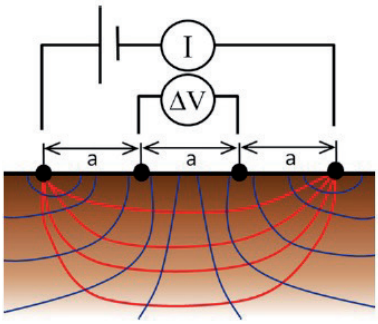
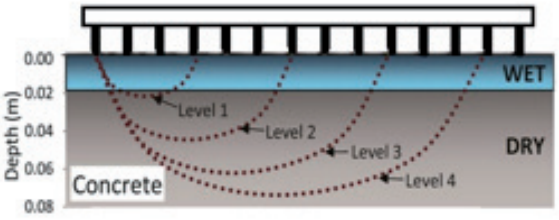
MESURE DE LA RÉSISTIVITE DU BÉTON

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

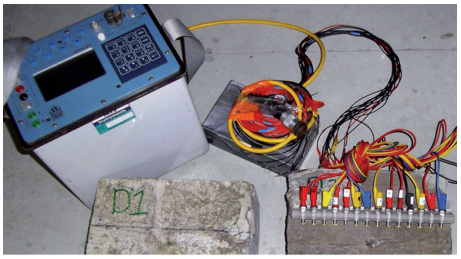
OBJECTIFS	Évaluation de la distribution de résistivité électrique du béton sous la surface auscultée. Évaluation de la teneur en eau moyenne ou du degré moyen de saturation du béton d'enrobage sous réserve de calibration préalable. Estimation du profil de teneur en eau ou du degré de saturation du béton d'enrobage sous réserve de calibration préalable.
PRINCIPE	La résistivité du béton est une grandeur intensive (pouvant varier d'un point à un autre) qui exprime sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Cette propriété intrinsèque dépend de la formulation du béton (microstructure, porosité), de son âge et méthode de cure, et de son état (hydrique, ionique, thermique). La méthode non-destructive d'estimation de la résistivité est basée sur la diffusion d'un champ électrique dans un volume de béton situé sous la surface d'auscultation. Un courant électrique continu *I* est injecté à l'aide de 2 électrodes et une différence de potentiel *U* (réponse du milieu) est mesurée entre 2 autres électrodes. Cette mesure est indirecte et intégrante. En multipliant le rapport de *U/I* par un coefficient géométrique *G* tenant compte de la disposition des électrodes et éventuellement de la géométrie de l'élément de structure ausculté, on obtient une quantité en Ω.m que l'on appelle « résistivité apparente » ρ_{app} : $$\rho_{app} = G\frac{U}{I}$$ En effet, si le béton était parfaitement homogène, cette observable serait égale à la résistivité du béton. Mais, en pratique, le béton est hétérogène et la mesure intègre la distribution de résistivité dans un certain volume. Ce volume d'investigation dépend du quadripôle d'électrodes (disposition, espacements) et des propriétés électriques du béton ausculté. Une cartographie de ces résistivités apparentes sur toute la surface de l'élément de structure ausculté apporte des informations nombreuses et parfois suffisantes pour différentier les zones humides des zones plus sèches. Pour remonter à la distribution de résistivité réelle (ex. : profil avec la profondeur), il faut mesurer plusieurs résistivités apparentes en jouant sur la position et l'espacement des électrodes et procéder à un calcul d'« inversion » qui peut être fait grâce à certains logiciels disponibles.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non



Principe d'une mesure de résistivité apparente par la méthode Wenner à 4 électrodes alignées et équidistantes (lignes de courant en rouge, équipotentielles en bleu. (Du Plooy et *al.* 2013)



Principe d'une tomographie de résistivité électrique utilisant un dispositif multi-électrodes et interrogeant toutes les combinaisons souhaitées à 4 électrodes (les pointillés rouges illustrent différentes profondeurs d'investigation accessibles. (Du Plooy et *al.* 2013

MATURITÉ	Méthode parfaitement maîtrisée pour la mesure de la résistivité apparente. Méthode maitrisée pour l'évaluation de la teneur en eau moyenne ou du degré de saturation moyen, mais nécessitant une calibration préalable sur une à trois carottes prélevées dans le béton concerné (Villain et *al.* 2018). Méthode en cours de développement pour l'évaluation de profils de teneur en eau ou de degré de saturation Dans tous les cas, la combinaison (complémentarité) avec d'autres sources d'information est nécessaire, afin de découpler les effets de plusieurs propriétés du béton sur sa résistivité
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Divers matériels existent dans le commerce. Un système de mesure est constitué d'un capteur composé de plusieurs électrodes, d'un générateur de courant (fonctionnant sur batterie), d'un ampèremètre et un voltmètre et d'un système d'acquisition et d'enregistrement. Les mesures sont stockées et traitées sur ordinateur portable ou stockées dans le système portatif et traitées *a posteriori*. Photos de matériels :  Exemple de matériel commercialisé pour la cartographie de résistivité de type Wenner (IFSTTAR)  Exemple de matériel pour tomographie de résistivité électrique : et sonde multi-électrodes (IFSTTAR)  Matériel développé pour la cartographie de résistivité : résistivimètre standard et quadripôles carrés de côté 5 cm ou 10 cm (Lataste, 2002)

MODALITÉS D'APPLICATIONS

DOMAINE D'APPLICATION	Toute structure en béton, béton armé ou béton précontraint.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Le matériel est portatif et autonome en énergie. Le contact des électrodes avec la face à ausculter se fait (dans la plupart des cas) grâce à de petites éponges humides. Il convient de prévoir une bassine avec de l'eau pour ré-humidifier, sans excès, les éponges tout au long de la campagne d'auscultation. L'accès à la face à ausculter doit être dégagé pour plaquer les électrodes. Le parement de béton doit être propre et ne doit pas comporter de défauts de surface trop importants (bulles, dépôts de laitance, etc.). Il est conseillé de mesurer les conditions extérieures de température et d'hygrométrie au moment de la mesure, en particulier la température de surface du béton.
LIMITES D'UTILISATION	La mesure peut s'avérer impossible si le parement en béton est trop sec ou si la surface est trop irrégulière (béton projeté, etc.). Le volume d'investigation et donc la profondeur auscultée dépendent du quadripôle d'électrodes (configuration et espacements) et des propriétés du milieu investigué. La profondeur d'investigation théorique vaut de l'ordre du quart de la longueur du quadripôle quand les électrodes sont alignées. La présence des armatures perturbe l'analyse et la précision de l'évaluation. Il est préférable de réaliser la mesure au centre d'une maille localisée au préalable par radar, par exemple, afin de s'affranchir au mieux des effets d'armature. Il est aussi intéressant de noter la position des électrodes par rapport aux armatures, La taille du dispositif doit ainsi être inférieure à la taille de la maille. Pour l'évaluation de la teneur en eau moyenne ou du degré de saturation moyen, il est nécessaire de déterminer les courbes de calibration sur une à trois carottes prélevées dans le béton concerné, par exemple selon la procédure décrite par (Villain et *al.* 2018).

PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	Grande sensibilité aux paramètres constitutifs du béton (formulation, porosité) et à ses paramètres d'état (thermique, hydrique, carbonatation, présence d'ions Cl, etc.). Ordre de grandeur de la précision : inférieure à 10 % sur site. La précision réelle est dépendante des conditions de mesure (état de surface, contact électrique, présence d'armatures) ; en outre, les positions des électrodes et la géométrie de l'élément doivent être soigneusement relevées.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Un chargé d'investigations et un chargé d'études au stade actuel de développement de la méthode.
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	Une face
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Bon rendement dans de bonnes conditions d'accès. Plusieurs mesures possibles en une minute. L'échantillonnage spatial est adapté au besoin (mesures simples, cartographie de surface, estimation de profils avec la profondeur, tomographies complètes, etc.).
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Délai bref (1 à quelques heures) pour une interprétation qualitative (cartographie). Délai plus long (1 à quelques jours) pour une interprétation quantitative fine (profils, tomographies).
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Présence d'éléments métalliques, existence d'activités électriques à proximité, fortes variations de température.
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Non (risques électriques faibles).
ENCOMBREMENT – POIDS	Faible encombrement – Léger à modérément lourd (dans le cas de la tomographie).
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Méthode non destructive, non contraignante pour l'environnement.
INCONVÉNIENTS	Impossibilité de faire des mesures sur un béton trop sec.
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Courante
COÛT	Faible (élevé dans le cas de la tomographie)
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	RILEM TC 154 : R.B. Polder. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. Construction and Building Materials, 15(2-3):125–131, March 2001. AASHTO Standard T358 (2011) et T358-17-UL (2017), "Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", https://bookstore.transportation.org/item_details.aspx?ID=3765 ASTM Standard WK37880 (2013) "New Test Method for Measuring the Surface Resistivity of Hardened Concrete Using the Wenner Four-Electrode Method", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org (cette norme s'applique uniquement à des cylindres de béton : mesure Wenner puis correction de l'effet géométrique) ASTM C1760 (2012) "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete"

NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Livres : Breysse D. et Abraham O. (Eds.) 2005. Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton, ouvrage collectif sous la direction de D. Breysse et O. Abraham, Presses des Ponts et Chaussées, (sept. 2005), 555 p. Lataste J-F., Villain G., Balayssac J.P. 2017. Chapter 4. Electrical Methods, In: Balayssac J-P., Garnier V. (Eds). Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures, ISTE Press Ltd & Elsevier Press Ltd, London, English Version (Nov. 2017) 356p. Références bibliographiques : Lataste, J.-F., 2002. Evaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesure de résistivités électriques. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I. Du Plooy R., S. Palma Lopes, G. Villain, X. Dérobert, 2013. Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition, NDT&E International, 54 (2013), 27 – 36. G. Villain, V. Garnier, M. Sbartaï, X. Dérobert, J-P. Balayssac, 2018. Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators, Materials and Structures, 2018, 51:40 available on line https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165- 4