

# ***ANALYSE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT DIFFERE DU BETON***

## ***APPLICATION AUX POUTRES MIXTES, PREFLECHIES ET PRECONTRAINTES***

### **Table des matières.**

|             |                                                                                               |           |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A.</b>   | <b><i>Application des méthodes basées sur le principe de superposition .....</i></b>          | <b>8</b>  |
| <b>1.</b>   | <b><i>Moteur de la recherche. ....</i></b>                                                    | <b>8</b>  |
| <b>2.</b>   | <b><i>Introduction.....</i></b>                                                               | <b>9</b>  |
| <b>3.</b>   | <b><i>Historique des poutres mixtes préfléchies.....</i></b>                                  | <b>10</b> |
| <b>3.1.</b> | <b><i>La poutre Préflex .....</i></b>                                                         | <b>10</b> |
| <b>3.2.</b> | <b><i>La poutre Flexstress.....</i></b>                                                       | <b>16</b> |
| <b>3.3.</b> | <b><i>Le pont-bac .....</i></b>                                                               | <b>18</b> |
| 3.3.1.      | <i>Extension et agrandissement de la gare de Bruxelles-Midi .....</i>                         | 19        |
| 3.3.2.      | <i>Entrée de la ligne à grande vitesse à Bruxelles-Midi.....</i>                              | 20        |
| <b>4.</b>   | <b><i>Description des ponts-bacs préfabriqués.....</i></b>                                    | <b>24</b> |
| <b>4.1.</b> | <b><i>Phases de construction des ponts-bacs .....</i></b>                                     | <b>24</b> |
| <b>4.2.</b> | <b><i>Avantages du pont-bac par comparaison avec d'autres structures.....</i></b>             | <b>25</b> |
| 4.2.1.      | <i>Influence des poutrelles métalliques et influence de l'épaisseur de la dalle.....</i>      | 26        |
| 4.2.2.      | <i>Comparaison entre un pont-bac et un tablier avec des poutres métalliques enrobées ....</i> | 29        |
| <b>4.3.</b> | <b><i>Conclusion .....</i></b>                                                                | <b>30</b> |
| <b>5.</b>   | <b><i>Description physique des déformations du béton .....</i></b>                            | <b>31</b> |
| <b>5.1.</b> | <b><i>Introduction.....</i></b>                                                               | <b>31</b> |
| <b>5.2.</b> | <b><i>Déformations du béton .....</i></b>                                                     | <b>31</b> |
| <b>5.3.</b> | <b><i>Déformation instantanée et module d'élasticité .....</i></b>                            | <b>31</b> |
| <b>5.4.</b> | <b><i>Retrait .....</i></b>                                                                   | <b>32</b> |
| 5.4.1.      | <i>Introduction .....</i>                                                                     | 32        |
| 5.4.2.      | <i>Retrait plastique.....</i>                                                                 | 32        |
| 5.4.3.      | <i>Retrait chimique .....</i>                                                                 | 33        |
| 5.4.4.      | <i>Retrait thermique .....</i>                                                                | 33        |
| 5.4.5.      | <i>Retrait hydrique .....</i>                                                                 | 33        |
| 5.4.6.      | <i>Retrait de carbonatation.....</i>                                                          | 34        |
| 5.4.7.      | <i>Conclusion.....</i>                                                                        | 34        |
| <b>5.5.</b> | <b><i>Fluage .....</i></b>                                                                    | <b>34</b> |
| 5.5.1.      | <i>Introduction .....</i>                                                                     | 34        |
| 5.5.2.      | <i>Fluage fondamental .....</i>                                                               | 34        |
| 5.5.3.      | <i>Fluage de dessiccation.....</i>                                                            | 34        |
| 5.5.4.      | <i>Paramètres affectant le fluage.....</i>                                                    | 35        |
| 5.5.5.      | <i>Conclusion.....</i>                                                                        | 35        |

|         |                                                                                                            |           |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6.    | <b>Relaxation .....</b>                                                                                    | <b>36</b> |
| 5.6.1.  | Introduction .....                                                                                         | 36        |
| 5.6.2.  | Relaxation du béton .....                                                                                  | 36        |
| 5.6.3.  | Relaxation des aciers .....                                                                                | 36        |
| 5.6.4.  | Conclusion .....                                                                                           | 36        |
| 6.      | <b><i>Les équations de base du retrait, du fluage et de la relaxation.....</i></b>                         | <b>37</b> |
| 6.1.    | <b>Introduction.....</b>                                                                                   | <b>37</b> |
| 6.2.    | <b>Relations fondamentales.....</b>                                                                        | <b>37</b> |
| 6.2.1.  | Analyse du fluage:réponse $\varepsilon$ sous une sollicitation $\sigma$ .....                              | 37        |
| 6.2.2.  | Analyse de la relaxation: réponse $\sigma$ sous une sollicitation $\varepsilon$ .....                      | 38        |
| 6.2.3.  | La relaxation des aciers de précontrainte.....                                                             | 38        |
| 6.3.    | <b>Introduction du principe de superposition .....</b>                                                     | <b>39</b> |
| 6.3.1.  | Méthode du module effectif .....                                                                           | 39        |
| 6.3.2.  | Méthode du module effectif ajusté .....                                                                    | 40        |
| 7.      | <b><i>Les modèles de prédiction .....</i></b>                                                              | <b>42</b> |
| 7.1.    | <b>Introduction.....</b>                                                                                   | <b>42</b> |
| 7.2.    | <b>Retrait et fluage.....</b>                                                                              | <b>42</b> |
| 7.3.    | <b>Coefficient de vieillissement .....</b>                                                                 | <b>43</b> |
| 7.3.1.  | Selon Koprna.....                                                                                          | 43        |
| 7.3.2.  | Selon Chiorino.....                                                                                        | 43        |
| 7.3.3.  | Selon Trevino .....                                                                                        | 43        |
| 7.4.    | <b>Pertes de précontrainte.....</b>                                                                        | <b>44</b> |
| 7.4.1.  | Pertes élastiques instantanées au transfert de la précontrainte.....                                       | 44        |
| 7.4.2.  | Relaxation intrinsèque des torons selon Ghali, Favre et Trevino .....                                      | 44        |
| 7.4.3.  | Contrainte dans les torons au moment du transfert de la précontrainte .....                                | 45        |
| 7.4.4.  | Relaxation réduite des torons selon Ghali, Favre et Trevino.....                                           | 45        |
| 8.      | <b><i>Analyse de la section suivant la méthode du module effectif ajusté .....</i></b>                     | <b>47</b> |
| 8.1.    | <b>Hypothèses de base et convention de signe .....</b>                                                     | <b>47</b> |
| 8.2.    | <b>Effets initiaux .....</b>                                                                               | <b>48</b> |
| 8.2.1.  | Statique de la section .....                                                                               | 48        |
| 8.3.    | <b>Effets différés.....</b>                                                                                | <b>52</b> |
| 8.3.1.  | Statique de la section .....                                                                               | 52        |
| 9.      | <b><i>Organisation du programme de calcul suivant la méthode du module effectif ajusté (AEMM).....</i></b> | <b>60</b> |
| 9.1.    | <b>Organigramme du programme.....</b>                                                                      | <b>60</b> |
| 10.     | <b><i>Analyse de la section suivant la méthode dite du pas-à-pas.....</i></b>                              | <b>65</b> |
| 10.1.   | <b>Hypothèses de base et convention de signe .....</b>                                                     | <b>65</b> |
| 10.2.   | <b>Effets initiaux .....</b>                                                                               | <b>66</b> |
| 10.2.1. | Statique de la section .....                                                                               | 66        |
| 10.3.   | <b>Effets différés.....</b>                                                                                | <b>70</b> |
| 10.3.1. | Statique de la section .....                                                                               | 70        |
| 11.     | <b><i>Organisation du programme de calcul suivant la méthode dite pas-à-pas...</i></b>                     | <b>77</b> |
| 11.1.   | <b>Organigramme du programme.....</b>                                                                      | <b>77</b> |

|            |                                                                                                                                |            |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>12.</b> | <b><i>Description de la campagne d'essai menée au laboratoire</i></b>                                                          | <b>80</b>  |
| 12.1.      | Introduction                                                                                                                   | 80         |
| 12.2.      | Description des essais                                                                                                         | 80         |
| <b>13.</b> | <b><i>Comparaison des mesures effectuées au laboratoire avec les valeurs prédites par les modèles codifiés</i></b>             | <b>84</b>  |
| 13.1.      | Introduction                                                                                                                   | 84         |
| 13.2.      | Présentation des résultats relatifs à la résistance à la compression                                                           | 84         |
| 13.3.      | Valeurs des paramètres utilisés dans les modèles                                                                               | 85         |
| 13.4.      | Présentation des résultats relatifs au retrait                                                                                 | 86         |
| 13.4.1.    | Retrait endogène                                                                                                               | 86         |
| 13.4.2.    | Retrait total                                                                                                                  | 88         |
| 13.5.      | Présentation des résultats relatifs au fluage                                                                                  | 96         |
| 13.5.1.    | Fluage fondamental                                                                                                             | 96         |
| 13.5.2.    | Fluage total                                                                                                                   | 104        |
| 13.6.      | Conclusions                                                                                                                    | 111        |
| <b>14.</b> | <b><i>Description de l'instrumentation réalisée sur un pont-bac</i></b>                                                        | <b>112</b> |
| 14.1.      | Introduction                                                                                                                   | 112        |
| 14.2.      | Description de l'implantation des instruments de mesure                                                                        | 112        |
| 14.3.      | Planning des mesures effectuées sur le tablier                                                                                 | 114        |
| 14.4.      | Comparaison des mesures effectuées sur le tablier                                                                              | 114        |
| 14.5.      | Conclusions                                                                                                                    | 116        |
| <b>15.</b> | <b><i>Comparaison des mesures prises sur un tablier avec les valeurs calculées par les méthodes EMM, AEMM et pas-à-pas</i></b> | <b>117</b> |
| 15.1.      | Introduction                                                                                                                   | 117        |
| 15.2.      | Description des événements                                                                                                     | 117        |
| 15.3.      | Valeurs des paramètres des trois méthodes de calcul                                                                            | 118        |
| 15.3.1.    | Valeurs pour la méthode EMM                                                                                                    | 118        |
| 15.3.2.    | Valeurs pour les méthodes AEMM et pas-à-pas                                                                                    | 119        |
| 15.4.      | Comparaison des mesures avec les valeurs calculées                                                                             | 121        |
| 15.4.1.    | Conclusions                                                                                                                    | 129        |
| <b>16.</b> | <b><i>Analyse statistique de la variabilité de la contreflèche au transfert de la précontrainte et à long terme</i></b>        | <b>130</b> |
| 16.1.      | Abstract                                                                                                                       | 130        |
| 16.2.      | Computation models                                                                                                             | 131        |
| 16.3.      | Description of the sample                                                                                                      | 132        |
| 16.3.1.    | Bridge decks geometry, construction and loading                                                                                | 132        |
| 16.3.2.    | Concrete strength                                                                                                              | 132        |
| 16.3.3.    | Other variables                                                                                                                | 134        |
| 16.4.      | Analysis of the camber just after the transfer of prestressing                                                                 | 137        |
| 16.4.1.    | Scope                                                                                                                          | 137        |
| 16.4.2.    | Application of the modular ratio method                                                                                        | 137        |

|              |                                                                                                                                          |            |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.4.3.      | Application of the step-by-step method.....                                                                                              | 141        |
| <b>16.5.</b> | <b>Analysis of the camber at long-term.....</b>                                                                                          | <b>145</b> |
| 16.5.1.      | Scope .....                                                                                                                              | 145        |
| 16.5.2.      | Application of the modular ratio method.....                                                                                             | 145        |
| 16.5.3.      | Application of the step-by-step method.....                                                                                              | 146        |
| <b>16.6.</b> | <b>Conclusions.....</b>                                                                                                                  | <b>148</b> |
| <b>16.7.</b> | <b>Appendix.....</b>                                                                                                                     | <b>149</b> |
| 16.7.1.      | Figure A.16.25 Common characteristics of the groups of decks. ....                                                                       | 149        |
| 16.7.2.      | Figure A.16.26 Individual characteristics of each bridge deck.....                                                                       | 150        |
| <b>17.</b>   | <b>Conclusions de la 1<sup>ère</sup> partie .....</b>                                                                                    | <b>152</b> |
| <b>B.</b>    | <b>Extension des méthodes basées sur le principe de superposition.....</b>                                                               | <b>156</b> |
| <b>1.</b>    | <b>Introduction.....</b>                                                                                                                 | <b>156</b> |
| <b>2.</b>    | <b>Influence de l'application d'un traitement thermique sur les effets différés du béton .....</b>                                       | <b>157</b> |
| 2.1.         | Introduction.....                                                                                                                        | 157        |
| 2.2.         | Propriétés du béton.....                                                                                                                 | 160        |
| <b>3.</b>    | <b>Influence de l'application d'un niveau de contrainte variant entre 50 et 70% sur les effets différés du béton .....</b>               | <b>167</b> |
| 3.1.         | Introduction.....                                                                                                                        | 167        |
| 3.2.         | Propriétés du béton.....                                                                                                                 | 167        |
| 3.2.1.       | Influence du niveau de contrainte appliquée et de l'âge au chargement sur des éprouvettes non chauffées.....                             | 169        |
| 3.2.2.       | Influence du niveau de contrainte appliquée et de l'âge au chargement sur des éprouvettes chauffées.....                                 | 174        |
| <b>4.</b>    | <b>Influence de l'application d'un déchargement précoce ou tardif sur les effets différés du béton.....</b>                              | <b>176</b> |
| 4.1.         | Introduction.....                                                                                                                        | 176        |
| 4.2.         | Modélisation de la recouvrance de fluage.....                                                                                            | 178        |
| 4.3.         | Comparaison des déformations résiduelles prédites avec les résultats d'essais sur éprouvettes .....                                      | 180        |
| 4.4.         | Comparaison des déformations différées mesurées et prédites pour des éprouvettes de taille différente.....                               | 187        |
| 4.5.         | Conclusions sur la modélisation des déformations différées des éprouvettes.....                                                          | 193        |
| <b>5.</b>    | <b>Analyse de la section suivant la méthode dite aux deux fonctions .....</b>                                                            | <b>194</b> |
| 5.1.         | Introduction.....                                                                                                                        | 194        |
| 5.2.         | Effets instantanés .....                                                                                                                 | 194        |
| 5.3.         | Effets différés.....                                                                                                                     | 194        |
| 5.4.         | Comparaison des mesures prises sur un tablier avec les valeurs calculées par la méthode pas-à-pas et la méthode aux deux fonctions ..... | 196        |
| 5.5.         | Analyse de la variabilité des résultats à l'échelle du pont-bac en fonction de la résistance moyenne à la compression du béton .....     | 201        |

|        |                                                                                                                          |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.     | <i>Optimisation des phases de préfabrication des ponts-bacs isostatiques</i> .....                                       | 204 |
| 6.1.   | Introduction.....                                                                                                        | 204 |
| 6.2.   | Résultats obtenus en terme d'évolution des contraintes dans le béton .....                                               | 205 |
| 7.     | <i>Extension du programme de calcul suivant la méthode aux deux fonctions au cas hyperstatique</i> .....                 | 209 |
| 7.1.   | Introduction.....                                                                                                        | 209 |
| 7.2.   | Modélisation par éléments finis de type poutre.....                                                                      | 210 |
| 7.3.   | Effets instantanés .....                                                                                                 | 219 |
| 7.4.   | Effets différés.....                                                                                                     | 220 |
| 7.5.   | Description topologique de la structure .....                                                                            | 225 |
| 8.     | <i>Optimisation des phases de construction de viaducs hyperstatiques constitués de ponts-bacs</i> .....                  | 227 |
| 8.1.   | Introduction.....                                                                                                        | 227 |
| 8.2.   | Comparaison des valeurs calculées par le programme d'analyse de section et par celui d'analyse de structure.....         | 227 |
| 8.3.   | Séquence 1: situation de base.....                                                                                       | 229 |
| 8.4.   | Séquence 2: application d'efforts sur site avant le durcissement du béton de 2 <sup>ème</sup> phase de la jonction ..... | 232 |
| 8.5.   | Séquence 3 :coulage du béton de 2 <sup>ème</sup> phase sur site sur 6m de part et d'autre de la jonction.....            | 235 |
| 8.6.   | Séquence 4 : optimum pour un liaisonnement effectué au jeune âge .....                                                   | 238 |
| 8.7.   | Séquence 5: optimum pour un liaisonnement effectué à un âge tardif .....                                                 | 240 |
| 8.8.   | Synthèse des résultats obtenus pour les 5 séquences.....                                                                 | 242 |
| 9.     | <i>Conclusions de la 2<sup>ème</sup> partie</i> .....                                                                    | 244 |
| C.     | <i>Vers une modélisation basée sur l'évolution du degré d'hydratation et de l'humidité relative</i> .....                | 246 |
| 1.     | <i>Introduction</i> .....                                                                                                | 246 |
| 2.     | <i>Modélisation du séchage naturel du béton</i> .....                                                                    | 247 |
| 2.1.   | Introduction.....                                                                                                        | 247 |
| 2.2.   | Mécanismes du séchage .....                                                                                              | 247 |
| 2.3.   | Modélisation envisagée du séchage.....                                                                                   | 248 |
| 3.     | <i>Modélisation du degré d'hydratation et de la teneur en eau dans CESAR-LCPC</i> .....                                  | 250 |
| 3.1.   | Enjeu de la modélisation du béton au jeune âge .....                                                                     | 250 |
| 3.2.   | Modélisation du degré d'hydratation : module TEXO .....                                                                  | 250 |
| 3.3.   | Modélisation de la teneur en eau : module HEXO.....                                                                      | 252 |
| 3.4.   | Chaînage des modules TEXO-HEXO .....                                                                                     | 254 |
| 3.4.1. | Situation existante avant chaînage TEXO-HEXO.....                                                                        | 254 |

|           |                                                                                                                                                |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2.    | Situation avec chaînage TEXO-HEXO pour la prise en compte de l'eau consommée par l'hydratation du ciment .....                                 | 254        |
| <b>4.</b> | <b><i>Modélisation des déformations différées sur base du degré d'hydratation et de la teneur en eau</i></b> .....                             | <b>259</b> |
| 4.1.      | Introduction .....                                                                                                                             | 259        |
| 4.2.      | Retrait thermique.....                                                                                                                         | 259        |
| 4.3.      | Retrait endogène .....                                                                                                                         | 260        |
| 4.4.      | Retrait de dessiccation .....                                                                                                                  | 262        |
| 4.5.      | Fluage fondamental.....                                                                                                                        | 271        |
| 4.6.      | Fluage de dessiccation.....                                                                                                                    | 278        |
| 4.6.1.    | Fluage de dessiccation structural .....                                                                                                        | 279        |
| 4.6.2.    | Fluage de dessiccation intrinsèque .....                                                                                                       | 279        |
| <b>5.</b> | <b><i>Modélisation des déformations différées du béton des ponts-bacs</i></b> .....                                                            | <b>282</b> |
| 5.1.      | Introduction .....                                                                                                                             | 282        |
| 5.2.      | Détermination de la courbe QAB du béton pour le module TEXO .....                                                                              | 282        |
| 5.3.      | Détermination des constantes propres au BHP pour le module HEXO .....                                                                          | 283        |
| 5.3.1.    | Quantité d'eau potentiellement consommable par l'hydratation .....                                                                             | 283        |
| 5.3.2.    | Constantes du modèle de diffusion.....                                                                                                         | 284        |
| 5.4.      | Résultats sur éprouvettes de laboratoire.....                                                                                                  | 286        |
| 5.4.1.    | Calcul de l'évolution du degré d'hydratation et de la teneur en eau .....                                                                      | 286        |
| 5.4.2.    | Retrait endogène .....                                                                                                                         | 296        |
| 5.4.3.    | Retrait de dessiccation .....                                                                                                                  | 297        |
| 5.4.4.    | Fluage fondamental .....                                                                                                                       | 299        |
| 5.4.5.    | Fluage total .....                                                                                                                             | 303        |
| <b>6.</b> | <b><i>Calcul du comportement à long terme de structure basé sur le degré d'hydratation et la teneur en eau</i></b> .....                       | <b>305</b> |
| 6.1.      | Algorithme de résolution numérique .....                                                                                                       | 305        |
| 6.1.1.    | Effets initiaux .....                                                                                                                          | 305        |
| 6.1.2.    | Effets différés .....                                                                                                                          | 307        |
| 6.2.      | Organisation du programme de calcul.....                                                                                                       | 321        |
| <b>7.</b> | <b><i>Modélisation du comportement du pont-bac instrumenté à partir du degré d'hydratation et de la teneur en eau</i></b> .....                | <b>324</b> |
| 7.1.      | Introduction.....                                                                                                                              | 324        |
| 7.2.      | Description des événements.....                                                                                                                | 324        |
| 7.3.      | Description du phasage de construction .....                                                                                                   | 325        |
| 7.3.1.    | Echanges de chaleur .....                                                                                                                      | 325        |
| 7.3.2.    | Echanges d'humidité .....                                                                                                                      | 327        |
| 7.4.      | Comparaison des mesures et des résultats fournis par la modélisation basée sur l'évolution du degré d'hydratation et de la teneur en eau ..... | 397        |
| 7.4.1.    | Introduction .....                                                                                                                             | 397        |
| 7.4.2.    | Comparaisons entre les déformations mesurées et calculées au niveau des capteurs du pont-bac instrumenté.....                                  | 398        |
| 7.4.3.    | Contraintes calculées au niveau de la peau inférieure et de la peau supérieure de la dalle du pont-bac instrumenté.....                        | 409        |
| 7.4.4.    | Evolution des contraintes dans le pont-bac instrumenté (graphiques Matlab) .....                                                               | 414        |

|             |                                                                                      |            |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8.</b>   | <b><i>Conclusions de la 3<sup>ème</sup> partie</i></b>                               | <b>434</b> |
| <b>D.</b>   | <b><i>Conclusion générale</i></b>                                                    | <b>435</b> |
| <b>E.</b>   | <b><i>Bibliographie générale</i></b>                                                 | <b>438</b> |
| <b>F.</b>   | <b><i>Annexe générale</i></b>                                                        | <b>456</b> |
| <b>1.</b>   | <b><i>Les modèles codifiés de retrait et de fluage</i></b>                           | <b>456</b> |
| <b>1.1.</b> | <b>Modèle CEB 90 (version 93)</b>                                                    | <b>456</b> |
| 1.1.1.      | Notations et unités                                                                  | 456        |
| 1.1.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 456        |
| 1.1.3.      | Calcul de la fonction de fluage                                                      | 457        |
| <b>1.2.</b> | <b>Modèle CEB 90 (version 99)</b>                                                    | <b>458</b> |
| 1.2.1.      | Notations et unités                                                                  | 458        |
| 1.2.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 459        |
| 1.2.3.      | Calcul de la fonction de fluage                                                      | 460        |
| <b>1.3.</b> | <b>Modèle ACI 209</b>                                                                | <b>461</b> |
| 1.3.1.      | Notations et unités                                                                  | 461        |
| 1.3.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 461        |
| 1.3.3.      | Calcul du fluage                                                                     | 462        |
| <b>1.4.</b> | <b>Modèle B3</b>                                                                     | <b>463</b> |
| 1.4.1.      | Notations et unités                                                                  | 463        |
| 1.4.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 464        |
| 1.4.3.      | Calcul du fluage                                                                     | 465        |
| <b>1.5.</b> | <b>Modèle B3S</b>                                                                    | <b>466</b> |
| 1.5.1.      | Notations et unités                                                                  | 466        |
| 1.5.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 467        |
| 1.5.3.      | Calcul du fluage                                                                     | 467        |
| <b>1.6.</b> | <b>Modèle GZ</b>                                                                     | <b>468</b> |
| 1.6.1.      | Notations et unités                                                                  | 468        |
| 1.6.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 468        |
| 1.6.3.      | Calcul du fluage                                                                     | 469        |
| <b>1.7.</b> | <b>Modèle AFREM</b>                                                                  | <b>469</b> |
| 1.7.1.      | Notations et unités                                                                  | 469        |
| 1.7.2.      | Calcul du retrait                                                                    | 470        |
| 1.7.3.      | Calcul du fluage                                                                     | 471        |
| <b>2.</b>   | <b><i>Courbe de dégagement de chaleur du béton</i></b>                               | <b>472</b> |
| <b>3.</b>   | <b><i>Evolution des contraintes dans le pont-bac instrumenté (graphes Excel)</i></b> | <b>474</b> |
| <b>4.</b>   | <b><i>Notations</i></b>                                                              | <b>482</b> |
| <b>4.1.</b> | <b>Majuscules latines</b>                                                            | <b>482</b> |
| <b>4.2.</b> | <b>Minuscules latines</b>                                                            | <b>484</b> |
| <b>4.3.</b> | <b>Minuscules grecques</b>                                                           | <b>485</b> |
| <b>4.4.</b> | <b>Majuscules grecques</b>                                                           | <b>486</b> |