissuration, qualité du couplant, pression exercée sur les transducteurs.

3 Définition des points de mesure par zone de mesure

- La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille d'armatures à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en (généralement pour des mailles supérieures à 20 cm). Dans le cas de

mailles d'armatures plus serrées une zone correspond à 4 mailles peut être considérée pour calculer la variabilité V_2 en réalisant une mesure par maille. Les mailles sont repérées à l'avance par radar ou pachomètre. Les armatures sont alors tracées sur la paroi.

- Dans le cas des grandes mailles (correspondant à une zone), 4 mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure – voir Fig. 2). L'espacement entre ces points de mesure peut varier de 70 à 100 mm selon les dimensions réelles des mailles.
- Dans le cas des mailles réduites, une mesure est réalisée au centre de chaque maille dans la direction horizontale ou verticale. Puis quatre mailles adjacentes sont auscultées. On peut donc obtenir dans ce cas quatre mesures dans une zone auscultée.
- La moyenne des mesures pour une zone de mesure est calculée sur la base de quatre mesures.

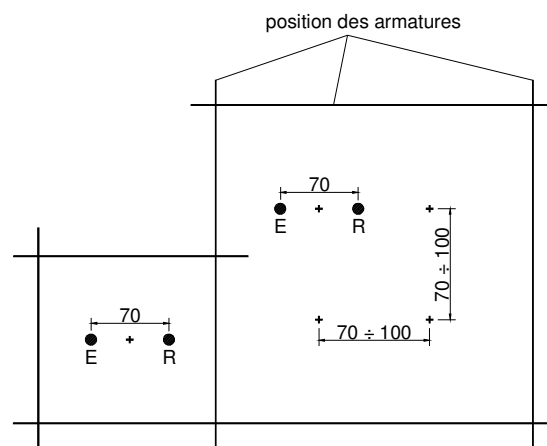


Fig. 2. Représentation de 4 positions de mesure par zone soit une maille
soit une combinaison de quatre mailles

4 Étalonnage – vérification du matériel

La vérification et l'étalonnage de l'appareil se fait au début des mesures. Le temps de référence doit correspondre à la valeur marquée une la barre de calibration du matériau synthétique (cet étalonnage peut également se faire sur un matériau modèle dont la vitesse de propagation est connue. Il est important de réaliser les mesures avec une source d'électricité continue afin d'éviter l'instabilité des signaux à cause de la chute de l'énergie de la batterie.

5 Mode opératoire

Valeur mesurée sur chantier

- Le couple de transducteurs piézoélectriques génère des ondes de pression (longitudinales) de fréquence centrale de 200 kHz.
- Le couplant est une pâte de contact blanche (95% vaseline). Le couplant est appliqué à chaque nouvelle mesure afin d'avoir un bon contact entre les transducteurs et le béton.
- Type d'appareil utilisé :
La mesure est effectuée par transmission indirecte à l'aide d'un générateur d'impulsion Pundit7 et d'un dispositif développé en laboratoire « I2M » permettant de fixer un espacement de 7 cm entre émetteur et récepteur (figure 3b).

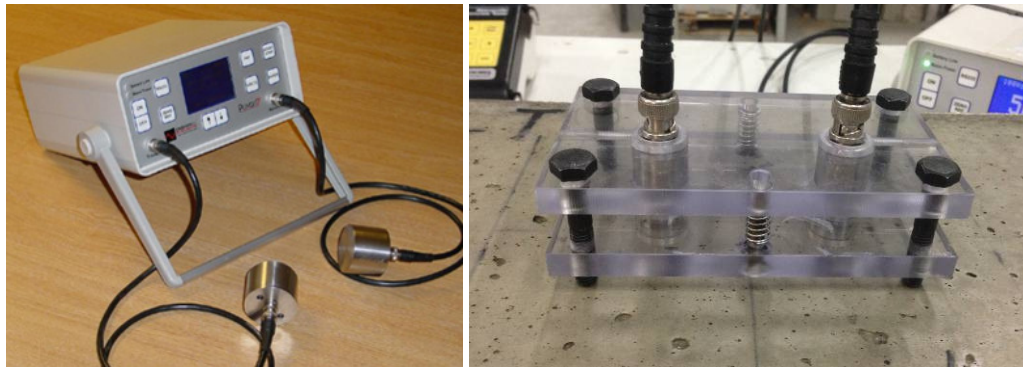


Fig. 3. (a) Générateur portable Pundit7 et (b) dispositif de mesure

- Acquisition :
Mise sous tension de l'appareil et test de calibration sur la barre de référence du matériau synthétique.

Mise en place d'une couche fine du couplant utilisé sur la surface des transducteurs.

Positionnement des transducteurs sur chaque point de mesure à l'aide de leur support (voir la figure Fig. 3b).

Pression manuelle constante sur le support jusqu'à stabilisation du temps de propagation des ondes ultrasonores qui est affiché sur l'écran de l'appareil.

Valeur déduite – après traitement (sur place)

À partir du temps mesuré, on calcule la vitesse ultrasonore indirecte, en m/s, pour chaque point de mesure par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{t} (m / s)$$

L est la distance entre émetteur et récepteur, elle est égale à 7 cm pour toutes les mesures.

La vitesse par zone est la moyenne des valeurs mesurées sur l'ensemble de la zone.

La vitesse par face d'élément ausculté est la moyenne de l'ensemble des valeurs mesurées.

6 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ascii ou Excel : la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée, la 2^{ème} colonne donnant la valeur de l'observable déduit.

7 Incertitudes

Variabilité V1 : variance calculée à partir de 10 mesures de répétabilité sur un même point d'une maille choisie comme peu soumis à des paramètres d'erreurs potentielles.

Variabilité V2 : variance calculée pour chaque zone à partir des points de mesure (normalement à partir de quatre points de mesure). La valeur de V2 retenue sera la moyenne des V2 sur toutes les zones auscultées ou mailles auscultées.

La variabilité V3 : variance calculée pour une face d'un élément à partir de l'ensemble des mesures.

8 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais couplage des transducteurs
- Mauvais repérage des armatures
- Surface rugueuse
- Pression variable sur le dispositif de mesure
- Dérive de l'électronique et du signal en raison de variation de conditions environnementales (température ambiante, à mesurer lors de la campagne expérimentale)

9 Coût

- 1 opérateur qualifié
- Acquisition : 10 min pour le branchement et étalonnage, 5 mn sur la base de quatre mesures par maille.

- Traitement des données : 2h pour une journée de mesures.
- Matériel : ~4 k€

Protocole par technique - C2D2-ACDC-n°10-indice 0

Technique Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

Vitesse des ondes de cisaillement (UPE_Vs, obs n°22)

1 Objectif de la technique

Mesurer le temps de propagation de l'onde de cisaillement réfléchi par la face opposée à la surface d'auscultation. La vitesse de l'onde de cisaillement (V_s) en est déduite.

2 Domaine d'application

Les essais peuvent être réalisés sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes :

- La face opposée à la face d'auscultation doit être parallèle (ou quasi parallèle) à la face d'auscultation.
- Une surface plane (ou faiblement rugueuse) est requise.
- Il est préférable d'éviter les armatures donc de placer le dispositif au centre des mailles.
- Paramètres d'influence :
Formulation, ferrailage, teneur en eau

- **Définition des points de mesure**

Dans chaque maille repérée au préalable sur la structure et sur le plan, cinq mesures sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure) en déplaçant légèrement l'ensemble du dispositif. La mesure est affectée au centre de la maille.

3 Calibration – vérification matériel

La vérification et l'étalonnage de la chaîne de mesure pourrait se faire sur une dalle de référence (ce protocole reste à définir).

4 Mode opératoire

Valeur mesurée – Sur chantier

- Type d'appareil utilisé :
 - Matériel de marque ACSYS (IFSTAR). Il est composé d'un tableau de 12 capteurs de cisaillement à pointes en émission et d'un tableau de 12 capteurs de cisaillement à pointe en réception. On considérera donc un émetteur et un récepteur.
- Charge de la batterie du système d'acquisition pendant la nuit précédente.
- Implantation des armatures par GPR de façon à positionner les mailles au centre desquelles vont être faites les mesures.
- Test préalable pour choisir les paramètres optimaux (durée d'acquisition, coefficient d'atténuation, amplification) en fonction du matériau et de la structure

- Exemple de réglages des paramètres d'acquisition pour une structure de 12 cm d'épaisseur :
Acquisition : signal temporel
Durée d'acquisition : 1234 μ s
Somme : 16
Filtre : ON
Atténuateur : 30dB
Vitesse estimée de l'onde à renseigner : 2200 m/s
- Acquisition :
Un fichier par zone de mesure
Acquisition maille par maille, sur toute la zone de mesure,
Acquisition de 5 signaux au centre de chaque maille,
- Rédaction des informations diverses sur cahier de chantier (T et HR comprises)
- Sauvegarde du fichier brut
- Traduction en fichiers « texte » ou « seg2 » et sauvegarde du répertoire correspondant
- En fin de chantier (ou fin de journée), vérification de l'existence et de la taille des fichiers,
- Sauvegarde sur clé USB des fichiers bruts et des fichiers « texte » ou « seg2 ».

Valeur déduite – après traitement (au bureau)

Utilisation d'un logiciel de visualisation et traitement des données radar (type ReflexW, Scilab ou Matlab).

IFSTTAR :

- Pointer de l'arrivée (premier maximum) de l'onde directe dans l'air
- Pointer de l'arrivée (premier maximum) de l'onde réfléchie se propageant dans le matériau
- Calcul de la vitesse de l'onde de cisaillement V_s connaissant l'épaisseur e de la structure auscultée :

$$V_s = \frac{2e}{\Delta t}$$

- Moyennage des vitesses par maille (calcul de la moyenne et de l'écart-type).
- Enregistrement du tableau de résultats par zone dans un fichier de type « texte ».

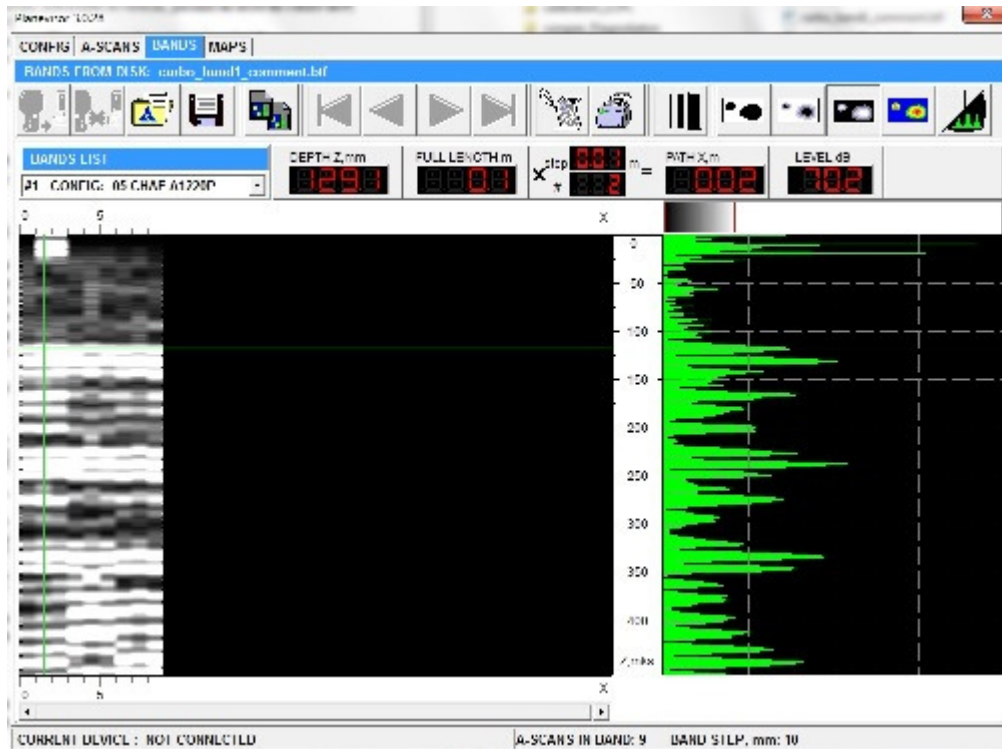


Figure 1 : Exemple de signaux enregistrés par UPE (ultrasonic pulse echo) sur une dalle carbonatée de béton C1 (projet ANR-EVADEOS).

5 Incertitudes

- L'incertitude est calculée à partir l'écart-type calculé pour chaque maille. Essais de répétabilité (au sens des termes utilisés dans le projet SENSO) :
 - Variabilité (V1) : Variance (carré de l'écart-type) calculée à partir de 10 mesures sur un même point d'une même maille. Cette variabilité peut être soit demandée par le protocole général d'auscultation pour un site donné, soit reprendre une valeur obtenue en laboratoire faute de mieux. A noter que sur site, la maille concernée doit être identique pour toutes les techniques intervenant sur le site.
 - Variabilité (V2) : variance calculée sur chaque maille à partir du point de mesure (Sous Excel, choisir la fonction « écart-type P »)

6 Format de données

- Valeurs en colonne listées au format ASCII ou EXCEL :
 - la 1^{ère} colonne donnant des informations sur la maille auscultée,
 - la 2^{ème} colonne donnant la valeur moyenne de l'observable déduit,
 - la 3^{ème} colonne l'incertitude sur cette observable.

7 Sources d'erreur potentielles

- Mauvais contact du récepteur (rugosité du matériau),
- Faible rapport signal sur bruit,

- Ensemble du dispositif trop proche d'une armature,
- Présence d'un objet enfoui (câble, vide, nid de cailloux, objet non identifié....).

Remarque : il est préférable de mesurer l'hygrométrie et la température ambiante sur chantier.

8 Coût

- Un opérateur qualifié
- Rendement variable selon le matériau et la structure : (à raison de 16 mailles par mètre carré) de l'ordre de 2x16 mailles/h
- Traitement des données (par jour de chantier) :
2 jours (1 personne)
- Matériel : ~60 k€ (à amortir)



Annexe R.7 : Sensibilité aux erreurs de mesure et choix des observables

La qualification des observables est l'étude de leur complémentarité en plus des Indices de Qualité IQ, variabilité et Estimateur de Qualité EQ. Nous définissons une « configurations » comme étant l'association de n observables dans le processus d'inversion. Elles sont sélectionnées en fonction de leur sensibilité aux erreurs de mesure et de la capacité de convergence de leur solution. La sensibilité aux erreurs doit être la plus faible possible. Cela revient à vérifier que le rapport entre la moyenne des erreurs (sur N essais) sur l'indicateur δI et celle sur l'observable δO soit tel que le ratio de sensibilité $\left\langle \frac{\delta I}{\delta O} \right\rangle \leq 1$. Si la valeur est faible le résultat de la fusion issu de cette configuration testée est faiblement sensible aux erreurs possibles lors de la mesure des END. De même nous suivons la dispersion des résultats de fusion par rapport à la dispersion des erreurs de mesure $\frac{\langle\langle \delta I \rangle\rangle}{\langle\langle \delta O \rangle\rangle}$. Cette valeur doit être minimisée aussi.

Ainsi les configurations les plus fiables d'observables peuvent être sélectionnées telles qu'elles minimisent les deux ratios précédents. Le choix des observables se fait en associant des techniques sensibles à des caractéristiques complémentaires du béton et prospectant à des profondeurs similaires dans le matériau. Des exemples de configuration sont proposés ci-dessous :

- 3 Observables: (1) 1US & 1EM & 1Re, (2) 2US & 1 EM, (3) 1US & 2EM
- 4 Observables: (1) 2US & 2EM, (2) 2US & 1 EM & 1Re, (3) 1 US & 2EM & 1Re
- 5 Observables: (1) 2US & 2EM & 1Re, (2) 2US & 3EM
- 6 Observables: (1) 2US & 3EM & 1Re

avec US : Ondes ultrasonores EM : Electromagnétique Re : Résistivité

Nous avons classé pour un nombre d'observables les configurations par sensibilité aux erreurs. Parmi celles qui sont de grandes profondeurs le classement est donné par le tableau suivant :

	N° observables	<dl/dO>		N° observables	<dl/dO>		N° observables	<dl/dO>
Bonnes	7 9 12 15	0,619	Moyennes	7 12 14 16	0,74	Mauvaises	5 12 14 15	0,845
	5 7 9 12	0,685		5 8 9 14	0,741		5 8 16 17	0,865
	5 8 12 16	0,691		5 8 12 14	0,742		5 12 15 17	0,869
	5 7 12 14	0,708		5 9 12 15	0,743		8 12 14 16	0,871
	5 8 9 12	0,717		7 9 12 16	0,765		5 8 12 17	0,893
	5 7 9 16	0,717		7 12 14 15	0,773		8 12 14 15	0,895

	5 7 12 15	0,718		5 7 9 15	0,777		5 9 12 16	0,909
	7 12 15 17	0,72		5 8 9 15	0,78		5 8 15 17	0,914
	5 8 9 16	0,72		5 12 14 16	0,8		5 8 14 17	0,966
	5 7 12 16	0,722		5 7 15 17	0,816		8 9 12 16	0,984
	5 7 9 14	0,726		5 7 14 17	0,817		5 12 16 17	1,07
	5 8 12 15	0,728		5 7 16 17	0,822		8 12 15 17	1,16
				8 9 12 15	0,836			
				5 7 12 17	0,842			

Tableau : Classement des configurations à 4 observables en fonction de la sensibilité aux erreurs.
<dl/dO>

Les conclusions de l'étude menée sur ce classement sont :

Certaines observables sont identifiées comme étant systématiquement liées aux configurations de plus grand ratio de sensibilité. Elles seront généralement éliminées pour la suite des inversions voire des mesures sur site si cette étude de sensibilité est réalisée en amont de la réalisation des END.

Une observable dont la projection de la variabilité (largeur de distribution) est proportionnellement très « fine » dans l'espace des indicateurs par rapport aux autres observables augmente la sensibilité de l'opérateur mathématique aux erreurs de mesure.

De manière générale, et d'autant plus que le nombre d'observables est faible, il est important de favoriser la présence des 3 physiques d'observables (US, EM et Re) pour obtenir un résultat fiable.

L'augmentation du nombre d'observables diminue le ratio de sensibilité. Ce résultat est cohérent puisque l'ajout d'observables apporte de l'information et rend moins sensible aux variations d'une des observables.

Il est possible de choisir des configurations les moins sensibles aux erreurs de mesure et ayant une hauteur seuil optimale.

Annexe R.8 :

Exemple de lois de corrélation issues de Senso.

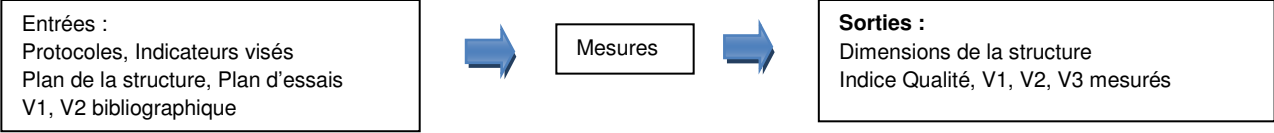
$$O_k = a_k + \sum_{j=1}^p b_k^j \cdot I_j$$

obs=a0+coesat*SAT+coefrésI*Rc		Tableau des coefficients des lois de corrélation : Base SENSO						
Observable		1	2	3	4	5	6	7
SENSO (VM) VM sur ED marly	a0	1,52E+03	1,53E+03	1,61E+03	1,53E+03	3,30E+03	2,48E+02	1,38E+01
	Saturation	2,84E+00	4,89E+00	4,41E+00	4,86E+00	8,74E+00	-1,27E+00	1,55E-01
	Résistatance	7,93E+00	8,39E+00	7,64E+00	8,17E+00	1,24E+01	-4,72E-01	2,75E-01
	R ²	8,04E-01	8,15E-01	8,18E-01	7,57E-01	7,23E-01	6,40E-01	6,42E-01
IFSTTAR VM sur ED Marly	a0					3,25E+03		1,55E+01
	Saturation					1,14E+01		3,05E-01
	Résistatance					9,56E+00		1,20E-01
	R ²					7,24E-01		8,16E-01
In-Situ Pas de VM	a0	2,76E+03	3,98E+03	2,91E+03	3,18E+03	4,65E+03	1,20E+02	3,06E+01
	Saturation	-6,37E+00	-1,75E+01	-1,18E+01	-5,19E+00	-8,29E+00	-1,77E+00	1,78E-02
	Résistatance	3,61E+00	-4,82E+00	5,95E+00	-7,99E+00	1,03E+01	1,09E+00	1,44E-01
	R ²	3,30E-01	2,17E-01	1,60E-01	3,17E-01	2,69E-01	1,63E-01	6,55E-01
(SENSO COH + TA) TA sur ED	a0	2,60E+03	2,50E+03	2,81E+03	3,07E+03	3,92E+03	2,89E+01	2,47E+01
	Saturation	3,23E-01	-2,96E+00	-4,30E+00	-5,44E+00	4,01E+00	4,01E-01	8,41E-02
	Résistatance	-3,19E+00	2,97E+00	-3,30E+00	-4,47E+00	7,39E+00	-2,68E-01	1,68E-01
	R ²	6,13E-02	6,42E-02	5,63E-02	2,94E-01	4,94E-01	3,60E-02	7,19E-01
SENSO (VM) VM sur ED marly	a0	2,78E+03	4,69E+00	6,77E+00	3,06E+00	2,71E+00	2,59E+00	5,59E-01
	Saturation	8,05E+00	9,78E-02	1,23E-01	-1,71E-02	-1,53E-02	-1,42E-02	-1,56E-03
	Résistatance	1,38E+01	-5,51E-02	-8,73E-02	1,87E-02	1,73E-02	1,79E-02	4,90E-04
	R ²	5,57E-01	9,59E-01	9,43E-01	7,88E-01	7,54E-01	7,11E-01	7,00E-01
IFSTTAR VM sur ED Marly	a0		5,43E+00			2,97E+00		
	Saturation		1,08E-01			-1,27E-02		
	Résistatance		2,87E-02			4,91E-03		
	R ²		9,44E-01			8,21E-01		
In-Situ Pas de VM	a0	2,39E+03	6,71E+00	1,25E+01	3,03E+00	2,93E+00	2,28E+00	5,71E-01
	Saturation	1,94E+01	5,33E-02	-2,55E-02	-2,63E-03	-4,99E-03	2,45E-02	-2,46E-03
	Résistatance	8,81E+00	-2,27E-02	-6,33E-02	4,99E-03	2,15E-03	-1,93E-02	-3,32E-04
	R ²	6,52E-01	9,92E-02	3,10E-01	5,54E-01	6,94E-01	1,00E+00	2,10E-01
(SENSO COH + TA) TA sur ED	a0	3,42E+03	9,90E+00	1,68E+01	3,89E+00	2,53E+00	3,26E+00	4,68E-01
	Saturation	2,28E+00	4,19E-02	-3,60E-02	-9,07E-03	2,18E-04	2,72E-03	-1,10E-03
	Résistatance	1,38E+01	-6,74E-02	-1,25E-01	-2,70E-03	3,28E-03	-6,18E-03	-2,45E-04
	R ²	5,08E-01	7,83E-01	3,87E-01	2,50E-01	2,80E-02	2,40E-01	2,11E-01
SENSO (VM) VM sur ED marly	a0	1,14E+01	1,25E+01	1,03E+00				
	Saturation	-1,72E-02	-3,00E-02	4,88E-03				
	Résistatance	5,78E-03	8,35E-03	-2,45E-03				
	R ²	6,04E-01	9,39E-01	9,35E-01				
IFSTTAR VM sur ED Marly	a0		1,22E+01					1,91E+03
	Saturation		-3,00E-02					9,84E+00
	Résistatance		-1,09E-02					2,85E+00
	R ²		9,38E-01					7,71E-01
In-Situ Pas de VM	a0	1,42E+01	9,09E+00	1,01E+00	2,48E+03	5,82E+01	3,02E+03	2,60E+03
	Saturation	-3,23E-02	2,15E-02	1,93E-03	-4,56E-01	-3,80E-02	3,54E+01	-2,25E+00
	Résistatance	-8,51E-03	-4,21E-03	-8,24E-05	4,42E-01	-8,56E-02	-2,08E+01	6,40E-01
	R ²	3,33E-02	1,06E-01	1,77E-01	3,96E-03	8,63E-02	3,85E-01	3,65E-02
(SENSO COH + TA) TA sur ED	a0	1,02E+01	1,31E+01	1,10E+00	2,62E+03	6,03E+01	6,08E+03	2,61E+03
	Saturation	8,37E-03	-3,48E-02	1,57E-03	7,78E-02	-5,18E-02	-4,10E+00	1,46E-01
	Résistatance	1,25E-02	-2,18E-03	-1,11E-03	-3,24E+00	-8,48E-02	-2,32E+01	-3,23E+00
	R ²	1,86E-02	7,44E-01	5,11E-01	5,95E-02	9,02E-02	3,11E-01	6,62E-02
	Observable	15	16	17	18	19	20	21
SENSO (VM) VM sur ED marly	a0	1,14E+01	1,25E+01	1,03E+00				
	Saturation	-1,72E-02	-3,00E-02	4,88E-03				
	Résistatance	5,78E-03	8,35E-03	-2,45E-03				
	R ²	6,04E-01	9,39E-01	9,35E-01				
IFSTTAR VM sur ED Marly	a0		1,22E+01					1,91E+03
	Saturation		-3,00E-02					9,84E+00
	Résistatance		-1,09E-02					2,85E+00
	R ²		9,38E-01					7,71E-01
In-Situ Pas de VM	a0	1,42E+01	9,09E+00	1,01E+00	2,48E+03	5,82E+01	3,02E+03	2,60E+03
	Saturation	-3,23E-02	2,15E-02	1,93E-03	-4,56E-01	-3,80E-02	3,54E+01	-2,25E+00
	Résistatance	-8,51E-03	-4,21E-03	-8,24E-05	4,42E-01	-8,56E-02	-2,08E+01	6,40E-01
	R ²	3,33E-02	1,06E-01	1,77E-01	3,96E-03	8,63E-02	3,85E-01	3,65E-02
(SENSO COH + TA) TA sur ED	a0	1,02E+01	1,31E+01	1,10E+00	2,62E+03	6,03E+01	6,08E+03	2,61E+03
	Saturation	8,37E-03	-3,48E-02	1,57E-03	7,78E-02	-5,18E-02	-4,10E+00	1,46E-01
	Résistatance	1,25E-02	-2,18E-03	-1,11E-03	-3,24E+00	-8,48E-02	-2,32E+01	-3,23E+00
	R ²	1,86E-02	7,44E-01	5,11E-01	5,95E-02	9,02E-02	3,11E-01	6,62E-02
	Observable	22						

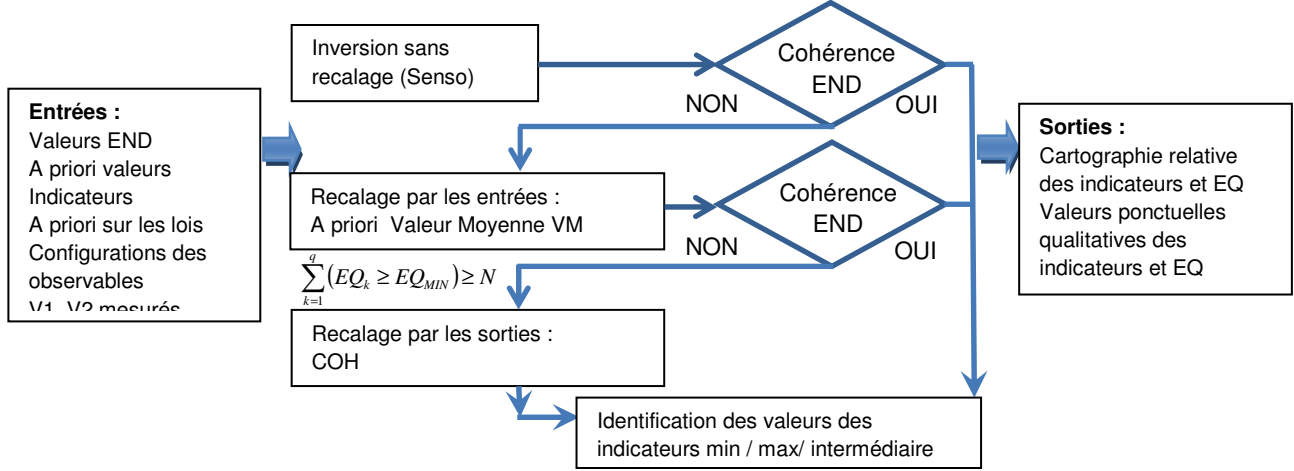
Annexe R.9 :

Principe d'inversion des données END et ED

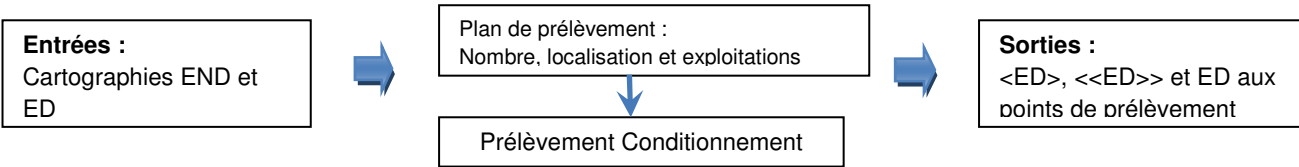
Etape 1 : Réalisation des END



Etape 2 : Interprétation des END



Etape 3 : Prélèvements END et ED



Etape 4 : Estimation des indicateurs

