

Table des matières

Préface	1
Thierry KRETZ	
Chapitre 1. Contexte et objectifs	3
Jean SALIN, Jean-Paul BALAYSSAC et Vincent GARNIER	
1.1. Les prémices de l'END	4
1.2. Le développement industriel de l'END	5
1.2.1. Les équipements sous pression	5
1.2.2. L'aéronautique	7
1.2.3. Le secteur de l'éolien	7
1.2.4. Les remontées mécaniques	8
1.2.5. En l'absence de normes	8
1.3. Les ouvrages de génie civil	9
1.3.1. Historique et problématique	9
1.3.2. La réglementation existante	11
1.3.3. L'évolution des besoins dans un contexte socio-économique de plus en plus prégnant	13
1.4. L'organisation de la surveillance des ouvrages de génie civil et la place de l'END	15
1.5. Résumé du développement de l'END	18
1.6. Contenu de l'ouvrage	21
1.7. Bibliographie	22
Chapitre 2. Méthodes ultrasonores	25
Cédric PAYAN, Odile ABRAHAM et Vincent GARNIER	
2.1. Introduction	25
2.2. Bases théoriques	26

2.2.1. Propriétés des ondes ultrasonores	26
2.2.2. Réfraction et réflexion	38
2.3. Description des méthodes usuelles	40
2.3.1. Familles de techniques	40
2.3.2. Ondes de volume	42
2.3.3. Ondes guidées	50
2.3.4. Sensibilité des ondes ultrasonores aux propriétés et caractéristiques du béton	54
2.3.5. Conclusion	62
2.4. Techniques innovantes	62
2.4.1. Objectifs	62
2.4.2. Élasticité non linéaire	63
2.4.3. Diffusion	71
2.4.4. Évaluation sans couplant	77
2.4.5. Évaluation sans contact	82
2.4.6. Conclusion	87
2.5. Synthèse	87
2.6. Bibliographie	93

Chapitre 3. Méthodes électromagnétiques 103

Xavier DÉROBERT, Jean-Paul BALAYSSAC, Zoubir Mehdi SBARTAÏ
et Jean DUMOULIN

3.1. Introduction	103
3.2. Bases théoriques	104
3.2.1. Propriétés électromagnétiques et phénomènes de polarisation	104
3.2.2. Propagation des ondes EM	108
3.2.3. Réflexion des OEM à l’interface de deux milieux	110
3.3. Description des méthodes électromagnétiques usuelles	111
3.3.1. Technique radar	112
3.3.2. Technique capacitive	117
3.3.3. Autres moyens de mesure : cellules de mesure en mode TEM, sondes coaxiales	119
3.3.4. Thermographie infrarouge (IRT – <i>InfraRed Technics</i>) : description du principe physique, méthodes actives et passives, paramètres influents	122
3.4. Applications usuelles et innovantes	128
3.4.1. Applications usuelles du GPR	128
3.4.2. Applications innovantes du GPR	136

3.4.3. Applications usuelles de la méthode capacitive	141
3.4.4. Applications innovantes de la méthode capacitive pour la caractérisation d'un gradient de permittivité	143
3.4.5. Application usuelle de la thermographie infrarouge (IRT).	145
3.4.6. Application innovante de l'IRT : exemple de recherche exploratoire sur le couplage avec GPR	148
3.5. Synthèse.	150
3.6. Bibliographie.	153

Chapitre 4. Méthodes électriques 159

Jean-François LATASTE, Géraldine VILLAIN et Jean-Paul BALAYSSAC

4.1. Bases théoriques	159
4.1.1. Conduction électrique dans les bétons.	159
4.1.2. Facteurs influents	161
4.1.3. Qualité des mesures, incertitudes.	167
4.2. Description des différentes méthodes résistives d'évaluation non destructive	171
4.2.1. Principe général	171
4.2.2. Cellule de mesure de la résistivité en laboratoire	171
4.2.3. Dispositifs à deux ou quatre électrodes	174
4.2.4. Dispositifs multi-électrodes pour tomographie de résistivité électrique (TRE)	177
4.2.5. Dispositifs scellés dans le béton	178
4.3. Applications usuelles et développements	178
4.3.1. Cartographie de résistivité.	178
4.3.2. Évaluation de gradient en profondeur	180
4.3.3. Classement de bétons en fonction de leur performance en durabilité ou de leur degré de dégradation.	182
4.3.4. Évaluation de l'orientation des fibres métalliques dans les bétons fibrés ultra-hautes performances (BEFUHP)	182
4.3.5. Pistes de développement.	184
4.4. Conclusion	186
4.5. Bibliographie.	188

Chapitre 5. Méthodes électrochimiques 197

Stéphane LAURENS et Fabrice DEBY

5.1. Introduction.	197
5.2. Bases générales sur la corrosion de l'acier dans le béton	199

5.2.1. Éléments de théorie	199
5.2.2. Causes et typologie de la corrosion de l'acier dans le béton	203
5.3. Mesure du potentiel électrochimique	206
5.3.1. Principe	206
5.3.2. Analyse critique	209
5.4. Mesure de la résistance de polarisation linéaire	210
5.4.1. Principe	210
5.4.2. Analyse critique	213
5.5. Mesure de la résistivité électrique du béton	217
5.6. Conclusion	219
5.7. Bibliographie	220

Chapitre 6. Qualité, incertitudes et variabilités 225

Jean-François CHAIX, Jean-Marie HENAUULT et Vincent GARNIER

6.1. Introduction	225
6.2. Variabilités du matériau : spatiale et temporelle	229
6.2.1. Généralités sur le béton	229
6.2.2. Variabilités dès la construction	230
6.2.3. Variabilités postérieures à la construction	232
6.2.4. Synthèse et objectif des investigations END	232
6.3. Volume élémentaire représentatif du béton vis-à-vis d'une END	233
6.4. Terminologie et formalisme métrologiques	235
6.4.1. Terminologie	235
6.4.2. Formalisme	239
6.5. Évaluation des incertitudes des END appliquées aux ouvrages en béton	240
6.5.1. Conditions de mise en œuvre, grandeurs d'influence, observables et indicateurs	240
6.5.2. Définition d'une référence	245
6.5.3. Erreurs de modèle	247
6.6. Qualification des méthodes d'END	247
6.6.1. Incertitudes et sensibilité	247
6.6.2. Quantification de l'incertitude et sélection des paramètres non destructifs	249
6.6.3. Exemple	251
6.7. Synthèse	254
6.8. Annexe	254
6.9. Bibliographie	256

Chapitre 7. Construction de modèles de conversion d'observables en indicateurs 259

Géraldine VILLAIN, Denys BREYSSE, Zoubir Mehdi SBARTAI
et Vincent GARNIER

7.1. Introduction : objectifs et besoins méthodologiques	259
7.2. Identification des paramètres du modèle de conversion	262
7.2.1. Cadre général	262
7.2.2. Identification directe des paramètres du modèle de conversion	265
7.2.3. Identification par recalage d'un modèle existant.	270
7.2.4. Comment choisir une procédure ?	276
7.3. Utilisation du modèle de conversion pour obtenir des indicateurs.	277
7.4. Incertitudes et précision des estimations, recommandations	280
7.5. Conclusion	283
7.6. Annexes	283
7.6.1. Identification d'un modèle de conversion par la méthode bi-objectif.	283
7.6.2. Références des modèles de conversion de la figure 7.5.	285
7.7. Bibliographie.	286

Chapitre 8. Évaluation des bétons par combinaison des techniques non destructives 291

Zoubir Mehdi SBARTAI, Vincent GARNIER, Géraldine VILLAIN
et Denys BREYSSE

8.1. Introduction.	291
8.2. Intérêt de la combinaison des END	293
8.3. Comment combiner les techniques d'END ?	294
8.3.1. Méthodes classiques	294
8.3.2. Méthodes innovantes.	303
8.4. Recalage des modèles de conversion pour la combinaison et la fusion des techniques END	315
8.4.1. Objectif et intérêt du recalage.	315
8.4.2. Méthodologies de recalage	316
8.4.3. Calibration des méthodes SonReb et régression multiple	317
8.4.4. Recalage des RNA	321
8.4.5. Recalage et fusion de données	322
8.5. Conclusion	327
8.6. Bibliographie.	329

Chapitre 9. Applications *in situ* 335

Géraldine VILLAIN, Jean-Paul BALAYSSAC et Vincent GARNIER

9.1. Introduction	335
9.2. Structure n° 1 : pont autoroutier de Marly	336
9.2.1. Concertation avec le maître d’ouvrage	336
9.2.2. Méthodologie expérimentale sur site	340
9.2.3. Programme expérimental d’essais destructifs et non destructifs sur carottes	342
9.2.4. Analyse des END sur site	346
9.2.5. Évaluation/Estimation des indicateurs	346
9.2.6. Conclusion et discussion avec les différents acteurs	350
9.3. Structure n° 2 : murs d’enceinte du CEA de Saclay	351
9.3.1. Concertation avec le maître d’ouvrage	351
9.3.2. Méthodologie expérimentale non destructive sur site	354
9.3.3. Programme expérimental destructif et non destructif sur carottes	357
9.3.4. Analyse des évaluations non destructives sur site	358
9.3.5. Combinaisons des évaluations non destructives sur site	361
9.3.6. Conclusion et discussion avec les différents acteurs	364
9.4. Conclusion et perspectives	364
9.5. Bibliographie	366

Chapitre 10. Guide méthodologique 369

Jean-Paul BALAYSSAC, Vincent GARNIER et Jean SALIN

10.1. Introduction	369
10.2. Méthodologie d’END d’une structure	371
10.2.1. Définitions	372
10.2.2. Prise de connaissance du cahier des charges END	372
10.2.3. Réalisation des essais non destructifs et extraction des observables	374
10.2.4. Réalisation des essais destructifs et évaluation des indicateurs	375
10.3. Mise en œuvre des techniques non destructives	376
10.3.1. Introduction	376
10.3.2. Choix des techniques non destructives et de leur combinaison	376
10.3.3. Étalonnage et protocoles de mesurage par techniques non destructives	380
10.3.4. Pré-auscultation	380
10.3.5. Auscultation détaillée	382
10.3.6. Caractérisation de la variabilité	382

10.4. Mesures destructives pour l'obtention des valeurs cibles des indicateurs	383
10.4.1. Prélèvement des carottes pour les essais destructifs	383
10.4.2. Essais destructifs sur les carottes	383
10.5. Fusion des observables	384
10.5.1. Identification des modèles de conversion	384
10.5.2. Fusion des observables	385
10.5.3. Recalage de la fusion	386
10.6. Rédaction du compte-rendu de l'évaluation	389
10.7. Évolutions de ce guide	390
10.8. Bibliographie	390
Glossaire	393
Liste des abréviations et symboles	395
Liste des auteurs	403
Index	405