Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Análisis comparativo de diferentes soluciones para el refuerzo sísmico de una escuela primaria

Autor/a

María GRACIA ROIG

Tutor/a

Joan Ramon CASAS RIUS

Departament

Ingeniería de la Construcción

Intensificació

Cálculo de Estructuras

Data

17/10/2011

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

École des Ponts ParisTech
UNIVERSITÉ PARIS-EST

PROJECTE FINAL DE CARRERA

TESINA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES SOLUCIONES PARA EL REFUERZO SÍSMICO DE UNA ESCUELA PRIMARIA

Tutor : Joan Ramon CASAS RIUS

Autor: María GRACIA ROIG

OCTUBRE 2011

RESUMEN

TÍTULO: Análisis comparativo de diferentes soluciones para el refuerzo sísmico de una escuela primaria.

AUTOR: María GRACIA ROIG

TUTORES: Joan Ramon CASAS RIUS

Esta tesina trata sobre el refuerzo parasísmico de edificios existentes, en particular de edificios de hormigón armado y de altura media. El refuerzo parasísmico de edificios es un tema de gran importancia a nivel mundial puesto que la normativa sísmica para la construcción es relativamente reciente y se ha endurecido en los últimos años debido a una mayor concienciación del problema sísmico en la construcción. De este endurecimiento normativo resulta una no conformidad de gran parte del parque de edificios existentes. El refuerzo de éste para su adaptación a la normativa vigente de cada lugar es un campo de actuación de gran interés para el ingeniero estructural.

En esta tesina se ha estudiado el refuerzo de una escuela primaria de Turquía. Diseñada únicamente para las cargas gravitarias pero situada en una zona de sismicidad importante, el refuerzo parasísmico de ésta se impone para proporcionar un nivel de seguridad aceptable de sus usuarios. Sin embargo el objetivo de este estudio no es presentar una única solución de refuerzo para dicho edificio, con todos los detalles de dimensionamiento y constructivos. Se intenta por lo contrario utilizar dicho edificio que se considera como un edificio típico de las construcciones escolares tanto en Turquía como en Europa, para estudiar el comportamiento de varias soluciones de refuerzo sobre él y poder clasificar dichas soluciones según su interés para este tipo de edificios. Las conclusiones sobre el estudio de distintas soluciones de refuerzo sobre la escuela primaria en Turquía servirán como base para un ingeniero que se enfrente a un anteproyecto de refuerzo para el seísmo de un edificio similar.

Para conservar un grado de generalidad suficiente y que las conclusiones de este estudio no estén demasiado ligadas a las particularidades del edificio estudiado, se adoptan una serie de hipótesis de estudio tanto sobre la geometría y las características estructurales del edificio escogido como modelo, es decir la escuela primaria en Turquía, como sobre las características sísmicas de la zona estudiada. El uso del edificio modelo no ser de interés vital después de un seísmo importante, lo que supone un nivel de protección frente al seísmo más importante. El edificio modelo no debe tampoco presentar características arquitecturales protegidas que impongan restricciones en las actuaciones posibles de su fachada, ni tener ninguna característica geométrica demasiado particular que impida la generalización de las soluciones hacia edificios similares. Pese a estar el edificio en Turquía, se ha decidido trabajar con los Eurocódigos como normativa de referencia y se han estudiado distintas soluciones situando el edificio modelo en dos zonas sísmicas diferentes: una zona de baja sismicidad y una zona de alta sismicidad. Las soluciones estudiadas son distintas para cada zona sísmica.

Se presenta como conclusión de este trabajo la comparación de tres soluciones de refuerzo frente al seísmo para cada una de las dos zonas de sismicidad escogidas del edificio modelo. Se pretende que dicha comparación sirva de referencia para un ingeniero que se proponga estudiar el refuerzo de un edificio de características similares y le oriente, durante la elaboración del anteproyecto, en la elección del método de refuerzo.

ABSTRACT

TITLE: Comparative study of different solutions for the seismic retrofit of a primary school.

AUTHOR: María GRACIA ROIG

SUPERVISORS: Joan Ramon CASAS RIUS

This study revolves around the seismic retrofit of existing structures. More specifically, the seismic retrofit of mid-height concrete buildings. The seismic retrofit of structures is an issue of increasing importance all around the world. The seismic codes for construction have appeared in the last decade and they have been getting tougher as time goes by. As a result, a vast extension of the existing buildings is not considered as safe by the latest construction codes. The seismic retrofit of these buildings is a working area of great interest for the structural engineer.

In this study we have worked on the seismic reinforcement of a Primary School in Turkey. Designed only for gravitary loads even if it is located in an important seismic area, its seismic retrofit is necessary to assure an acceptable security level to its users. However, it is not the aim of this study to present a complete but single solution of seismic retrofit for this building, with the proper calculations and constructive details. The aim of this study is to consider the Primary School in Turkey, which is considered to have a typical complexion for scholar buildings in Turkey as well as in Europe, to study the appliance of several retrofit solution on it and be able to classify these solutions by their constructive and economic interest. The conclusions will be useful to an engineer starting the retrofit of a similar building.

In order to maintain a general point of view and avoid the conclusions to be only useful for the particular building studied, several hypothesis have been adopted on its geometry, its structural characteristics and the seismic area where it is located. When choosing the Primary School in Turkey as the model building for our study we verified that it verified these hypothesis. The building should not be of vital interest after an important seism, which means that we have to be more demanding with the seismic resistance of its structure. The building chosen as a model should not have a protected architecture that would enable some of the retrofit solutions with an impact on the façade. It should neither have particular geometric characteristics that wouldn't permit the generalization of the results to a larger amount of existing buildings. Even if the existing structure is located in Turkey, we have decided to work with the Eurocodes and we have studied different retrofit solutions considering the building located in two different seismic areas: an area of low seismicity and an area of high seismicity. The studied solutions are different in each case.

As a conclusion of the study, we present three seismic retrofit solutions for each seismic area. We intend that this conclusion will be useful to an engineer studying a seismic retrofit solution of a similar building. It should help him at the start of his study to choose an adapted retrofit solution.

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord remercier les personnes avec lesquelles j'ai travaillé dans le département technique de Freyssinet International, notamment son directeur Monsieur Erik MELLIER pour son accueil et son encadrement, Madame Vanessa BUCHIN-ROULIE, mon maître de stage et chef de la division Béton Réparation pour les connaissances qu'elle m'a transmises et toute l'équipe de la division Béton pour leur aide au quotidien.

Je souhaiterais remercier en particulier Sylvain GARRAU, ingénieur qui a suivi au quotidien l'avancement de mon travail tout en me dirigeant dans les choix et prises de décision. Son aide et ses conseils ont été indispensables pour le bon déroulement de mon Projet Fin d'Etudes.

Enfin, je remercie sincèrement M. PECKER et M. CASAS RIUS, pour avoir accepté la direction de mon Projet Fin d'Etudes et pour avoir été disponible tout le long de celui-ci pour répondre à nos questions.

MEMORIA

ÍNDICE

1 Introduction 21
2 Synthèse des méthodes de renforcement parasismique 22
2.1 Introduction 22
2.2 Organisation des chapitres 22
2.3 Conclusion 23
3 Sélection du bâtiment 25
3.1 Critères de sélection du bâtiment 25
3.2 Description du bâtiment choisi 26
3.2.1 Plan de masse du complexe scolaire 26
3.2.2 Photographies du bâtiment 27
3.2.3 Modèle SAP du bâtiment 28
3.3 Adaptation du bâtiment choisi 29
4 Hypothèses de calcul 31
4.1 Normes considérées 31
4.2 Caractérisitques du sol 31
4.3 Caractéristiques des matériaux 31
4.4 Limites de performance 32
4.5 Actions et combinaisons 33
4.5.1 Charges permanentes 33
4.5.2 Charges variables 33
4.5.3 Charges sismiques 34
4.6 Combinaisons 36
4.7 Vérifications 37
4.8 Ferraillage des éléments 37
5 Batiment existant - Zone de faible sismicité 39
5.1 Introduction 39
5.2 Actions sismiques 39
5.3 Comportement structurel 41
5.3.1 Introduction 41
5.3.2 Analyse Modale 41
5.3.3 Sollicitations sismiques 42
5.3.4 Vérifications 43

5.4 Conclusion 46
6 Renforcements - Zone de faible sismicité 47
6.1 Rajout de voiles 47
6.1.1 Description 47
6.1.2 Comportement structurel 49
6.1.3 Conclusion 54
6.2 Croix de St André 55
6.2.1 Description 55
6.2.2 Comportement structurel 57
6.2.3 Conclusion 62
6.3 Bandes de fibres de carbone 63
6.3.1 Description 63
6.3.2 Comportement structurel 63
6.3.3 Conclusion 65
7 Perturbations et coût - Zone de faible sismicité 66
7.1 Introduction 66
7.2 Rajout de voiles 67
7.2.1 Evaluation des Perturbations 67
7.2.2 Evaluation des coûts 67
7.2.3 Récapitulatif 68
7.3 Croix de St André 69
7.3.1 Evaluation des Perturbations 69
7.3.2 Evaluation des coûts 69
7.3.3 Récapitulatif 70
7.4 Bandes de fibres de carbone 71
7.4.1 Evaluation des Perturbations 71
7.4.2 Evaluation des coûts 71
7.4.3 Récapitulatif 72
7.5 Comparaison des renforcements 73
8 Batiment existant - Zone de forte sismicité 74
8.1 Introduction 74
8.2 Actions sismiques 74
8.3 Comportement structurel 76
8.3.1 Introduction 76

8.3.2 Analyse Modale ... 76
8.3.3 Sollicitations sismiques ... 76
8.3.4 Vérifications ... 77
8.4 Conclusion ... 80
9 Renforcements - Zone de forte sismicité ... 81
9.1 Raidisseurs en façade ... 81
9.1.1 Description ... 81
9.1.2 Comportement structurel ... 84
9.1.3 Conclusion ... 89
9.2 Raidisseurs internes et externes ... 90
9.2.1 Description ... 90
9.2.2 Comportement structurel ... 94
9.2.3 Conclusion ... 99
9.3 Isolation ... 101
9.3.1 Description ... 101
9.3.2 Comportement structurel ... 105
9.3.3 Conclusion ... 111
10 Perturbations et coût - Zone de forte sismicité ... 112
10.1 Introduction ... 112
10.2 Raidisseurs en façade ... 113
10.2.1 Evaluation des Perturbations ... 113
10.2.2 Evaluation des coûts ... 113
10.2.3 Récapitulatif ... 114
10.3 Raidisseurs internes et externes ... 115
10.3.1 Evaluation des Perturbations ... 115
10.3.2 Evaluation des coûts ... 115
10.3.3 Récapitulatif ... 116
10.4 Isolation ... 117
10.4.1 Evaluation des Perturbations ... 117
10.4.2 Evaluation des coûts ... 117
10.4.3 Récapitulatif ... 118
10.5 Comparaison des renforcements ... 119
11 Récapitulatif et Conclusion ... 120
11.1 Introduction ... 120

11.2 Zone de faible sismicité 120
11.3 Zone de forte sismicité 122
11.4 Conclusion 124
12 Conclusion Générale 125
Bibliographie 126
Annexes 129

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du sol. 31
Tableau 2. Caractéristiques des matériaux. 32
Tableau 3. Charges permanentes. 33
Tableau 4. Charges variables. 34
Tableau 5. Coefficient de combinaison $\psi_{E,i}$ (*Eurocode EN 1998-1 §4.2.4 (2)P*). 34
Tableau 6. Coefficient d'importance. 35
Tableau 7. Masse sismique par étage. 36
Tableau 8. Liste des vérifications. 37
Tableau 9. Ferraillage des éléments. 38
Tableau 10. Caractérisation de l'action sismique. 39
Tableau 11. Modes propres principaux. 41
Tableau 12. Récapitulatif pour la vérification des éléments. 44
Tableau 13. Pourcentage des éléments défaillants. 44
Tableau 14. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5) 45
Tableau 15. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6) 46
Tableau 16. Modes propres principaux. 49
Tableau 17. Pourcentage des éléments défaillants. 52
Tableau 18. Pourcentage d'amélioration par rapport à l'existant. 52
Tableau 19. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5). 53
Tableau 20. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6). 53
Tableau 21. Modes propres principaux. 57
Tableau 22. Pourcentage des éléments défaillants. 60
Tableau 23. Pourcentage d'améliorations par rapport au bâtiment existant. 60
Tableau 24. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5). 61
Tableau 25. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6). 61
Tableau 26. Pourcentage d'éléments défaillants. 64
Tableau 27. Récapitulatif des coûts et perturbations. 68
Tableau 28. Récapitulatif des coûts et perturbations. 70
Tableau 29. Récapitulatif des coûts et perturbations. 72

Tableau 30. Comparaison des coûts et perturbations. 73
Tableau 31. Caractérisation de l'action sismique. 74
Tableau 32. Récapitulatif pour la vérification des éléments. 78
Tableau 33. Pourcentage d'éléments défaillants. 78
Tableau 34. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5). 79
Tableau 35. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6). 80
Tableau 36. Modes propres principaux. 85
Tableau 37. Pourcentage des éléments défaillants. 87
Tableau 38. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant. 87
Tableau 39. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5). 88
Tableau 40. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6). 88
Tableau 41. Modes propres principaux. 95
Tableau 42. Pourcentage des éléments défaillants. 97
Tableau 43. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant. 98
Tableau 44. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5). 98
Tableau 45. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6). 99
Tableau 46. Modes propres principaux. 105
Tableau 47. Pourcentage d'éléments défaillants (avec sous-sol). 108
Tableau 48. Pourcentage d'éléments défaillants (sans sous-sol). 109
Tableau 49. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant. 109
Tableau 50. Vérification des déplacements inter-étage (COMB1.5). 110
Tableau 51. Vérification des déplacements inter-étage (COMB1.5). 110
Tableau 52. Récapitulatif des coûts et perturbations. 114
Tableau 53. Récapitulatif des coûts et perturbations. 116
Tableau 54. Récapitulatif des coûts et perturbations. 118
Tableau 55. Comparaison des coûts et perturbations. 119
Tableau 56. Récapitulatif des éléments défaillants (sans renforcement complémentaire). 120
Tableau 57. Récapitulatif des éléments défaillants (avec renforcement complémentaire). 120
Tableau 58. Récapitulatif des coûts et perturbations (zone 2). 121
Tableau 59. Récapitulatif des éléments défaillants (sans renforcement complémentaire). 122
Tableau 60. Récapitulatif des éléments défaillants (avec renforcement complémentaire). 122
Tableau 61. Récapitulatif des coûts et perturbations (zone5). 123
Tableau 62. Liste des vérifications. 134
Tableau 63. Poteaux défaillants face à la flexion : 138

Tableau 64. Poteaux défaillants face au cisaillement : 138
Tableau 65. Récapitulatif des poteaux défaillants : 138
Tableau 66. Poutres défaillantes face à la flexion : 139
Tableau 67. Poutres défaillantes face au cisaillement : 139
Tableau 68. Récapitulatif des poutres défaillantes : 139
Tableau 69. Voiles défaillants face à la flexion : 140
Tableau 70. Voiles défaillants face au cisaillement : 140
Tableau 71. Récapitulatif des voiles défaillants : 140
Tableau 72. Voiles défaillants face à la flexion : 145
Tableau 73. Voiles défaillants face au cisaillement : 145
Tableau 74. Récapitulatif des voiles défaillants : 145
Tableau 75. Renforcement vertical à l'effort tranchant : 148
Tableau 76. Renforcement horizontal à l'effort tranchant : 148
Tableau 77. Renforcement à la flexion : 149
Tableau 78. Poutres défaillantes face à la flexion : 151
Tableau 79. Poutres défaillantes face au cisaillement : 151
Tableau 80. Récapitulatif des poutres défaillantes : 151
Tableau 81. Voiles défaillants face à la flexion : 152
Tableau 82. Voiles défaillants face au cisaillement : 152
Tableau 83. Récapitulatif des voiles défaillants : 152
Tableau 84. Renforcement des poutres : 157
Tableau 85. Renforcement vertical à l'effort tranchant : 159
Tableau 86. Renforcement horizontal à l'effort tranchant : 159
Tableau 87. Renforcement à la flexion : 160
Tableau 88. Renfort des poutres : 162
Tableau 89. Renfort vertical à l'effort tranchant : 165
Tableau 90. Renfort horizontal à l'effort tranchant : 165
Tableau 91. Renforcement à la flexion : 166
Tableau 92. Poteaux défaillants face à la flexion : 168
Tableau 93. Poteaux défaillants face au cisaillement : 168
Tableau 94. Récapitulatif des poteaux défaillants : 168
Tableau 95. Poutres défaillantes face à la flexion : 169
Tableau 96. Poutres défaillantes face au cisaillement : 169
Tableau 97. Récapitulatif des poutres défaillantes : 169

Tableau 98. Voiles défaillants face à la flexion : 170
Tableau 99. Voiles défaillants face au cisaillement : 170
Tableau 100. Récapitulatif des voiles défaillants : 170
Tableau 101. Poteaux défaillants face à la flexion : 175
Tableau 102. Poteaux défaillants face au cisaillement : 175
Tableau 103. Récapitulatif des poteaux défaillants : 175
Tableau 104. Poutres défaillantes face à la flexion : 176
Tableau 105. Poutres défaillantes face au cisaillement : 176
Tableau 106. Récapitulatif des poutres défaillantes : 176
Tableau 107. Voiles défaillants face à la flexion : 177
Tableau 108. Voiles défaillants face au cisaillement : 177
Tableau 109. Récapitulatif des voiles défaillants : 177
Tableau 110. Renforcement des poutres en X : 183
Tableau 111. Renforcement des poutres en Y : 187
Tableau 112. Renforcement vertical à l'effort tranchant. 189
Tableau 113. Renforcement horizontal à l'effort tranchant : 190
Tableau 114. Renforcement à la flexion : 190
Tableau 115. Renforcement à la flexion : 192
Tableau 116. Poteaux défaillants face à la flexion : 194
Tableau 117. Poteaux défaillants face au cisaillement : 194
Tableau 118. Récapitulatif des poteaux défaillants : 194
Tableau 119. Poutres défaillantes face à la flexion : 195
Tableau 120. Poutres défaillantes face au cisaillement : 195
Tableau 121. Récapitulatif des poutres défaillantes : 195
Tableau 122. Voiles défaillants face à la flexion : 196
Tableau 123. Voiles défaillants face au cisaillement : 196
Tableau 124. Récapitulatif des voiles défaillants : 196
Tableau 125. Renforcement des poutres en X : 202
Tableau 126. Renforcement vertical à l'effort tranchant : 205
Tableau 127. Renforcement horizontal à l'effort tranchant : 205
Tableau 128. Renforcement à la flexion : 206
Tableau 129. Renforcement à la flexion : 207
Tableau 130. Poteaux défaillants face à la flexion : 209
Tableau 131. Poteaux défaillants face au cisaillement : 209

Tableau 132. Récapitulatif des poteaux défaillants : 209
Tableau 133. Poutres défaillantes face à la flexion :..... 210
Tableau 134. Poutres défaillantes face au cisaillement :..... 210
Tableau 135. Récapitulatif des poutres défaillantes :..... 210
Tableau 136. Voiles défaillants face à la flexion : 211
Tableau 137. Voiles défaillants face au cisaillement : 211
Tableau 138. Récapitulatif des voiles défaillants :..... 211
Tableau 139. Renforcement des poutres en X : 216
Tableau 140. Renforcement des poutres en Y : 217
Tableau 141. Renforcement vertical à l'effort tranchant : 220
Tableau 142. Renforcement horizontal à l'effort tranchant : 220
Tableau 143. Renforcement à la flexion : 221

Liste des figures

Figure 1. Bloc E dans le complexe scolaire 26
Figure 2. Vue 1 de la façade nord de la structure 27
Figure 3. Vue 2 de la façade nord de la structure 27
Figure 4. Modèle 3D du bâtiment existant – Vue 1 28
Figure 5. Modèle 3D du bâtiment existant – Vue 2 28
Figure 6. Répartition des voiles. 29
Figure 7. Spectre de référence (zone 2). 40
Figure 8. Spectres de calcul pour les états limites NC et DL. 40
Figure 9. Déformée pour le Mode 1 41
Figure 10. Déformée pour le Mode 2 42
Figure 11. Déformée pour le Mode 3 42
Figure 12. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 43
Figure 13. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 43
Figure 14. Voiles rajoutés dans la structure existante. 48
Figure 15. Plan des voiles rajoutés dans la structure existante. 48
Figure 16. Déformée pour le Mode 1 50
Figure 17. Déformée pour le Mode 2 50
Figure 18. Déformée pour le Mode 3 50
Figure 19. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 51
Figure 20. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 51
Figure 21. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante. 55
Figure 22. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0). 56
Figure 23. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0). 56
Figure 24. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8). 56
Figure 25. Section des croix de St André. 56
Figure 26. Déformée pour le Mode 1 58
Figure 27. Déformée pour le Mode 2 58
Figure 28. Déformée pour le Mode 3 58
Figure 29. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 59

Figure 30. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 59
Figure 31. Comparaison des renforcements. 73
Figure 32. Spectre de référence. 75
Figure 33. Spectres de calcul pour les états limites NC et DL. 75
Figure 34. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 76
Figure 35. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 77
Figure 36. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante. 82
Figure 37. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0). 82
Figure 38. Vue en élévation des voiles dans le pignon est (X=49,6). 83
Figure 39. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0). 83
Figure 40. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8). 83
Figure 41. Section des raidisseurs (mm)..... 84
Figure 42. Déformée pour le Mode 1 85
Figure 43. Déformée pour le Mode 17 85
Figure 44. Déformée pour le Mode 28 85
Figure 45. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 86
Figure 46. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 86
Figure 47. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante. 90
Figure 48. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0). 91
Figure 49. Coupe transversale 1 (X=4,75)..... 91
Figure 50. Coupe transversale 1 (X=22)..... 91
Figure 51. Coupe transversale 1 (X=25,15)..... 92
Figure 52. Coupe transversale 1 (X=32,2)..... 92
Figure 53. Coupe transversale 1 (X=39,25)..... 92
Figure 54. Coupe transversale 1 (X=42,4)..... 93
Figure 55. Vue en élévation des voiles dans le pignon est (X=49,6). 93
Figure 56. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0). 93
Figure 57. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8). 94
Figure 58. Section des raidisseurs (mm)..... 94
Figure 59. Déformée pour le Mode 26 95
Figure 60. Déformée pour le Mode 84 95
Figure 61. Déformée pour le Mode 85 96
Figure 62. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 96
Figure 63. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 97

Figure 64. Répartition des appuis. 103
Figure 65. Répartition des amortisseurs. 104
Figure 66. Déformée pour le Mode 1 106
Figure 67. Déformée pour le Mode 2 106
Figure 68. Déformée pour le Mode 3 106
Figure 69. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement. 107
Figure 70. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages. 108
Figure 71. Comparaison des renforcements (zone 5). 119
Figure 72. Comparaison des renforcements (zone 2). 121
Figure 73. Comparaison des renforcements (zone 5). 123
Figure 74. Rajout de voiles en béton armé sur toute la hauteur (Sion 2005) [Ref. 1] 222
Figure 75. Construction d'un nouveau voile en façade (Fribourg 2002) [Ref. 1] 222
Figure 76. Construction d'une paroi accolée au noyau central (Zurich 2006) [Ref. 1] ... 223
Figure 77. Schéma explicatif pour la création de nouveaux voiles [Ref. 2] 223
Figure 78. Schéma illustratif des renforcements TFC d'un bâtiment [Ref. 3] 224
Figure 79. Renforcement à la flexion de poutres [Ref. 3] et [Ref. 4] 224
Figure 80. Renforcement de poteaux par spires de TFC [Ref. 3] 225
Figure 81. Renforcement local d'un noyau en béton armé (Berne 2006) [Ref. 1] 226
Figure 82. Schéma explicatif pour le renforcement des voiles [Ref. 5] 226
Figure 83. Renforcement d'un bâtiment administratif [Ref. 6] 227
Figure 84. Exemples de contreventement en façade [Ref. 7] 227
Figure 85. Exemples de contreventement en façade [Ref. 8] 228
Figure 86. Disposition recommandée des bras métalliques ou cables [Ref. 7] 228
Figure 87. Renforcement d'un bâtiment scolaire [Ref. 6] 229
Figure 88. Schéma de la distribution possible des raidisseurs internes. [Ref. 6] 229
Figure 89. Raidisseurs internes pour le Studio de la Radio à Zurich (2004). [Ref. 1] 230
Figure 90. Raidisseurs internes pour un centre commercial (2005). [Ref. 1] 230
Figure 91. Renforcement par bras métalliques frottants [Ref. 6] 231
Figure 92. Détail du système d'amortissement par frottement [Ref. 9] 231
Figure 93. Bras métalliques avec amortissement visqueux [Ref. 9] 232
Figure 94. Bras métalliques avec amortissement visco-élastique [Ref. 9] 232
Figure 95. Renforcement par isolation au sous-sol (Tokyo-1999) [Ref. 10] 233
Figure 96. Renforcement par isolation sous fondations (Tokyo-2000) [Ref. 10] 233
Figure 97. Renforcement par isolation au sous-sol d'une caserne [Ref. 1] 234

Figure 98. Isolation des poteaux au niveau d'un étage [Ref. 10] 234
Figure 99. Isolation sous les fondations existantes [Ref. 10] 234
Figure 100. Isolation sous les fondations existantes [Ref. 11] 235
Figure 101. Isolation sous les fondations existantes (Passenada City Hall) [Ref. 12] 235

Liste des annexes

Annexe 1 Synthèse des méthodes de renforcement parasismique des bâtiments 130
Annexe 2 Description du bâtiment sélectionné 132
Annexe 3 Détail des vérifications de la structure 134
Annexe 4 Analyse structurelle : Bâtiment existant en zone 2 137
Annexe 5 Renforcement par voiles rajoutés en zone 2 144
Annexe 6 Renforcement par croix de St André en zone 2 150
Annexe 7 Renforcement par fibres de carbone en zone 2 161
Annexe 8 Analyse structurelle : Bâtiment existant en zone 5 167
Annexe 9 Renforcement par raidisseurs en façade en zone 5 174
Annexe 10 Renforcement par raidisseurs internes et externes en zone 5 193
Annexe 11 Renforcement par isolation à la base en zone 5 208
Annexe 12 Exemples d'application des différents renforcements 222

1 Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de stage entre l'ENPC de Paris, école où l'élève suit un double diplôme avec l'UPC de Barcelone, et l'entreprise Freyssinet International. Le département d'accueil de l'élève est le département Béton Réparations.

Le travail effectué porte sur le renforcement des bâtiments face aux charges sismiques. Il s'est centré sur deux activités principales. Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été réalisée dans la littérature pour mettre en place un catalogue des renforcements possibles qui ont déjà été mis en œuvre dans des bâtiments réels. Puis dans une deuxième partie du PFE nous avons évalué, dans un bâtiment pris comme modèle, la pertinence de plusieurs renforcements. L'objectif de cette étude est de pouvoir orienter un ingénieur dans son choix de renforcement lors de l'avant-projet du renforcement sismique d'un bâtiment de caractéristiques semblables à celles du bâtiment étudié.

Après l'étude bibliographique sur l'éventail de solutions de renforcement face au séisme existantes, nous avons créé un document récapitulatif qui liste et classifie les solutions et donne des exemples d'applications. Il permet d'avoir une idée assez complète des techniques de l'ingénieur existantes dans l'actualité et peut être utilisé et complété par les ingénieurs ou commerciaux travaillant sur ce sujet. Les techniques très innovantes ou adaptées à des bâtiments avec de fortes particularités n'ont pas été intégrées dans ce document.

Pour l'étude comparative de différentes solutions de renforcement, nous avons fixé des hypothèses, aussi bien sur le bâtiment que sur son emplacement et la sismicité de celui-ci, visant à rester le plus généraux possibles et pouvoir utiliser les résultats obtenus comme base pour l'étude d'autres bâtiments. Le bâtiment choisi a donc une géométrie assez courante dans le bâti existant et ne présente pas de problématique particulière qui empêcherait la généralisation des résultats.

Pour couvrir un nombre de cas plus ample, nous avons réalisé l'étude dans deux zones de sismicité différentes : une zone de sismicité 2 (faible sismicité) et une zone de sismicité 5 (forte sismicité). Les mêmes hypothèses de base sur le bâtiment existant sont maintenues pour les deux zones, le comportement du bâtiment existant étudié et des solutions de renforcement proposées et évaluées. Pour chaque zone, un récapitulatif des résultats obtenus pour les différents renforcements est présenté tout comme une comparaison qualitative des perturbations de leur mise en œuvre et de leur coût.

2 Synthèse des méthodes de renforcement parasismique

2.1 Introduction

Le titre de ce chapitre est celui du document rédigé dans la première partie du PFE. Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, ce document liste les différents renforcements appliqués dans l'actualité pour assurer l'intégrité d'un bâtiment existant sous-dimensionné face à la sollicitation sismique.

Le renforcement sismique des bâtiments est un sujet qui intéresse fortement le monde du Génie Civil et du Bâtiment, puisque de nombreuses structures existantes dans le monde ont été dimensionnées et construites sans tenir compte des sollicitations induites par le séisme. Le risque d'instabilité et d'effondrement de ce parc d'ouvrages, souligné par l'endurcissement au cours des dernières années des normes sismiques au niveau européen et mondial, a déclenché un fort intérêt pour la recherche de solutions de renforcement permettant d'adapter le bâtiment aux dernières exigences sismiques des différents pays. De nombreuses techniques de renforcement ont été dégagées, et il y a une tendance générale à incorporer le renforcement des bâtiments existants dans les normes de construction.

Le document « Synthèse des méthodes de renforcement parasismique » se centre uniquement sur le renforcement des bâtiments existants et non pas dans les conseils de construction neuve selon les règles du parasismique. La table de matières de ce document est présentée dans l'Annexe 1. Nous présentons cependant ci-dessous la logique d'organisation de ses chapitres tout comme les conclusions générales qui en ont été dégagées et qui ont servi pour la deuxième partie du PFE.

2.2 Organisation des chapitres

Les chapitres du document ont été organisés de façon à présenter d'une façon claire la classification choisie pour les renforcements. Quatre groupes de renforcements sont distingués dans cette classification :

- Rigidification et renforcement de la structure
- Augmentation de la ductilité
- Isolation parasismique
- Augmentation de la dissipation d'énergie

Ces quatre groupes présentent des philosophies de renforcement différentes.

Le premier groupe cherche l'augmentation de la capacité résistante de la structure pour lui permettre de reprendre les efforts induits par le séisme.

Le deuxième groupe se focalise sur l'augmentation de la ductilité de la structure pour permettre la dissipation d'énergie par déformation plastique de celle-ci, évitant ainsi les ruptures fragiles et subites qui mettent en danger les vies humaines.

Le troisième groupe agit directement sur la sollicitation : il diminue la sollicitation sismique atteignant la structure en isolant celle-ci du sol. Une structure peu renforcée peut ainsi avoir un bon comportement même sous des séismes d'amplitude importante.

Finalement, le quatrième groupe favorise la dissipation d'énergie et donc atténue les efforts induits dans la structure au cours du temps.

Ces quatre catégories de solutions de renforcement ne cherchent pas à décrire d'une façon exhaustive les renforcements existants. On peut en trouver d'autres mais qui seront très liées aux caractéristiques particulières du bâtiment ou de son entourage. Des exemples de ces solutions non inclues dans le rapport sont les suivants :

- Diminution des masses (et donc diminution des forces d'inerties mises en jeu par le séisme)
- Descente du centre de gravité de l'ouvrage vers les étages inférieurs de celui-ci
- Actions sur le sol d'assise de l'ouvrage (pour des sols qui présentent un danger de liquéfaction)
- …

Le rapport est donc structuré par ces quatre grands chapitres correspondant au quatre tendances générales de renforcement face au séisme. Des sous-chapitres indiquent les différentes actions dans la structure qui permettent d'atteindre les objectifs de chaque catégorie de renforcement et donnent des exemples de bâtiments ayant incorporé le renforcement ou des essais de laboratoire validant le comportement de celui-ci.

2.3 Conclusion

La recherche bibliographique effectuée a été très utile face au choix du bâtiment de référence de l'étude du renforcement pour un cas particulier et des renforcements retenus. Les solutions les plus habituelles pour des bâtiments d'hauteur moyenne en béton armé et dont l'application peut être faite dans le cadre d'un avant-projet sans des essais en laboratoire ou de longues études complémentaires ont été retenues.

Nous avons essayé de ne pas proposer des renforcements d'une des seules catégories, même si pour les bâtiments non exceptionnels, ce sont des renforcements par rigidification de la structure qui sont mis en place dans la plupart des cas. Nous avons aussi essayé d'incorporer

le savoir-faire de l'entreprise pour proposer des solutions qui rentrent dans le domaine d'activité de celle-ci et donc qui pourront servir de référence de façon interne dans les avant-projets de l'entreprise.

Ce rapport n'est en aucun cas un document figé. Il sera complété au fur et à mesure par des nouvelles techniques de renforcement, de nouveaux exemples donnant une meilleure illustration de chaque technique ou des nouvelles catégories de renforcement qui gagneraient de l'importance dans le marché. Il s'agit donc d'un premier document de base facilitant la compréhension du renforcement parasismique et de l'état de l'art sur ce sujet.

3 Sélection du bâtiment

3.1 Critères de sélection du bâtiment

Forme extérieure simple :

Il s'agit d'étudier un bâtiment dans la forme extérieure ne soit pas trop particulière et dont les résultats ne peuvent être appliqués à d'autres bâtiments. Des formes rectangulaires dans le plan, sans angles rentrants, et des étages réguliers en élévation sont préférables.

Bâtiment à faible hauteur :

Nous nous intéressons à des bâtiments de faible hauteur, ne dépassant pas les six ou sept étages.

Bâtiment courant :

Nous étudions des bâtiments courants, qui ne présentent pas un intérêt historique particulier ou des caractéristiques esthétiques particulières de façade qui influencent le choix de renforcement.

Importance de son utilisation :

Nous n'étudions pas de bâtiments dont le fonctionnement doit être maintenu en tout moment, même après un séisme important. Ces bâtiments demandent souvent des renforcements par isolation parasismique, ce qui réduit notre choix de réparation. Pour rester dans un contexte plus général, le bâtiment type étudié doit pouvoir tolérer une certaine détérioration lors du séisme maximal de dimensionnement.

Structures à poutres/poteaux avec voiles en béton armé :

Nous nous centrerons dans des structures en béton armé uniquement. Nous ne considèrerons pas les structures mixtes ou métalliques. Les bâtiments en béton armé les plus courants sont composés d'une structure résistante de poutres/poteaux et de quelques voiles béton pour contreventer la structure. Le bâtiment type étudié doit avoir cette structure résistante.

Dimensionnement sous charges gravitaires :

C'est le cas de la plupart des bâtiments existants. Bâtis lorsque les normes sismiques n'étaient pas encore en vigueur, ils n'ont été dimensionnés que pour des charges verticales de poids propre et d'exploitation. Les problèmes de ces structures sont un ferraillage déficient, des sections sous-dimensionnées des éléments et l'instabilité globale de la structure. Le bâtiment type choisi doit donc être une structure existante dont on connaît les plans de construction et qui présente ces limitations.

Problèmes de sol non dimensionnants :

Pour garder une plus grande généralité, nous ne considérons pas des sols présentant des risques de liquéfaction.

3.2 Description du bâtiment choisi

Le bâtiment sélectionné est un des blocs d'un complexe scolaire en Turquie, construit en 1999. Il s'agit du bloc central de la figure ci-dessous, séparé des autres blocs par des joints et donc il peut être étudié de façon indépendante.

3.2.1 Plan de masse du complexe scolaire

Dans la Figure 1 nous présentons le plan de masse du complexe scolaire. Le bloc E de ce complexe, encerclé dans la Figure 1, est le bloc que nous étudions. Séparé des autres blocs par des joints de dilatation, on peut l'étudier de façon isolée.

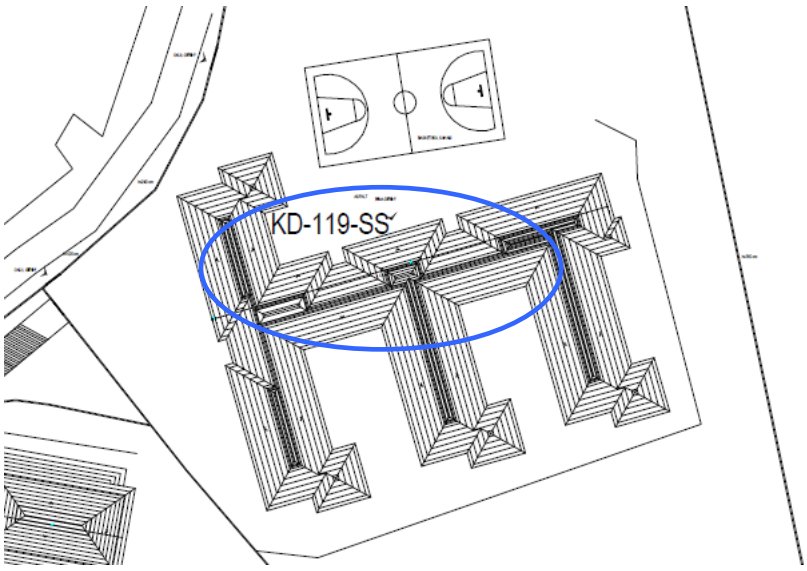


Figure 1. Bloc E dans le complexe scolaire

3.2.2 Photographies du bâtiment

Nous présentons dans la Figure 2 et la Figure 3 des vues du bâtiment existant.

Figure 2. Vue 1 de la façade nord de la structure

Figure 3. Vue 2 de la façade nord de la structure

3.2.3 Modèle SAP du bâtiment

Pour la modélisation du bâtiment, nous avons choisi le logiciel SAP, logiciel de calcul aux éléments finis adapté aux études sismiques. Nous présentons dans les Figures 4 et 5 de vues de ce bâtiment. Dans la Figure 6 on présente uniquement la distribution des voiles.

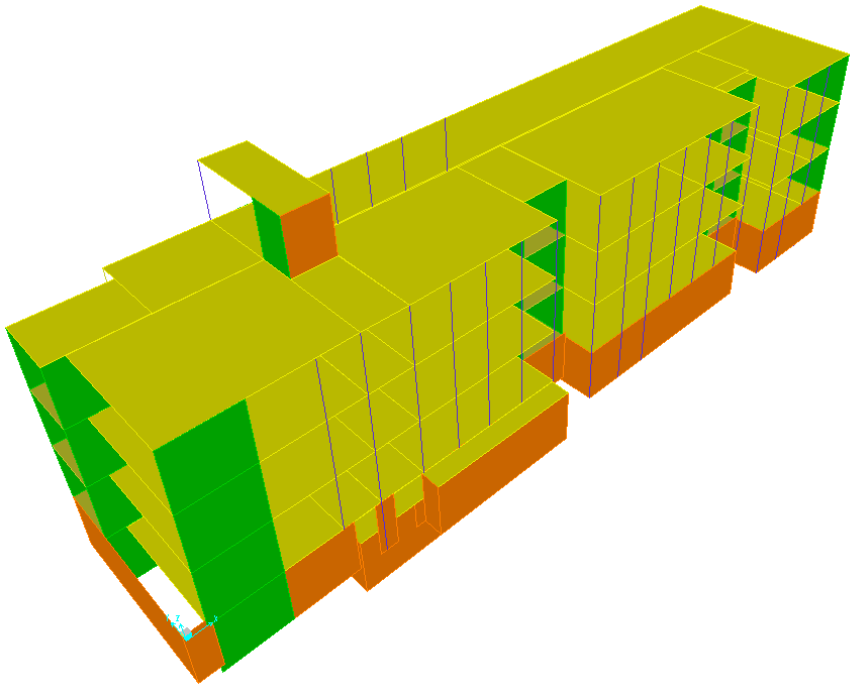


Figure 4. Modèle 3D du bâtiment existant – Vue 1

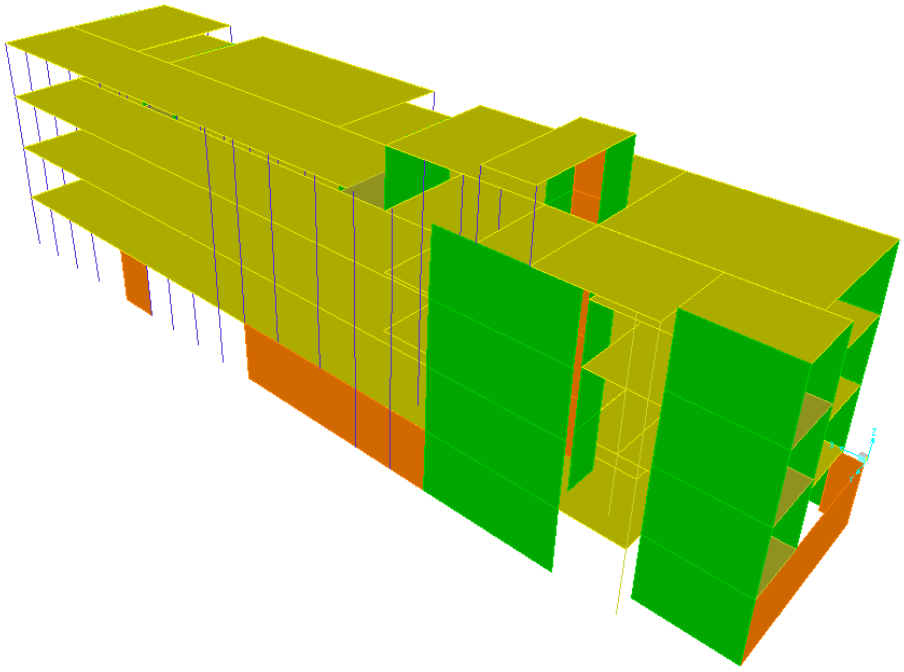


Figure 5. Modèle 3D du bâtiment existant – Vue 2

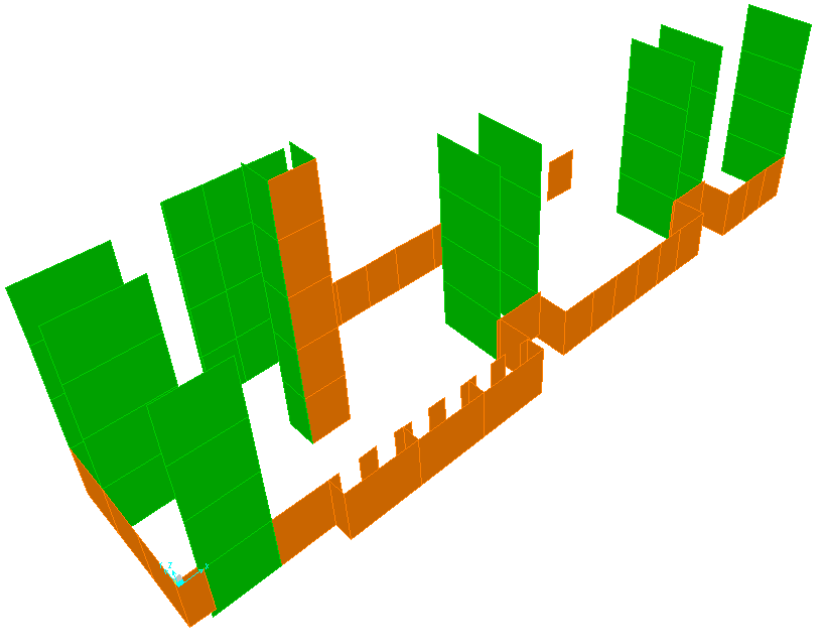


Figure 6. Répartition des voiles.

3.3 Adaptation du bâtiment choisi

Les informations sur le bâtiment dont nous disposons sont :

- les plans d'architecte
- l'utilisation des espaces
- les ratios de ferraillage des éléments structurels
- les conditions du sol

Les plans des éléments structurels par étage sont décrits dans l'Annexe 2. L'adaptation du bâtiment choisi par rapport aux critères exposés ci-dessus est décrite dans les paragraphes suivants :

Forme extérieure simple :

Le bloc E de cette école primaire a une forme rectangulaire dans le plan et est séparé par des joints des autres blocs du bâtiment, de façon à pouvoir être étudié de façon isolée. Il présente une régularité relative en élévation sauf au niveau du sous-sol où il y a un plus grand nombre de voiles structuraux.

Bâtiment à faible hauteur :

C'est un bâtiment R+3. Il est donc de faible hauteur.

Bâtiment courant :

Il s'agit d'une école primaire construite en 1999 qui ne présente pas une qualité architecturale particulière qui impose un renforcement peu visible en façade. Sa géométrie est utilisée de façon très répandue dans les bâtiments scolaires de la Turquie et d'autres pays.

Importance de son utilisation :

Il s'agit d'une école primaire. Le bâtiment doit assurer sa tenue structurelle pour le séisme dimensionnant, mais le maintien de son utilisation n'est pas obligée après celui-ci comme c'est le cas pour des hôpitaux ou certains bâtiments administratifs: des dommages structurels empêchant le service sont admis.

Structures à poutres/poteaux avec voiles en béton armé :

La structure est composée principalement d'un treillis poutres/poteaux puis de quelques voiles en béton armé continus sur toute la hauteur du bâtiment.

Dimensionnement sous charges gravitaires :

Les ratios présentés des éléments structuraux disponibles ont été vérifiés et corrigés en certains cas pour assurer que le bâtiment est dimensionné sous charges gravitaires.

Problèmes de sol non dimensionnants :

Le sol ne présente pas de risques de liquéfaction même si des tassements globaux de la structure ont été observés.

Le bâtiment E du complexe de l'école primaire en Turquie vérifie les différents points que le bâtiment type d'étude doit vérifier. Il peut donc être sélectionné comme bâtiment type d'étude.

4 Hypothèses de calcul

4.1 Normes considérées

Les normes que nous considérons sont les Eurocodes. En particulier :

Eurocode 8 : « Calcul des structures pour leur résistance aux séismes ».

- Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règes pour les bâtiments. (NF EN 1998-1)
- Partie 3 : Evaluation et renforcement des bâtiments. (NF EN 1998-3)

Nous avons préféré les normes européennes au maintien des normes sismiques de la Turquie, lieu où se situe l'école primaire, pour garder une plus grande généralité de l'étude.

4.2 Caractérisitques du sol

Il s'agit d'une couche d'argiles limoneuses d'au moins 15 mètres de profondeur sans présence d'eau. Ses caractéristiques sont décrites dans le Tableau 1 ci-dessous :

Sol	Classe du sol	Cu (MPa)
Argiles limoneuses	C	100

Tableau 1. Caractéristiques du sol.

Ce sol ne présente pas de danger de liquéfaction.

4.3 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des matériaux ont été déterminées par une investigation sur place et des analyses au laboratoire de carottages de béton ou échantillons d'aciers prélevés. Les résistances mesurées sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessous :

Béton fck (MPa)	Aciers fy (MPa)
20	420

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux.

Lors de la vérification des sections ces valeurs sont réduites par un coefficient de confiance qui tient compte de la fiabilité des mesures. Il y a trois catégories de connaissance du bâtiment à réparer : connaissance limitée, connaissance normale et connaissance intégrale. Nous nous situons dans l'une ou l'autre catégorie de connaissance selon les plans de construction disponibles et le nombre d'essais réalisés sur place.

Dans notre étude nous allons considérer la catégorie de connaissance intégrale, qui correspond à un coefficient de confiance CF_{KL3}=1,00 (*Eurocode 8_Partie 3_ § 3.3*). Ce n'est pas le coefficient qui correspond aux données que nous avons, puisque nous ne travaillons qu'avec des taux de ferraillage des éléments, ce qui est très peu précis, mais nous ne voulons pas être trop défavorables pour une étude qui doit pouvoir servir pour des projets réels où nous aurons des données plus précises. Nous gardons donc la résistance des éléments obtenue dans les essais sans réduction.

4.4 Limites de performance

L'Eurocode définit trois limites de performance de la structure pour la réparation de bâtiments. La vérification des trois limites n'est pas toujours obligatoire et en France c'est l'Administration française ou le maître d'ouvrage du projet qui imposent celles qui doivent être effectuées.

Il s'agit des trois limites suivantes :

Quasi-effondrement (NC) : la structure est fortement endommagée et présente des forts déplacements permanents tout en conservant la stabilité d'ensemble. Elle ne résistera pas à des répliques du séisme, même des répliques de faible intensité. La destruction de la structure endommagée est inévitable.

Dommages significatifs (SD) : la structure est endommagée de manière significative avec des déplacements permanents modérés. Elle peut encore supporter des séismes d'intensité modérée. La réparation de la structure est vraisemblablement non rentable.

Limitation de dommages (DL) : la structure est faiblement endommagée, sans avoir subi d'incursion post-élastique significative et donc avec des déplacements permanents négligeables. La structure ne requiert aucune mesure de réparation.

Dans le cadre de notre étude, nous allons étudier ces trois limites de performance et dimensionner la réparation pour les satisfaire toutes.

Chaque limite de performance correspond à un séisme avec une période de retour particulière, et les vérifications à effectuer dans la structure sont différentes.

La définition de l'action sismique attribuée à chaque limite de performance est décrite dans le chapitre suivant.

4.5 Actions et combinaisons

Nous considérons les actions et les coefficients présentés dans les Eurocodes 0 et 1. Nous avons comparé ces valeurs avec les valeurs basées sur les normes turques et présentées dans le rapport du bâtiment. Comme ces valeurs ne sont pas très éloignées, nous choisissons de suivre les Eurocodes.

4.5.1 Charges permanentes

Nous considérons comme charges permanentes le poids propre du bâtiment. Il s'agit du poids propre des éléments structuraux et des éléments non structuraux. Les poids propres des éléments non structurels introduits comme charges réparties ou linéaires dans le modèle sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous :

Type de charge	Elément	Valeur
Volumique	Béton armé (éléments structure)	25 kN/m3
Répartie	Toit	2,0 kN/m2
Linéaire	Murs de maçonnerie (e=20cm)	3,8 kN/m2
Linéaire	Murs de maçonnerie (e=25cm)	4,8 kN/m2
Linéaire	Murs de maçonnerie (e=30cm)	5,6 kN/m2
Linéaire	Murs aérés (e=15cm)	1,85 kN/m2
Linéaire	Murs aérés (e=20cm)	2,4 kN/m2

Tableau 3. Charges permanentes.

Les charges permanentes totales sont les suivantes :

- Poids propre des éléments structuraux : 20.376 kN
- Poids propre des murs non structuraux : 4.895 kN

4.5.2 Charges variables

Les charges variables que nous considérons tiennent compte de l'utilisation des différents espaces du bâtiment. Les charges réparties pour chaque type d'espace sont présentées dans le Tableau 4 ci-dessous :

Utilisation	q_k (kN/m2)
Escalier Hall Couloirs	5
Salles de cours Cantine	3
Bureaux Toilettes	2
Zones stockage Cuisine	7,5

Tableau 4. Charges variables.

Les charges variables totales sont de 6590kN.

Lors de la combinaison des charges, les charges variables sont combinées avec le coefficient de combinaison $\psi_{E,I}$.

$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i}$ (*Eurocode EN 1998-1 §4.2.4 (2)P*)

On considère l'école comme une catégorie C de bâtiment (lieu de réunion) et le coefficient de combinaison $\psi_{2,I}$ est donc pris égal à 0,6.

Le coefficient Φ est détaillé dans l' Eurocode EN 1998-1 §4.2.4. Considérant que les étages de l'école ont bien des occupations corrélées, les valeurs des coefficients à prendre en compte sont présentés dans la Tableau 5 :

	φ	$\psi_{2,i}$	$\psi_{E,i}$
Toit	1,0	0,6	0,6
Etages à occupations corrélées	0,8	0,6	0,48

Tableau 5. Coefficient de combinaison $\psi_{E,i}$ (*Eurocode EN 1998-1 §4.2.4 (2)P*).

4.5.3 Charges sismiques

Pour chaque limite de performance on définit un spectre de calcul particulier. Il s'agit de spectres de calcul que l'on utilisera pour les deux directions horizontales. Il existe des spectres

élastiques de réponse pour une accélération verticale. Dans l'Eurocode 8_Partie 1_§4.3.3.5.2 (1), sont définies les situations dans lesquelles l'accélération verticale doit être prise en compte (éléments horizontaux avec des portées supérieures à 20m ou en console de plus de 5m de long, poutres supportant des poteaux, etc.). Notre structure ne présente pas d'éléments sur lesquels une vérification de l'accélération verticale doit être effectuée et donc nous n'en tenons pas compte.

La différence entre les spectres de chaque limite de performance est l'application d'un coefficient d'importance qui dépend de la période de retour du séisme attribué à chaque limite. Ces coefficients sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous :

Etat Limite	NC	SD	DL
Période de retour	2475 ans	475 ans	225 ans
Coefficient d'importance γ_I^*	1,73	1,00	0,78

Tableau 6. Coefficient d'importance.

L'expression du coefficient d'importance est définie de la façon suivante :

$$\gamma_I^* = \left(\frac{T_{LR}}{T}\right)^{-1/k}$$ (*Eurocode EN 1998-1 § 2.1 (4)*)

avec :

T_{LR} la période du séisme de référence (T_{LR} = 475 ans)

T la période du séisme considéré

k exposant dépendant de la sismicité mais toujours de l'ordre de 3 (c'est la valeur que l'on considère)

Le spectre de calcul correspond au spectre élastique défini par l'Eurocode avec l'application d'un coefficient de comportement. Nous utilisons le coefficient de comportement conseillé par l'Eurocode 8 pour la réparation de bâtiments en béton armé : q=1,5 (*Eurocode 8_Partie 3_§ 4.2*). Ce coefficient est un artifice de calcul qui permet de prendre en compte la dissipation d'énergie par plastification de la structure tout en conservant un calcul linéaire avec des spectres de calcul.

Ce coefficient de comportement ne peut toutefois être appliqué que pour les bâtiments ayant étés construits en respectant l'Eurocode 2. Pour notre bâtiment, nous n'avons pas les plans précis de construction qui nous permettraient de déterminer si le bâtiment est conforme ou pas. Mais, pour ne pas nous écarter de notre objectif de généralité, nous faisons l'hypothèse que notre bâtiment respecte bien les exigences de l'Eurocode 2 et donc nous adoptons un coefficient de comportement de 1,5.

Le détail des spectres est présenté dans les chapitres suivants ; lors de l'étude du bâtiment existant pour chacune des deux zones sismiques considérées.

La masse sismique totale de la structure est détaillée dans le Tableau 7 :

Toit	5088 kN
Deuxième étage	7372 kN
Premier étage	7456 kN
Rez-de-chaussée	7870 kN
Sous-Sol	1765 kN
TOTAL	29540 kN

Tableau 7. Masse sismique par étage.

On n'a pas incorporé la masse de la dalle du sous-sol puisqu'elle repose directement sur les fondations que l'on considère comme des encastrements.

4.6 Combinaisons

La combinaison d'actions à tenir en compte est la suivante :

$$\sum_{j\geq 1} G_{kj} "+" \gamma_I \cdot A_{Ed} "+" \sum_{i\geq 1} (\psi_{Ei} \cdot Q_{ki}) \quad (Eurocode\ \ EN\ 1998\text{-}3\ \S\ 4.2\ (4)P)$$

avec :

G_{kj} : valeurs caractéristiques des actions permanentes

A_{Edj} : valeurs de calcul de l'action sismique

Q_{ki} : valeurs caractéristiques des actions variables (appliquées sur l'intégralité de toutes les surfaces concernées)

Ψ_{Ei} : coefficients de combinaison des actions caractéristiques

La masse sismique de référence à prendre en compte pour les effets d'inertie de l'action sismique sont les masses associées à toutes les charges gravitaires qui apparaissent dans la combinaison suivante :

$$\sum_{j\geq 1} G_{kj} "+" \sum_{i\geq 1} (\psi_{Ei} \cdot Q_{ki}) \quad (Eurocode\ \ EN\ 1998\text{-}1\ \ \S 3.2.4(2)P)$$

4.7 Vérifications

Les vérifications effectuées sont particulières à chaque cas de charge et à la méthode de modélisation du séisme utilisée. Pour notre cas, étude avec spectre de réponse élastique réduit par coefficients de comportement, elles sont présentées dans le Tableau 8 :

VERIFICATIONS		Etat Limite de Quasi-effondrement (NC)	Etat limite de Dommages Significatifs (SD)	Etat limite de Limitation de Dommages (LD)
Eléments soumis à la flexion	Déformations	-	-	Limitation du déplacement inter-étage
	Contraintes	Résistance ultime	Résistance ultime	Limite élastique
Eléments soumis à l'effort tranchant	Sollicitations	V < VR	-	-
Nœuds Poteau /Poutre	Sollicitations	Vjhd < Vjhd,max	-	-

Tableau 8. Liste des vérifications.

Le détail des vérifications imposées par l'Eurocode 8 est présenté dans l'Annexe 3. Il faut cependant souligner un point important de ces vérifications que nous n'allons pas effectuer dans notre étude : la vérification des nœuds poteau-poutre. Il s'agit d'un des éléments les plus critiques lors de la vérification d'un bâtiment sous séisme. Les Eurocodes imposent une vérification particulière présentée dans le tableau ci-dessus.

Cependant, comme nous n'avons pas d'information détaillée sur le ferraillage des nœuds de notre bâtiment, nous décidons de ne pas étudier cette problématique pour notre cas particulier mais nous tenons à souligner que c'est une vérification indispensable dans un projet réel.

4.8 Ferraillage des éléments

Les plans de ferraillage de construction des différents éléments du bâtiment ne sont pas disponibles. La seule information qui nous est donnée est le taux de ferraillage longitudinal de ceux-ci et la répartition des cadres, informations présentées dans le Tableau 9.

Poutres		Poteaux		Voiles	
Ferraillage longitudinal (Ratio)	Cadres	Ferraillage longitudinal (Ratio)	Cadres	Ferraillage longitudinal (Ratio)	Cadres
0,002	ϕ8/20	0,01	ϕ8/13	0,008	ϕ8/20

Tableau 9. Ferraillage des éléments.

Nous utilisons ces taux dans notre étude, corrigés ponctuellement lorsqu'ils n'étaient pas suffisants pour reprendre le poids propre de la structure.

5 Batiment existant - Zone de faible sismicité

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les charges sismiques qui s'appliquent sur le bâtiment existant dans une zone de faible sismicité (zone 2) tout comme l'étude de son comportement structurel pour en déduire les points faibles que les différents renforcements devront compenser.

5.2 Actions sismiques

Pour notre projet et pour une zone de faible sismicité, les caractéristiques du spectre de référence recommandé par l'Eurocode 1 sont présentées dans le Tableau 10 :

Caractérisitque	Symbole	Valeur	Unité
Coefficient d'importance du bâtiment	γ_I	1,2	-
Coefficient de comportement de la structure	q	1,5	-
Accélération maximale du sol	a_{gr}	0,7	m/s^2
Type de spectre	-	type 2	-
Paramètre de sol	S	1,5	-
Période	T_B	0,06	s
Période	T_C	0,4	s
Période	T_D	2	s

Tableau 10. Caractérisation de l'action sismique.

Le détail des formules de définition du spectre de réponse de type 2 de l'Eurocode se trouve dans le paragraphe § 3.2.2.5 de la partie 1 de l'Eurocode 8. Avec l'application des valeurs de notre projet, le spectre de référence obtenu est présenté dans la Figure 7 :

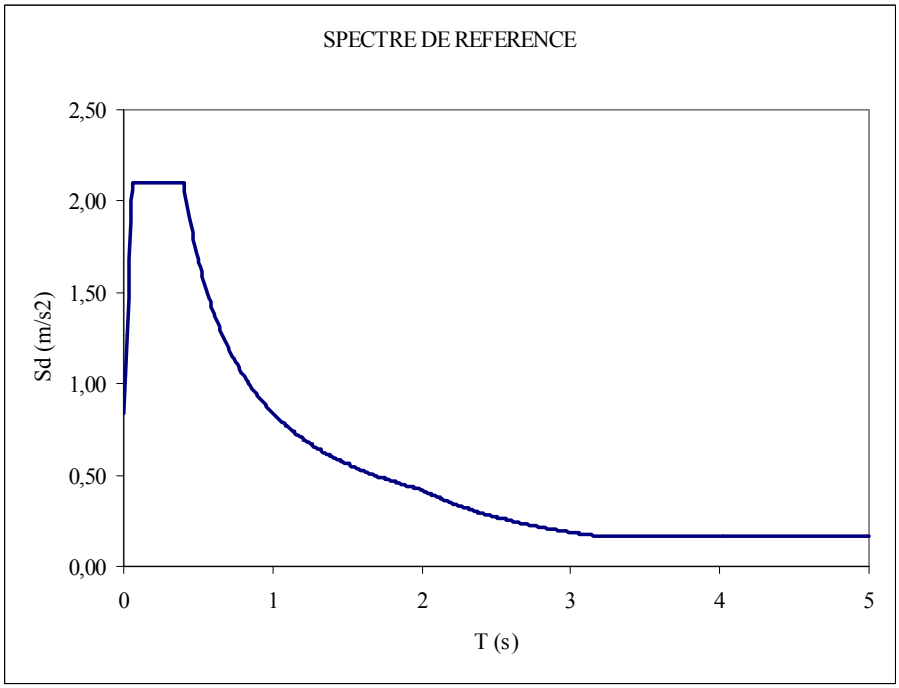


Figure 7. Spectre de référence (zone 2).

Les spectres pour les états limites que nous allons vérifier sont ceux de la Figure 8 :

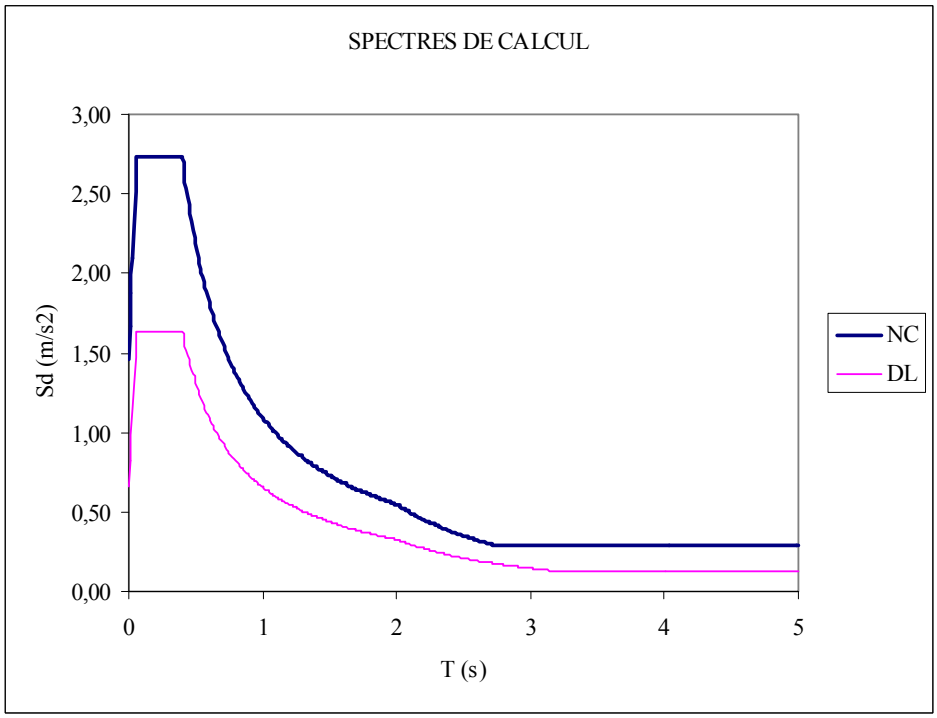


Figure 8. Spectres de calcul pour les états limites NC et DL.

Comme il a été souligné dans les hypothèses du projet, les vérifications pour l'état limite de dommages significatifs sont moins contraignantes que celles des autres états limites et nous ne l'étudions pas.

5.3 Comportement structurel

5.3.1 Introduction

Nous présentons l'analyse modale de la structure, les vérifications des poteaux, poutres et voiles exigées par l'Eurocode 8.3 (hors nœuds) tout comme la vérification des déplacements inter-étage.

5.3.2 Analyse Modale

L'analyse modale effectuée est de 200 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers 200 modes est de 90,7% dans la direction longitudinale, 94,2% dans la direction transversale et 79,4% dans la direction verticale.

Les modes prépondérants dans les directions horizontales sont présentés dans le Tableau 11 :

L'axe X correspond à la direction longitudinale et Y à la direction transversale.

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
1	0,326 s	4%	28%
2	0,246 s	56%	5%
3	0,187 s	1%	31%

Tableau 11. Modes propres principaux.

Les Figures 9, 10 et 11 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

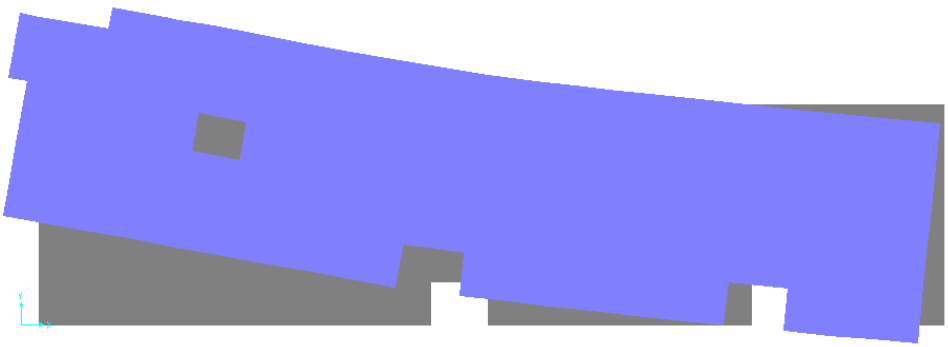


Figure 9. Déformée pour le Mode 1

Figure 10. Déformée pour le Mode 2

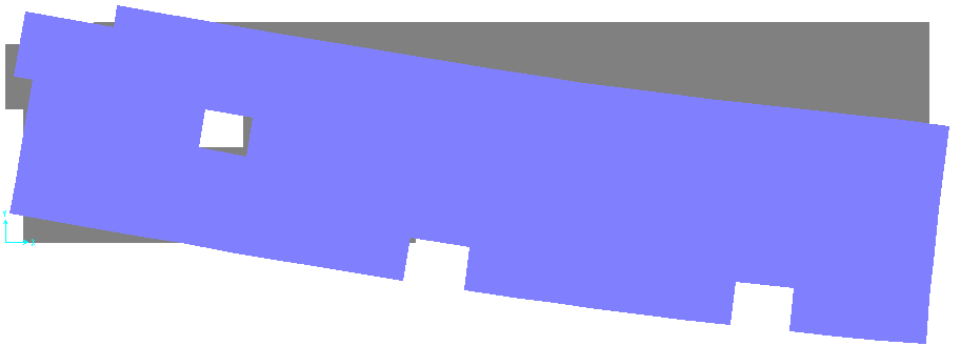


Figure 11. Déformée pour le Mode 3

Du fait de l'irrégularité du bâtiment, les modes principaux de celui-ci entraînent une importante torsion en plan, ce qui est très défavorable pour la résistance de la structure.

5.3.3 Sollicitations sismiques

En introduisant les périodes propres de la structure dans les spectres de calcul, nous nous trouvons dans le plateau des accélérations, comme nous pouvons le voir dans les spectres des Figures 12 et 13.

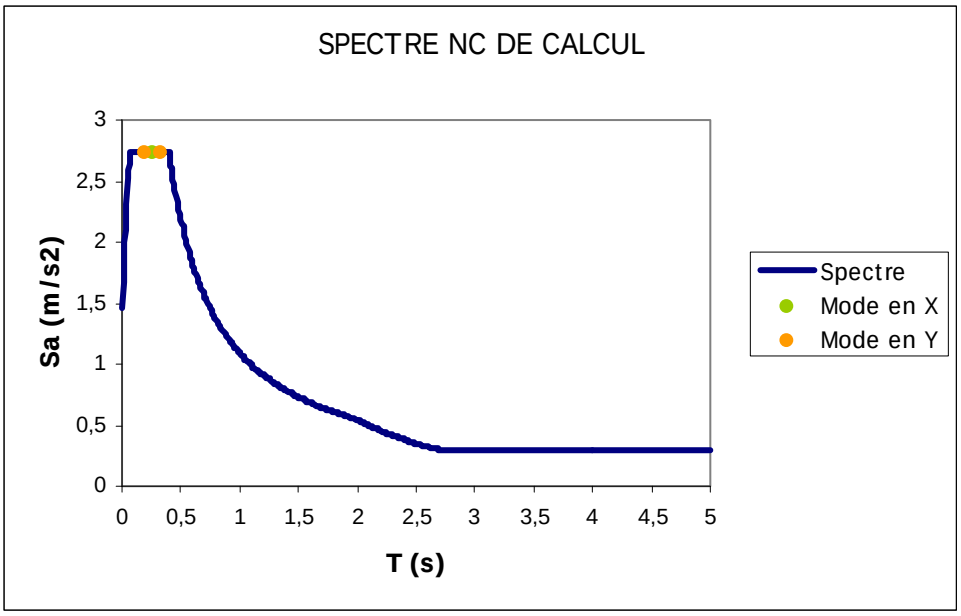


Figure 12. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

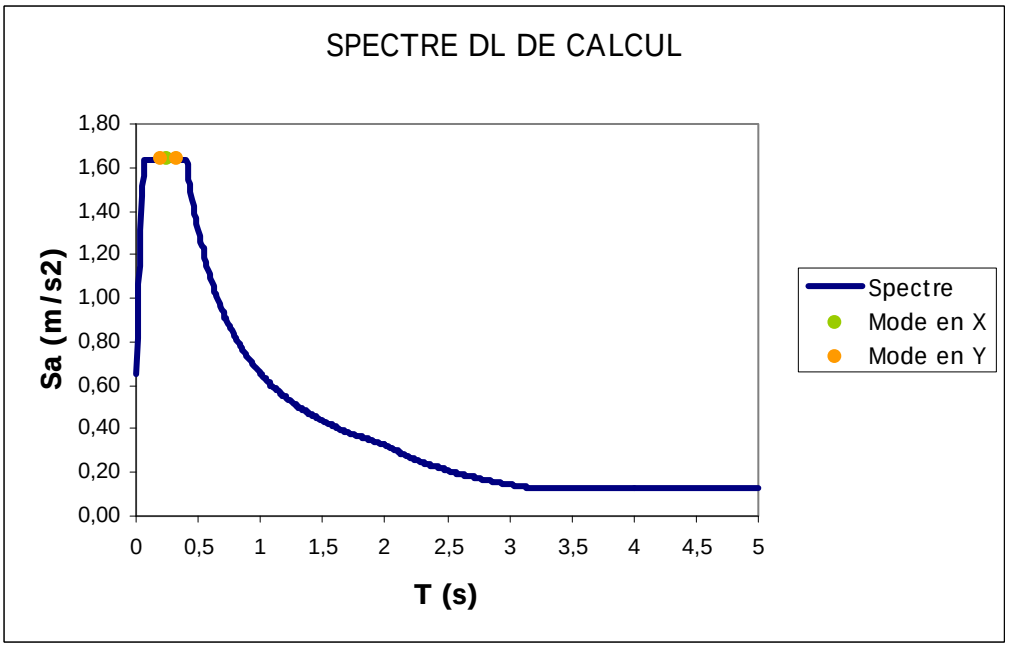


Figure 13. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

5.3.4 Vérifications

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 2.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 2.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Les vérifications des sections tout comme les caractéristiques des matériaux considérées pour les deux états limites sont détaillées dans le Tableau 12:

	Non Effondrement	Limitation de Dommages
Combinaisons	2.3 2.4	2.5 2.6
Vérifications	Flexion et Cisaillement	Flexion
Résistance des matériaux	f_{cd} f_{yd}	0,6 f_{cd} 0,8 f_{yd}.
Coefficients partiels des matérieaux	γ_c=1,2 γ_s=1,0	γ_c=1,0 γ_s=1,0

Tableau 12. Récapitulatif pour la vérification des éléments.

Pour l'état limite de Non-Effondrement, seulement sont vérifiés au cisaillement les éléments qui résistent à la flexion. Les éléments qui ne résistent pas à la flexion ne sont plus vérifiés à l'effort tranchant et donc ne sont pas comptabilisés dans les éléments défaillants face au cisaillement.

Nous présentons dans l'Annexe 4, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Résistance des éléments

Le Tableau 13 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure :

	POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
NC	1	26	33	**60**
DL	0	2	5	**6**
TOTAL	**2**	**35**	**43**	**84**
% TOTAL	**1%**	**10%**	**44%**	**13%**

Tableau 13. Pourcentage des éléments défaillants.

Le pourcentage global total d'éléments ne vérifiant pas les critères des états limites considérés est de 13%. La structure nécessite donc d'une intervention pour l'adapter aux exigences sismiques.

Les éléments qui présentent un pourcentage de défaillance le plus élevé sont les voiles, seuls éléments de contreventement de la structure.

Les poteaux ne nécessitent presque pas de renfort.

D'une façon générale, les éléments placés dans la partie gauche du bâtiment, partie plus rigide, sont plus sollicités. La torsion globale du bâtiment entraîne une concentration des efforts dans la partie gauche du bâtiment.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont présentés dans les Tableaux 14 et 15 :

ds : déplacement inter-étage

dslim : déplacement inter-étage limite

FS=dslim/ds Facteur de sécurité en déplacements

COMBINAISON 2.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	17,3	41,9	2,43
	min	16,8	41,9	2,49
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	11,5	43,8	3,80
	min	11,2	43,8	3,91
DEUXIEME - PREMIER	MAX	7,3	43,8	5,97
	min	7,1	43,8	6,18
PREMIER - RDC	MAX	3,0	43,8	14,61
	min	2,8	43,8	15,60
RDC - SS	MAX	0,6	43,8	72,32
	min	0,7	43,8	60,01

Tableau 14. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5)

COMBINAISON 2.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	19,5	41,9	2,15
	min	18,9	41,9	2,21
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	12,5	43,8	3,51
	min	12,0	43,8	3,63
DEUXIEME - PREMIER	MAX	7,9	43,8	5,56
	min	7,5	43,8	5,80
PREMIER - RDC	MAX	3,3	43,8	13,18
	min	3,1	43,8	14,34
RDC - SS	MAX	0,7	43,8	60,64
	min	0,8	43,8	56,25

Tableau 15. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6)

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

5.4 Conclusion

Les vérifications de la structure existante montrent que la structure n'a pas un comportement acceptable face à la sollicitation sismique : les déplacements inter-étage ne sont pas problématiques mais la résistance de 13% des éléments est dépassée.

Le renforcement de la structure devra viser les différents points :

- La régularisation de la structure pour éviter la concentration des efforts dans la partie gauche.
- Renforcement des éléments existants et/ou rajout d'éléments structuraux.

Le pourcentage relativement faible d'éléments défaillants ne justifie pas des interventions lourdes comme peuvent l'être l'isolation ou l'introduction d'un amortissement de la structure.

6 Renforcements - Zone de faible sismicité

Nous présentons, pour chaque solution de renforcement étudié, la description de celle-ci puis le récapitulatif des résultats obtenus avec ce renforcement principal et avec un renforcement complémentaire en fibres de carbone.

6.1 Rajout de voiles

6.1.1 Description

L'objectif de ce renforcement est de diminuer ainsi la torsion dans le bâtiment et, de ce fait, la sollicitation dans les éléments.

Pour choisir l'emplacement des nouveaux voiles, nous avons cherché à rendre la structure régulière en plan tout en plaçant les voiles dans des emplacements qui ne détériorent pas la qualité d'utilisation du bâtiment.

Les voiles rajoutés sont continus sur toute la hauteur du bâtiment, ont une épaisseur de 30cm et ne reprennent pas de poids propre de la structure.

Les critères de régularité recherchés sont ceux imposés par l'Eurocode (*EN 1998-1 §4.2.3.2*):

$r_x > 3{,}33 \cdot e_{0x}$

$r_y > 3{,}33 \cdot e_{0y}$

$r_x > l_s$

$r_y > l_s$

avec

e_0 : la distance entre le centre de torsion et le centre de gravité

r_x et r_y: les rayons de torsion

l_s le rayon de giration du plancher

Au total cinq nouveaux voiles, trois selon X et deux selon Y ont été rajoutés sur la toute la hauteur du bâtiment.

Dans la Figure 14 on présente une vue 3D des voiles existants en noir et des voiles rajoutés en orange. Dans la Figure 15 on en présente deux vues en plan.

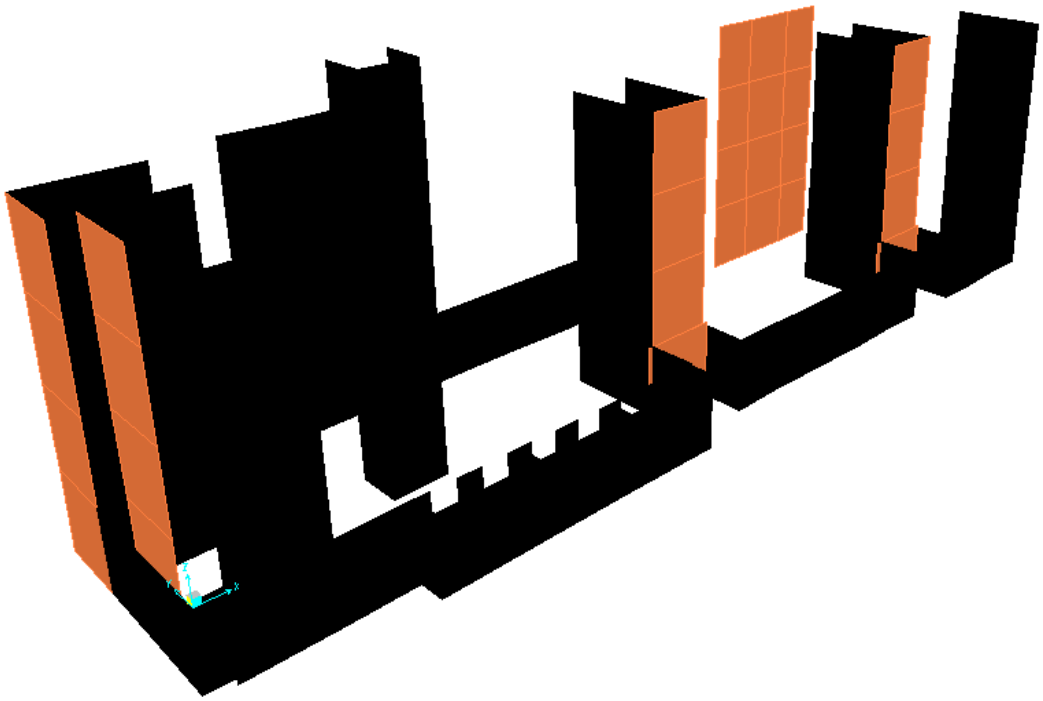


Figure 14. Voiles rajoutés dans la structure existante.

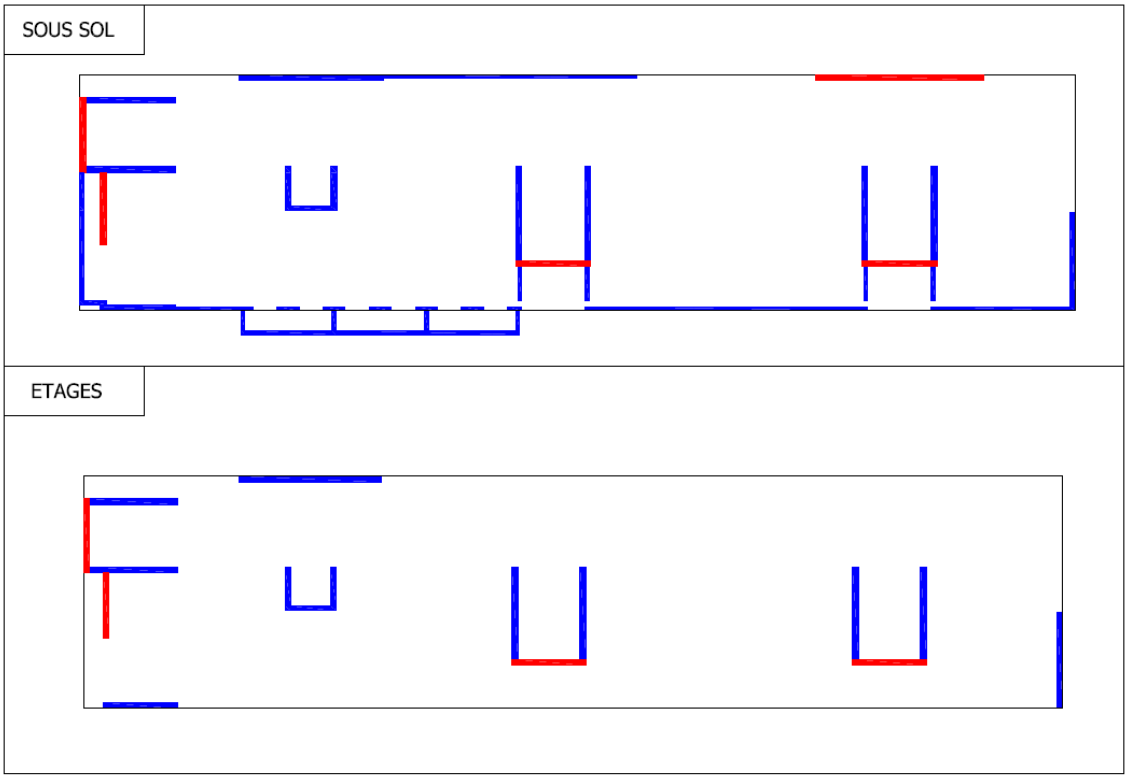


Figure 15. Plan des voiles rajoutés dans la structure existante.

6.1.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Diminution la torsion en plan du bâtiment.
- Elimination du point dur situé dans la partie gauche du bâtiment.
- Soulagement des voiles sous charges sismiques.

Le bâtiment existant sous zone faiblement sismique présente un pourcentage d'éléments défaillants de 13%. Pour qu'une intervention de renforcement autre que le renforcement classique des éléments défaillants soit considérée intéressante, elle doit réduire ce pourcentage à un pourcentage inférieur à 5%. Ces 5% d'éléments défaillants après renforcement seront renforcés par des moyens classiques avec des interventions locales.

L'objectif du renforcement par rajout de voiles en béton est de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants à **5%.**

Analyse modale

L'analyse modale effectuée est de 200 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers 200 modes est de 90,9% dans la direction longitudinale, 94,8% dans la direction transversale et 79,8% dans la direction verticale.

Le Tableau 16 présente les modes prépondérants dans les directions horizontales :

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
1	0,199 s	0%	65%
2	0,178 s	46%	1%
3	0,162 s	17%	0%

Tableau 16. Modes propres principaux.

Les périodes propres de la structure ont baissé par rapport à celles du bâtiment existant, ce qui est logique vu l'augmentation de raideur.

Les Figures 16, 17 et 18 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

Figure 16. Déformée pour le Mode 1

Figure 17. Déformée pour le Mode 2

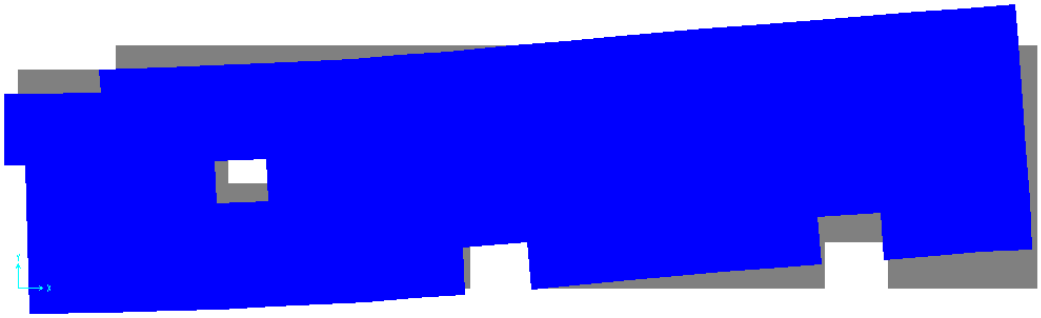


Figure 18. Déformée pour le Mode 3

Avec la régularité améliorée, la torsion du bâtiment est moins importante. Le premier mode est de translation transversale, le deuxième de translation longitudinale avec une certaine déviation puis le troisième se caractérise par une rotation autour de l'axe Z. Avec cette modification géométrique du bâtiment, la concentration d'efforts dans la partie gauche du bâtiment devrait être soulagée.

Sollicitations sismiques

En introduisant les périodes propres de la structure dans les spectres de calcul, nous nous trouvons toujours dans le plateau des accélérations. On peut le voir dans les Figures 19 et 20.

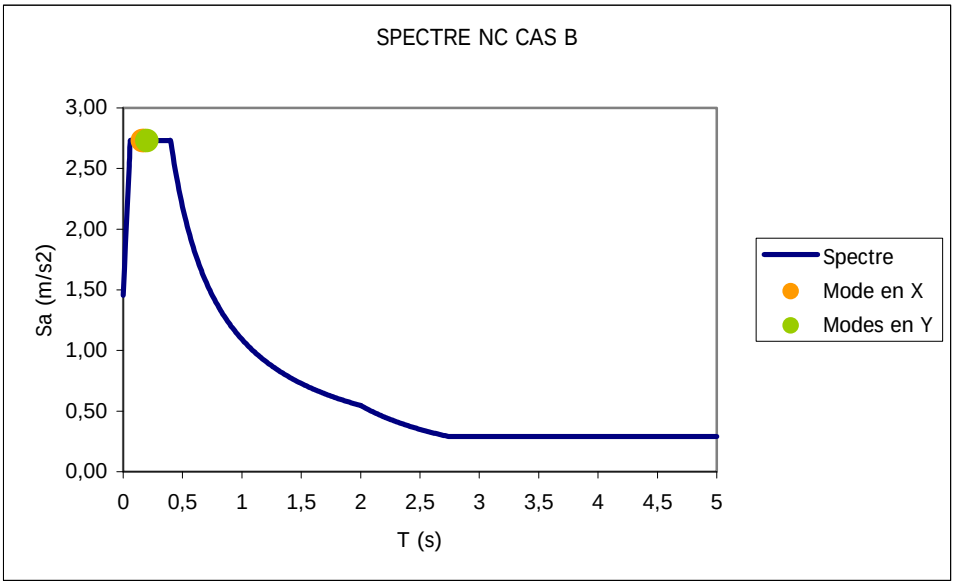


Figure 19. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

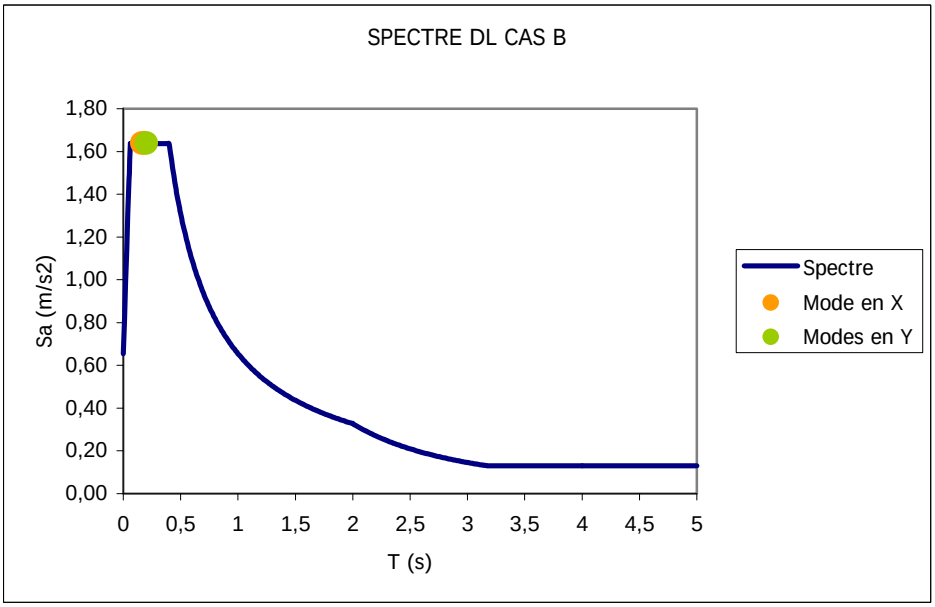


Figure 20. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

Résistance des éléments

Nous présentons dans l'Annexe 5, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Le Tableau 17 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure :

Nombre d'éléments défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
EXISTANT	NC	1	26	30	**56**
	DL	0	2	5	**6**
	TOTAL	**2**	**35**	**43**	**80**
	%TOTAL	**1%**	**10%**	**44%**	**13%**
REGULARITE	NC	0	0	11	**11**
	DL	0	0	1	**1**
	TOTAL	**0**	**0**	**19**	**19**
	%TOTAL	**0%**	**0%**	**19%**	**3%**

Tableau 17. Pourcentage des éléments défaillants.

Le pourcentage global total d'éléments ne vérifiant pas les critères des états limites considérés est de 3%. Pour la structure existante, ce même pourcentage était de 13%. Le détail des améliorations par type d'élément est présenté dans le Tableau 18 :

AMELIORATION	POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
NC	1%	7%	19%	**7%**
DL	0%	0%	4%	**1%**
TOTAL	**1%**	**10%**	**24%**	**10%**

Tableau 18. Pourcentage d'amélioration par rapport à l'existant.

Seuls quelques voiles ne résistent pas aux sollicitations sismiques après renforcement.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont présentés dans les Tableaux 19 et 20 :

COMBINAISON 2.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	8,1	41,9	5,14
	min	8,1	41,9	5,16
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	5,3	43,8	8,20
	min	5,3	43,8	8,31
DEUXIEME - PREMIER	MAX	3,5	43,8	12,65
	min	3,4	43,8	12,87
PREMIER - RDC	MAX	1,6	43,8	27,51
	min	1,5	43,8	28,40
RDC - SS	MAX	0,3	43,8	130,68
	min	0,4	43,8	122,02

Tableau 19. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5).

COMBINAISON 2.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	9,3	41,9	4,48
	min	9,3	41,9	4,50
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	6,5	43,8	6,75
	min	6,4	43,8	6,83
DEUXIEME - PREMIER	MAX	4,2	43,8	10,38
	min	4,1	43,8	10,57
PREMIER - RDC	MAX	2,0	43,8	21,86
	min	1,9	43,8	22,54
RDC - SS	MAX	0,5	43,8	92,79
	min	0,5	43,8	91,40

Tableau 20. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6).

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

Renforcement complémentaire

Après le renforcement par rajout de voiles, les éléments défaillants de la structure ne sont plus que 19 voiles. Nous calculons pour chacun d'entre eux le renforcement en fibres de carbone nécessaire. Pour le dimensionnement de ce renforcement nous avons suivi l'ATE 3/07-540 du TFC®.

Tous les éléments défaillants peuvent être renforcés par fibres de carbone. La quantité totale de bandes nécessaire est de :

- 273m de bandes 300mm : 6 rouleaux de 50m
- 215m de bandes 150mm : 5 rouleaux de 50m

Le détail de ce renforcement est présenté dans l'Annexe 5.

6.1.3 Conclusion

Avec le rajout de voiles et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Le renforcement complémentaire après le rajout de voiles n'est pas très volumineux, ce qui justifie la performance du renforcement principal.

La localisation des nouveaux voiles a été choisie en sorte de ne pas perturber l'utilisation du bâtiment et ne présente pas un fort impact pour son apparence extérieure. Il s'agit d'un renforcement classique, d'une mise en œuvre simple, dont l'intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 8 de ce rapport.

Des exemples de renforcements de bâtiments existants par rajout de voiles sont présentés dans l'Annexe 12.

6.2 Croix de St André

6.2.1 Description

Pour choisir l'emplacement des croix de contreventement, nous avons cherché à rendre la structure plus régulière en plan tout en tâchant de ne pas nuire à la qualité d'utilisation du bâtiment.

Les croix de contreventement sont continues sur toute la hauteur du bâtiment et ne reprennent pas de poids propre de la structure mais seulement les charges variables et sismiques. Les colonnes de contreventement sont placées en façade et de préférence entre deux poteaux en béton armé existants.

Au total treize colonnes de contreventement, huit selon X et trois selon Y ont été rajoutés sur la toute la hauteur du bâtiment. Plusieurs essais ont été réalisés ; la solution choisie est celle qui minimise le nombre de colonnes de contreventement pour un meilleur comportement des voiles existants.

Les Figures 21 à 25 décrivent la géométrie de ce renforcement :

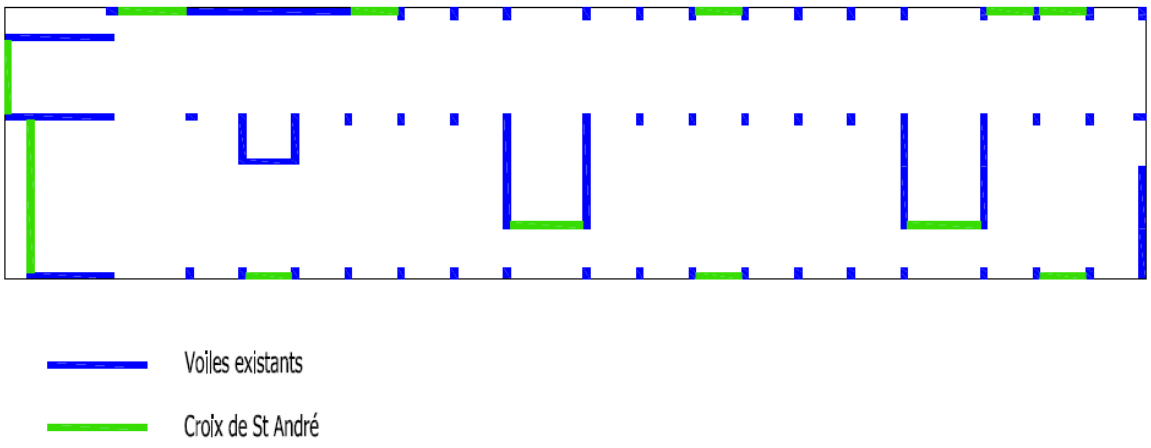


Figure 21. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante.

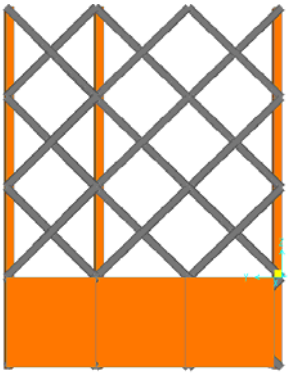


Figure 22. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0).

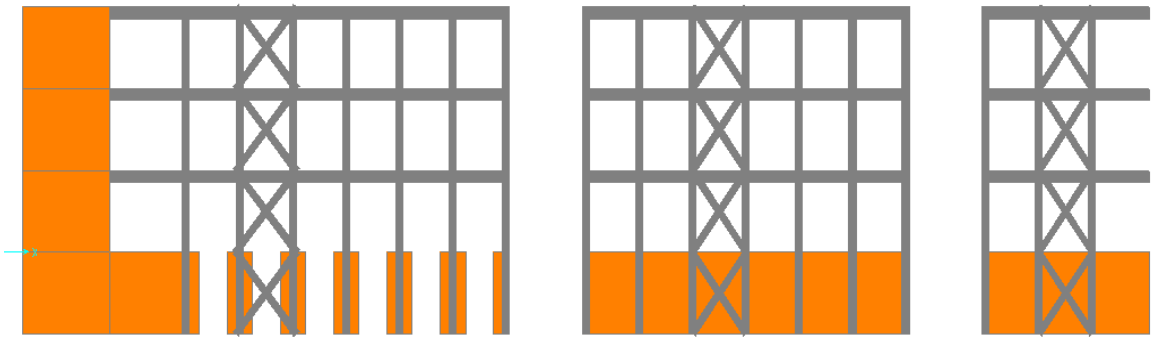


Figure 23. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0).

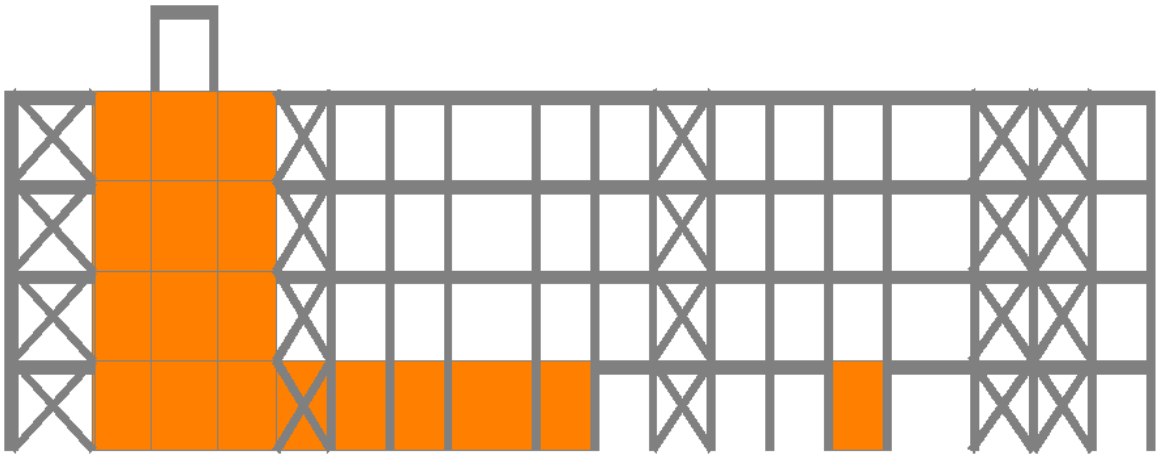


Figure 24. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8).

Les profilés métalliques que l'on a choisis pour former les croix de St. André, sont des tubes creux métalliques. Ils doivent avoir une inertie suffisante pour reprendre l'effort nécessaire au soulagement des voiles et au raidissement des parties les plus souples de la structure.

Pour cela nous adoptons des profilés standardisés de 323,9mm de diamètre et 12,5mm d'épaisseur.

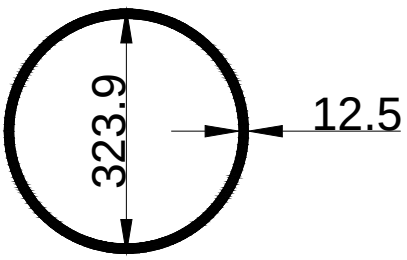


Figure 25. Section des croix de St André.

6.2.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Diminution de la torsion en plan du bâtiment.
- Elimination du point dur situé dans la partie gauche du bâtiment.
- Soulagement des voiles sous charges sismiques.

Le bâtiment existant sous zone faiblement sismique présente un pourcentage d'éléments défaillants de 13%. Pour qu'une intervention de renforcement autre que le renforcement classique des éléments défaillants soit considérée intéressante, elle doit réduire ce pourcentage à un pourcentage inférieur à 5%. Ces 5% d'éléments défaillants après renforcement seront renforcés par des moyens classiques avec des interventions locales.

L'objectif du renforcement par rajout de croix de St André est de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants à **5%.**

Analyse modale

L'analyse modale effectuée est de 200 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers modes est de 90% dans la direction longitudinale et 95% dans la direction. Le Tableau 21 présente les modes prépondérants dans les directions horizontales :

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
1	0,208 s	1%	63%
2	0,180 s	57%	1%
3	0,167 s	5%	2%

Tableau 21. Modes propres principaux.

Les Figures 26, 27 et 28 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

Figure 26. Déformée pour le Mode 1

Figure 27. Déformée pour le Mode 2

Figure 28. Déformée pour le Mode 3

Dans les deux premiers modes, ceux qui rassemblent la plus grande partie de la masse modale, nous avons fortement diminué la torsion en plan du bâtiment.

Sollicitations sismiques

La structure est à présent plus rigide. Cependant, nous nous trouvons toujours sur le plateau des accélérations, comme on peut le voir dans les Figures 29 et 30.

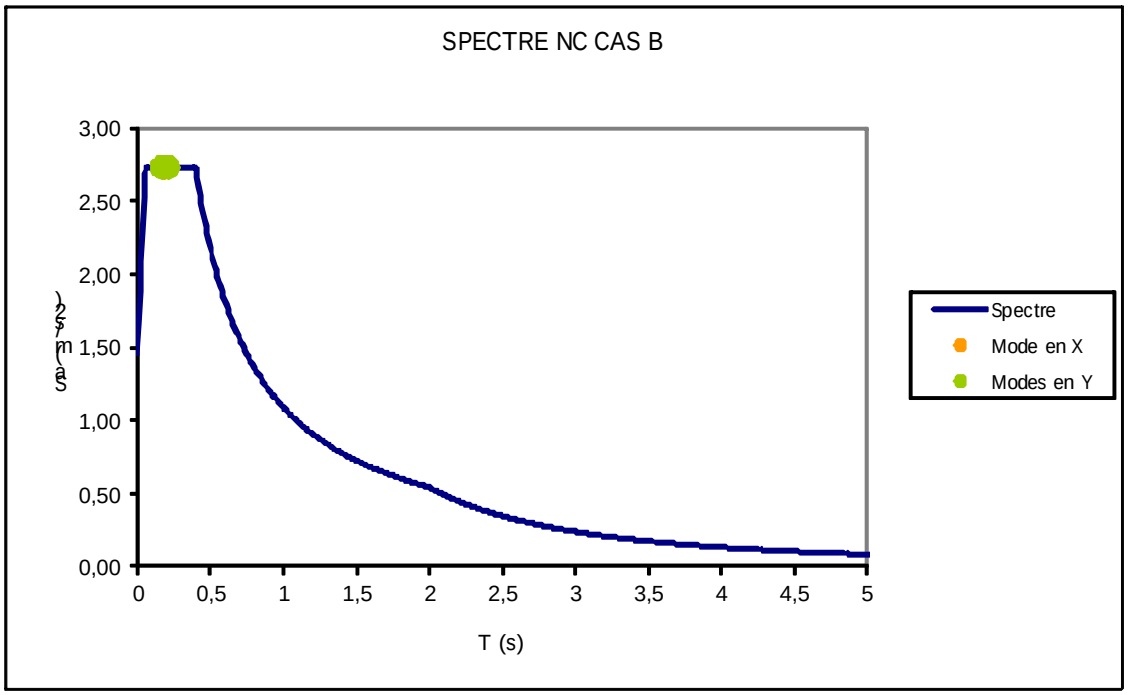


Figure 29. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

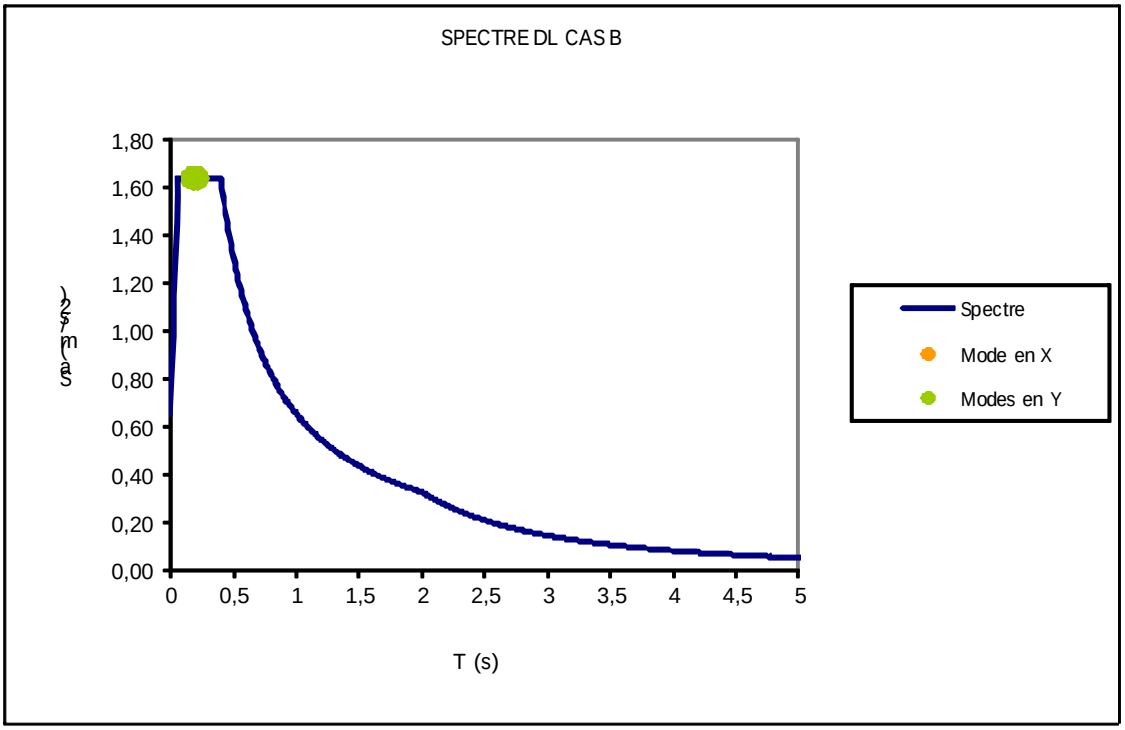


Figure 30. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

Résistance des éléments

Nous présentons dans l'Annexe 6, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Le Tableau 22 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure

:

Nombre d'éléments défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
EXISTANT	NC	1	26	30	**56**
	DL	0	2	5	**6**
	TOTAL	**2**	**35**	**43**	**80**
	%TOTAL	**1%**	**10%**	**44%**	**13%**
CROIX	NC	0	5	14	**19**
	DL	0	1	1	**2**
	TOTAL	**0**	**5**	**26**	**31**
	%TOTAL	**0%**	**1%**	**27%**	**5%**

Tableau 22. Pourcentage des éléments défaillants.

Le pourcentage global total d'éléments ne vérifiant pas les critères des états limites considérés est de 5%. Pour la structure existante, ce même pourcentage était de 13%. Le détail des améliorations par type d'élément est présenté dans le Tableau 23 :

AMELIORATION	POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
NC	1%	6%	30%	**8%**
DL	0%	0%	5%	**1%**
TOTAL	**1%**	**8%**	**17%**	**8%**

Tableau 23. Pourcentage d'améliorations par rapport au bâtiment existant.

On a bien atteint l'objectif de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants au-dessous de la limite de 5%.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont présentés dans les Tableaux 24 et 25 :

COMBINAISON 2.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	17,3	41,9	2,43
	min	16,8	41,9	2,49
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	11,5	43,8	3,80
	min	11,2	43,8	3,91
DEUXIEME - PREMIER	MAX	7,3	43,8	5,97
	min	7,1	43,8	6,18
PREMIER - RDC	MAX	3,0	43,8	14,61
	min	2,8	43,8	15,60
RDC - SS	MAX	0,6	43,8	72,32
	min	0,7	43,8	60,01

Tableau 24. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.5).

COMBINAISON 2.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	9,8	41,9	4,27
	min	9,7	41,9	4,30
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	6,8	43,8	6,41
	min	6,8	43,8	6,48
DEUXIEME - PREMIER	MAX	4,4	43,8	9,90
	min	4,3	43,8	10,06
PREMIER - RDC	MAX	2,1	43,8	21,32
	min	2,0	43,8	21,96
RDC - SS	MAX	0,5	43,8	94,68
	min	0,5	43,8	93,39

Tableau 25. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 2.6).

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

Renforcement complémentaire

Après le renforcement par rajout de voiles, les éléments défaillants de la structure ne sont plus que 5 poutres et 19 voiles. Nous calculons pour chacun d'entre eux le renforcement en fibres de carbone nécessaire. Pour le dimensionnement de ce renforcement nous avons suivi l'ATE 3/07-540 du TFC®.

Tous les éléments défaillants peuvent être renforcés par fibres de carbone. La quantité totale de bandes nécessaire est de :

- 221m de bandes 300mm : 5 rouleaux de 50m
- 227m de bandes 150mm : 5 rouleaux de 50m

Le détail de ce renforcement est présenté dans l'Annexe 6.

6.2.3 Conclusion

Avec le rajout de croix de St André et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Le renforcement complémentaire après l'installation des croix de St André n'est pas très volumineux, ce qui justifie la performance du renforcement principal.

La localisation des croix a été choisie en sorte de ne pas perturber l'utilisation du bâtiment, mais elle représente un fort impact pour son apparence extérieure : le choix de tubes métalliques vise à une meilleure intégration architecturale du renforcement dans l'existant. Il s'agit d'un renforcement classique, d'une mise en œuvre simple, dont l'intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 8 de ce rapport.

6.3 Bandes de fibres de carbone

6.3.1 Description

On décide de renforcer tous les éléments défaillants directement par un renforcement en fibres de carbone. Il s'agit du renforcement des poutres et des voiles aussi bien à la flexion comme à l'effort tranchant.

Renfort des poutres

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois latérales de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Renfort des voiles

Le renforcement à l'effort tranchant se compose de bandes verticales et horizontales. Les bandes verticales sont nécessaires lorsque les aciers verticaux existants ne sont pas suffisants pour reprendre la traction dans le modèle bielles-tirants que génère la sollicitation de cisaillement. Les bandes horizontales sont nécessaires lorsque la hauteur du voile ne permet pas l'arrivée de la bielle de compression jusqu'à l'appui et les aciers horizontaux existants ne peuvent pas remonter cet effort.

Le renfort à la flexion se fait à l'aide de bandes verticales. Lorsque la défaillance est causée par la flexion dans le plan du voile, les bandes sont placées aux extrémités de celui-ci. Si par contre la flexion principale est la flexion hors plan, les bandes sont placées tout le long de la longueur du voile.

6.3.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Diminution de la torsion en plan du bâtiment.
- Elimination du point dur situé dans la partie gauche du bâtiment.
- Soulagement des voiles sous charges sismiques.

Le bâtiment existant sous zone faiblement sismique présente un pourcentage d'éléments défaillants de 13%. Pour qu'une intervention soit considérée intéressante, elle doit réduire ce pourcentage à un pourcentage inférieur à 5%. Ces 5% d'éléments défaillants après renforcement seront renforcés par un renforcement complémentaire.

L'objectif du renforcement par fibres de carbone est de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants à **5%.**

Analyse modale

On considère que le renforcement par bandes de carbone ne modifie pas le comportement modal de la structure.

Sollicitations sismiques

On considère qu'elles sont celles du bâtiment existant.

Résistance des éléments

Le Tableau 26 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure :

Nombre d'éléments défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	TOTAL (n=632)
EXISTANT	TOTAL	2	35	43	**80**
	%TOTAL	1%	10%	44%	**13%**
TFC®	TOTAL	0	0	4	**4**
	%TOTAL	0%	0%	4%	**1%**

Tableau 26. Pourcentage d'éléments défaillants.

Le pourcentage global total d'éléments ne vérifiant pas les critères des états limites considérés est de 1%. Pour la structure existante, ce même pourcentage était de 13%.

On a bien atteint l'objectif de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants au-dessous de la limite de 5%.

Déplacements inter-étage

On considère qu'ils sont ceux du bâtiment existant

Renforcement complémentaire

Le renforcement complémentaire sera l'agrandissement des sections des éléments qui ne peuvent être renforcés par fibres de carbone.

6.3.3 Conclusion

Avec le renforcement par bandes de fibres de carbone et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Le renforcement complémentaire n'est pas très volumineux, ce qui justifie la performance du renforcement principal.

Le renforcement par fibres de carbone ne représente pas d'impact pour son utilisation ou son apparence extérieure. Il s'agit d'un renforcement classique, d'une mise en œuvre simple, dont l'intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 8 de ce rapport.

Des exemples de renforcements de bâtiments existants par bandes de fibres de carbone sont présentés dans l'Annexe 12.

7 Perturbations et coût - Zone de faible sismicité

7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'évaluation qualitative des perturbations et du coût des différents renforcements étudiés.

On décrit dans un premier temps les perturbations et les coûts qu'entraîne le renforcement puis on en donne une appréciation qualitative pour pouvoir comparer d'une façon générale les différentes solutions de renforcement.

La comparaison des différents renforcements est présentée à la fin du chapitre.

7.2 Rajout de voiles

7.2.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

Les voiles rajoutés sont situés dans la périphérie du bâtiment. La perturbation interne ne doit pas être trop importante. Les travaux peuvent être effectués principalement depuis l'extérieur du bâtiment avec un encombrement interne minimum. Cependant, comme ils sont continus sur toute la hauteur, tous les étages seront perturbés.

Les nuisances sonores seront cependant constantes pendant la durée des travaux.

Durée des travaux

La durée des travaux est plus importante que pour les autres renforcements puisqu'il y a un volume de matériel plus important à mettre en place.

Perturbations après les travaux

La localisation des voiles rajoutés a été choisie de façon à ne pas perturber l'utilisation du bâtiment : ils ferment des cages d'escaliers ou bien ne couvrent qu'une partie réduite des couloirs ou d'une façade avec des salles de cours. L'impact du renforcement après finalement des travaux n'est donc pas significatif et se réduit uniquement à l'impact architectural.

7.2.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Il n'y a pas de rajout d'équipements pour ce renforcement.

Volume de Matériaux

On construit cinq nouveaux voiles continus sur toute la hauteur de longueurs 8,35m, 3,75m (x2), 3,3m et 3,75m). Le volume de béton à mettre en place est de 96m3.

Difficulté des travaux

Il s'agit de travaux classiques qui ne présentent pas de difficulté particulière.

Renforcement Complémentaire

Les renforcements complémentaires sont à effectuer sur 3% des éléments de la structure. Un renforcement complémentaire en TFC permet de réduire complètement le pourcentage d'éléments défaillants, et ceci avec un volume peu important de TFC (6 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 5 rouleaux de bandes de 150mm).

Le renforcement complémentaire est donc peu important.

7.2.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 27 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	**
Durée des travaux	**
Perturbations après les travaux	*
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	-
Volume de matériaux	***
Difficulté des travaux	*
Renforcement complémentaire	*

Tableau 27. Récapitulatif des coûts et perturbations.

7.3 Croix de St André

7.3.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

L'intervention pour la mise en place des croix de St André a lieu principalement depuis l'extérieur, ce qui permet des meilleures conditions d'utilisation du bâtiment pendant les travaux.

Les nuisances sonores concernent tout le bâtiment.

Durée des travaux

La durée des travaux est peu importante pour cette solution de renforcement puisque les croix sont préfabriquées et ce n'est que leur installation et ancrage qui doit s'effectuer sur place.

Perturbations après les travaux

Une fois les travaux finis, le renforcement n'a plus aucun impact sur l'utilisation du bâtiment puisque les croix sont placées en façade dans des endroits autres que ceux d'entrée du bâtiment. Le seul impact est l'impact visuel, puisque l'aspect extérieur du bâtiment est modifié par le rajout de nouveaux éléments en façade.

7.3.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Le contreventement mis en place comporte l'installation de 104 tubes métalliques de longueur variant de 4,12 à 5,02m. La section de ces éléments est de 122cm2. Cette section est assez importante puisque nous recherchons une forte inertie de ces croix afin de décharger les voiles existants.

Volume de Matériaux

Le volume de matériaux nécessaire pour l'ancrage des croix n'est pas très important. Il s'agit du renforcement au niveau des nœuds d'ancrage.

Difficulté des travaux

L'installation de croix de St André est une intervention assez classique et, étant situées uniquement en façade, l'accès et l'espace de travail ne présente pas de difficulté particulière.

Renforcement Complémentaire

Les renforcements complémentaires à effectuer portent sur 5% des éléments de la structure, principalement des voiles. C'est le renforcement complémentaire le plus important des trois solutions proposées.

L'étude sur le renforcement complémentaire en TFC montre qu'il es possible de réduire complètement le pourcentage d'éléments défaillants avec un volume peu important de TFC (5 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 5 rouleaux de bandes de 150mm).

7.3.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 28 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	**
Durée des travaux	*
Perturbations après les travaux	*
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	***
Volume de matériaux	*
Difficulté des travaux	*
Renforcement complémentaire	*

Tableau 28. Récapitulatif des coûts et perturbations.

7.4 Bandes de fibres de carbone

7.4.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

La mise en place du renforcement TFC se fait de façon peu intrusive sur l'utilisation du bâtiment puisque la pose est assez rapide et avec de faibles nuisances sonores.

Durée des travaux

La durée des travaux est peu importante.

Perturbations après les travaux

Il n'y a pas d'impact sur le bâtiment ou son utilisation après renforcement.

7.4.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Il n'y a pas de rajout d'équipements pour ce renforcement.

Volume de Matériaux

Le volume de matériaux nécessaire est de 16 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 8 rouleaux de bandes de 150mm. Il est plus élevé que pour le renforcement complémentaire des autres solutions mais reste assez réduit.

Difficulté des travaux

L'installation du renforcement TFC ne présente pas de difficulté particulière.

Renforcement Complémentaire

Il y a un renforcement complémentaire à effectuer sur 1% des éléments, uniquement des voiles dont il faudra augmenter la section.

7.4.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 29 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	*
Durée des travaux	*
Perturbations après les travaux	-
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	-
Volume de matériaux	**
Difficulté des travaux	*
Renforcement complémentaire	*

Tableau 29. Récapitulatif des coûts et perturbations.

7.5 Comparaison des renforcements

Le Tableau 30 présente le récapitulatif de l'évaluation qualitative des coûts et perturbations des trois solutions étudiées :

	RAJOUT VOILES	CROIX DE ST ANDRE	FIBRES DE CARBONE
PERTURBATIONS			
Réduction de l'utilisation du bâtiment	**	**	*
Durée des travaux	**	*	*
Perturbations après les travaux	*	*	-
COUT			
Volume Equipements	-	***	-
Volume de matériel	***	*	**
Difficulté des travaux	*	*	*
Renforcement complémentaire	*	*	*

Tableau 30. Comparaison des coûts et perturbations.

La Figure 31 situe les trois solutions dans le graphique de classification des interventions par rapport à leurs coûts et perturbations :

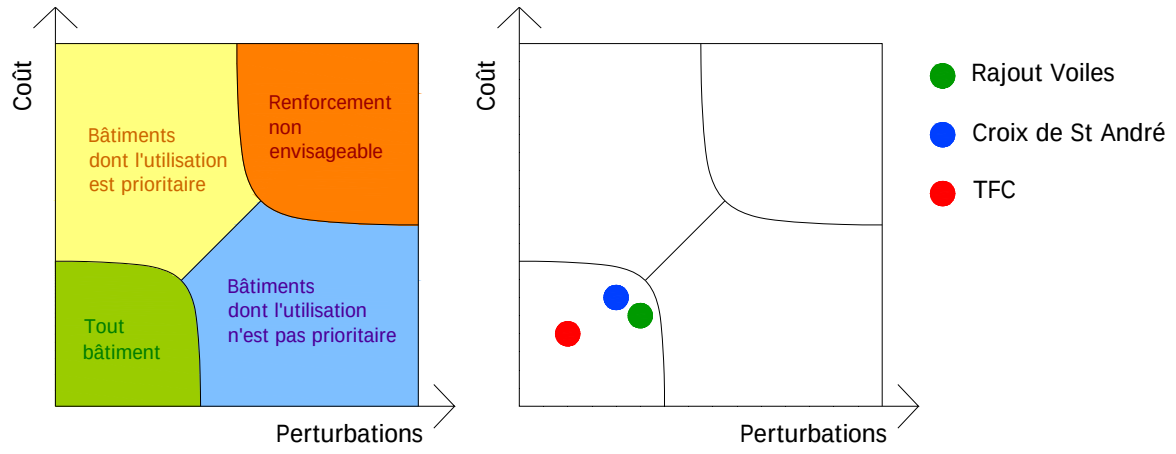


Figure 31. Comparaison des renforcements.

8 Batiment existant - Zone de forte sismicité

8.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les charges sismiques qui s'appliquent sur le bâtiment existant dans une zone de forte sismicité (zone 5) tout comme l'étude de son comportement structurel pour en déduire les points faibles que les différents renforcements devront compenser.

8.2 Actions sismiques

Pour notre projet et pour une zone de forte sismicité, les caractéristiques du spectre de référence recommandé par l'Eurocode 1 sont présentées dans le Tabeau 31 :

Caractérisitque	Symbole	Valeur	Unité
Coefficient d'importance du bâtiment	γ_I	1,2	-
Coefficient de comportement de la structure	q	1,5	-
Accélération maximale du sol	a_{gr}	3	m/s^2
Type de spectre	-	type 1	-
Paramètre de sol	S	1,15	-
Période	T_B	0,2	s
Période	T_C	0,6	s
Période	T_D	2	s

Tableau 31. Caractérisation de l'action sismique.

Le détail des formules de définition du spectre de réponse de type 1 de l'Eurocode se trouve dans le paragraphe § 3.2.2.5 de la partie 1 de l'Eurocode 8. Avec l'application des valeurs de notre projet, le spectre de référence obtenu est celui de la Figure 32 :

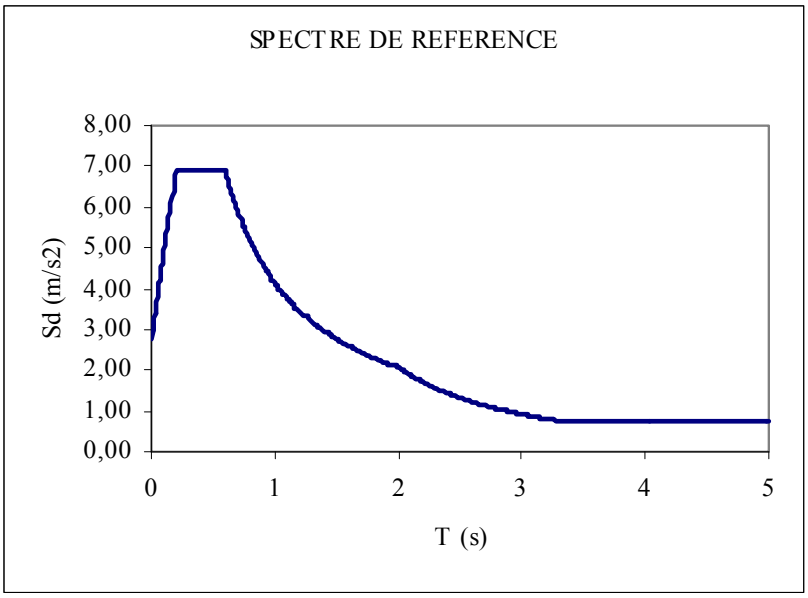


Figure 32. Spectre de référence.

Les spectres pour les états limites que nous allons vérifier sont ceux de la Figure 33 :

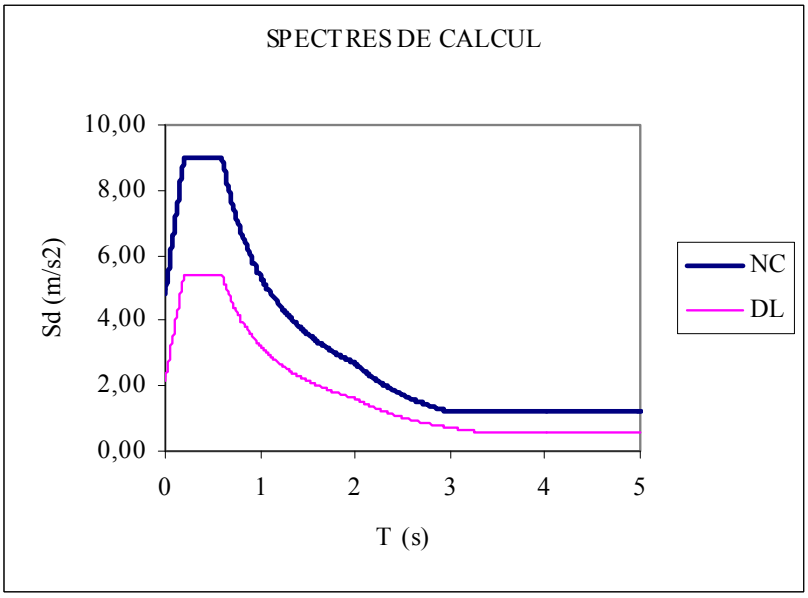


Figure 33. Spectres de calcul pour les états limites NC et DL.

Comme il a été souligné dans les hypothèses du projet, les vérifications pour l'état limite de dommages significatifs sont moins contraignantes que celles des autres états limites et nous ne l'étudions pas.

8.3 Comportement structurel

8.3.1 Introduction

Nous présentons l'analyse modale de la structure, les vérifications des poteaux, poutres et voiles exigées par l'Eurocode 8.3 (hors nœuds) tout comme la vérification des déplacements inter-étage.

8.3.2 Analyse Modale

L'analyse modale est la même que pour le bâtiment existant en zone 5.

8.3.3 Sollicitations sismiques

En introduisant les périodes propres de la structure dans les spectres de calcul, nous nous trouvons dans le plateau des accélérations, comme on peut le voir dans les Figures 34 et 35.

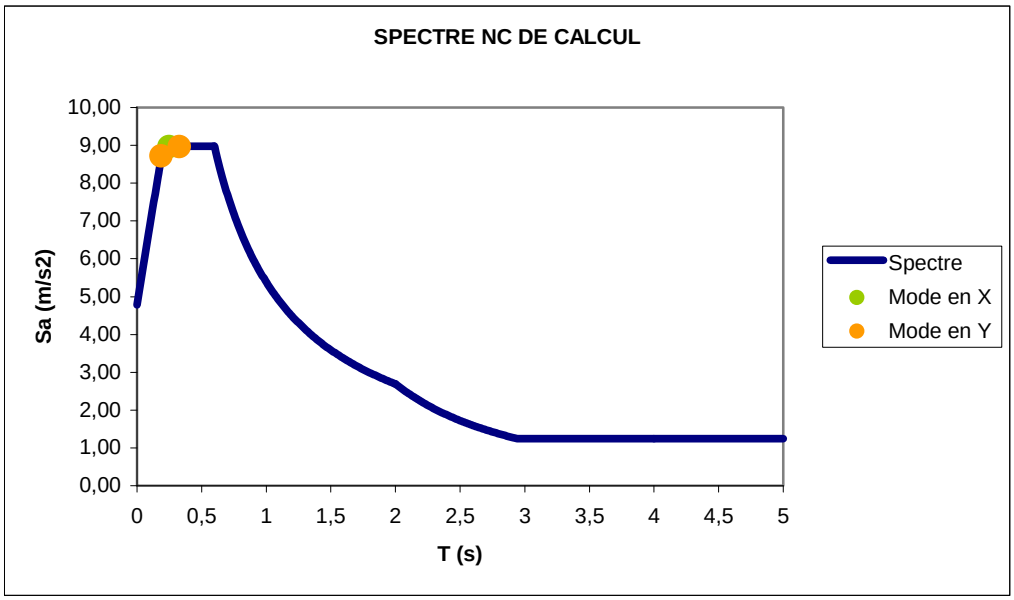


Figure 34. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

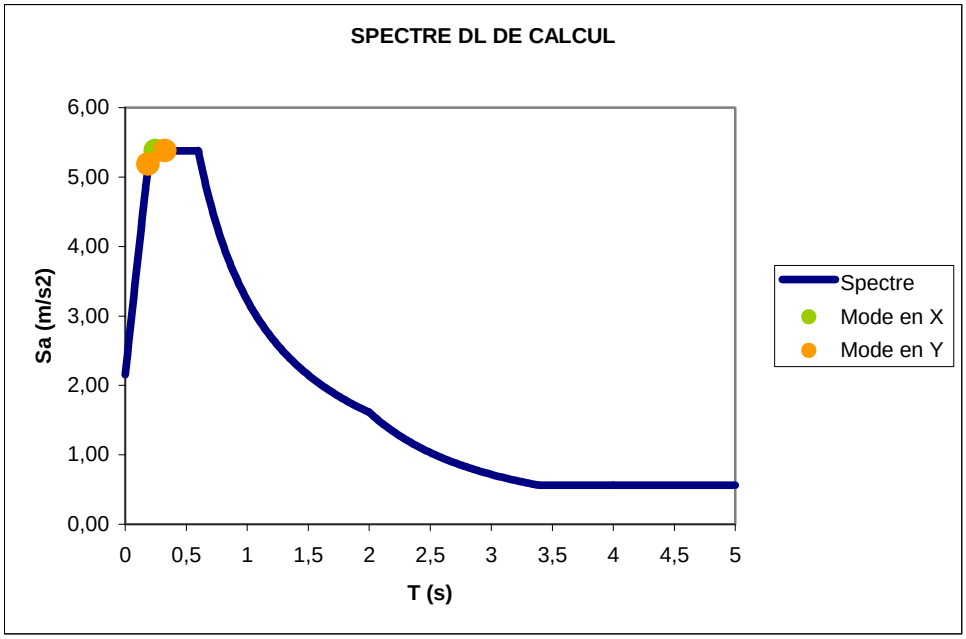


Figure 35. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

8.3.4 Vérifications

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 1.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 1.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Les vérifications des sections tout comme les caractéristiques des matériaux considérées pour les deux états limites sont décrites dans le Tableau 32 :

	Non Effondrement	Limitation de Dommages
Combinaisons	1.3 1.4	1.5 1.6
Vérifications	Flexion et Cisaillement	Flexion
Résistance des matériaux	f_{cd} f_{yd}	0,6 f_{cd} 0,8 f_{yd}.
Coefficients partiels des matérieaux	γ_c=1,2 γ_s=1,0	γ_c=1,0 γ_s=1,0

Tableau 32. Récapitulatif pour la vérification des éléments.

Pour l'état limite de Non-Effondrement, seulement sont vérifiés au cisaillement les éléments qui résistent à la flexion. Les éléments qui ne résistent pas à la flexion ne sont plus vérifiés à l'effort tranchant et donc ne sont pas comptabilisés dans les éléments défaillants face au cisaillement.

Nous présentons dans l'Annexe 8, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Résistance des éléments

Le Tableau 33 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure :

	POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
NC	42	203	81	**326**
DL	17	115	47	**179**
TOTAL	**48**	**223**	**86**	**357**
% TOTAL	**27%**	**63%**	**87%**	**56%**

Tableau 33. Pourcentage d'éléments défaillants.

Le pourcentage global total d'éléments ne vérifiant pas les critères des états limites considérés est de 56%. La structure nécessite donc une forte intervention pour la rendre conforme aux exigences sismiques.

Les éléments avec un pourcentage de défaillance plus important sont les voiles, seuls éléments de contreventement de la structure.

D’une façon générale, les éléments placés dans la partie gauche du bâtiment, partie plus rigide, sont plus sollicités. La torsion globale du bâtiment entraîne une concentration des efforts dans la partie gauche du bâtiment.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont les suivants :

ds : déplacement inter-étage

dslim : déplacement inter-étage limite

FS=dslim/ds Facteur de sécurité en déplacements

Les déplacements extrêmes des différents étages sont présentés dans les Tableaux 34 et 35 :

COMBINAISON 1.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	56,0	41,9	0,75
	min	55,6	41,9	0,75
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	37,4	43,8	1,17
	min	37,1	43,8	1,18
DEUXIEME - PREMIER	MAX	23,7	43,8	1,85
	min	23,5	43,8	1,86
PREMIER - RDC	MAX	9,5	43,8	4,60
	min	9,3	43,8	4,69
RDC - SS	MAX	1,4	43,8	32,03
	min	1,6	43,8	28,19

Tableau 34. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5).

COMBINAISON 1.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	63,2	41,9	0,66
	min	62,6	41,9	0,67
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	40,2	43,8	1,09
	min	39,8	43,8	1,10
DEUXIEME - PREMIER	MAX	25,3	43,8	1,73
	min	24,9	43,8	1,75
PREMIER - RDC	MAX	10,5	43,8	4,19
	min	10,2	43,8	4,30
RDC - SS	MAX	1,8	43,8	24,61
	min	1,9	43,8	23,59

Tableau 35. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6).

Les déplacements inter-étage sont acceptables mis à part le déplacement relatif entre le quatrième et le troisième étage, c'est à dire l'accès à la terrasse supérieure.

8.4 Conclusion

Les vérifications de la structure existante montrent que la structure n'a pas un comportement acceptable face à la sollicitation sismique : les déplacements inter-étage ne sont pas problématiques, sauf pour l'accès à la terrasse supérieure, mais la résistance de 56% des éléments est dépassée.

Le renforcement de la structure doit être très important. Il devra viser un ou plusieurs des points suivants :

- La régularisation de la structure pour éviter la concentration des efforts dans la partie gauche.
- La diminution des sollicitations dans les éléments par isolation, dissipation ou augmentation des éléments résistants.
- Le renforcement particulier des voiles

9 Renforcements - Zone de forte sismicité

9.1 Raidisseurs en façade

9.1.1 Description

Il s'agit d'améliorer la régularité en plan de l'ouvrage pour éviter le comportement de torsion de celui-ci face au séisme tout comme de soulager les éléments verticaux qui sont fortement sous-dimensionnés pour des zones de forte sismicité.

Pour choisir l'emplacement des raidisseurs, nous avons cherché à rendre la structure plus régulière en plan tout en tâchant de ne pas nuire à la qualité d'utilisation du bâtiment. C'est pour cela que nous avons placé le contreventement uniquement en façade. L'amélioration de la performance de la structure ne sera pas aussi importante que dans le cas où l'on permet aussi l'installation des contreventements à l'intérieur du bâtiment, mais cette solution causera un impact moins important sur l'utilisation du bâtiment pendant et après les travaux.

Les raidisseurs sont continus sur toute la hauteur du bâtiment et ne reprennent pas de poids propre de la structure mais seulement les charges variables et sismiques. Deux types de raidisseurs métalliques sont installés : des raidisseurs enjambant deux étages et des raidisseurs portant sur un seul étage. Lorsque ceci est possible, on préfère installer des raidisseurs sur deux étages puisque la reprise des efforts horizontaux se fait de façon plus efficace lorsque les ceux-ci sont plus inclinés et parce que de cette façon on minimise le nombre d'ancrages.

Au total nous avons dix colonnes de contreventement avec des croix sur deux étages et onze avec des croix sur un étage. Les colonnes sont toujours continues sur toute la hauteur du bâtiment.

Les Figures 36 à 41 décrivent la géométrie de la solution de renforcement.

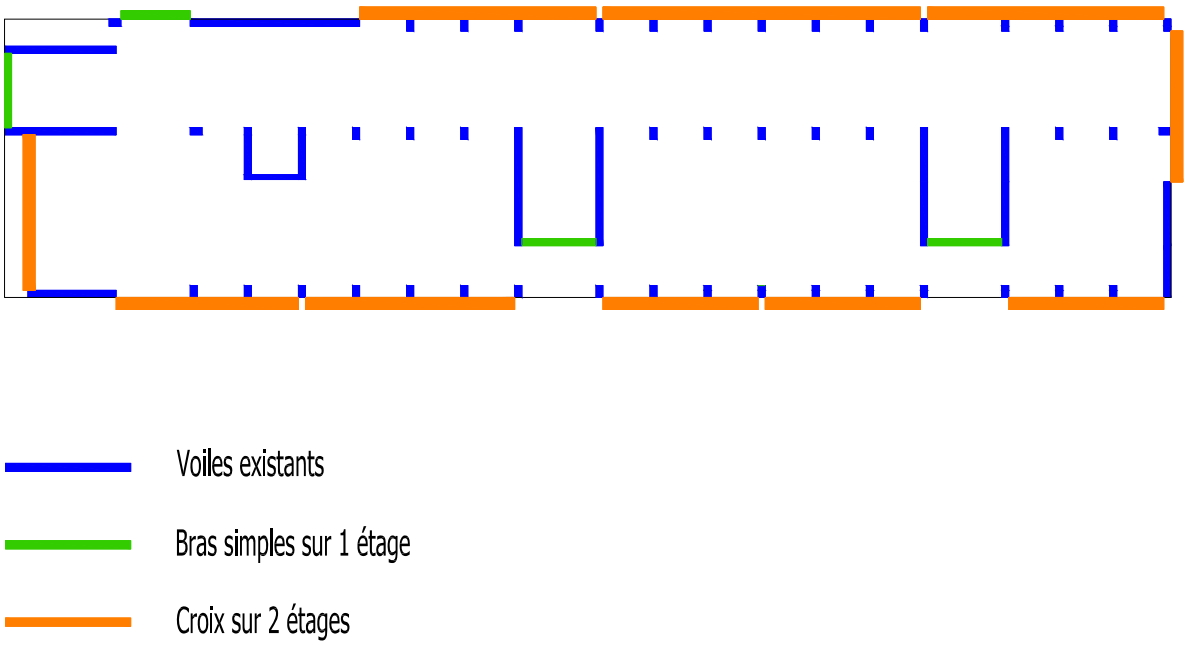


Figure 36. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante.

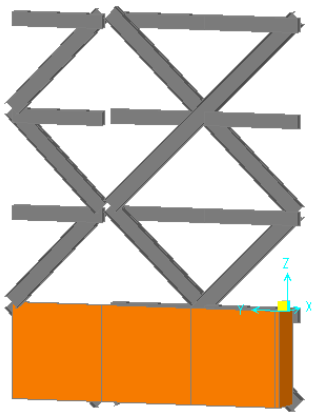


Figure 37. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0).

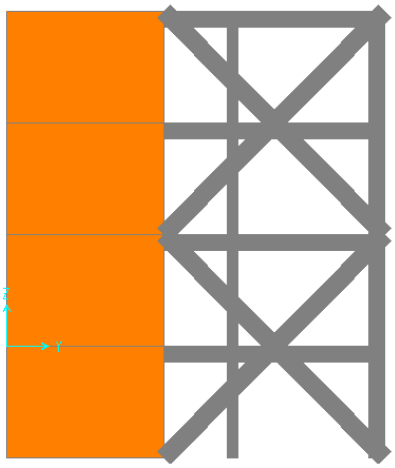


Figure 38. Vue en élévation des voiles dans le pignon est (X=49,6).

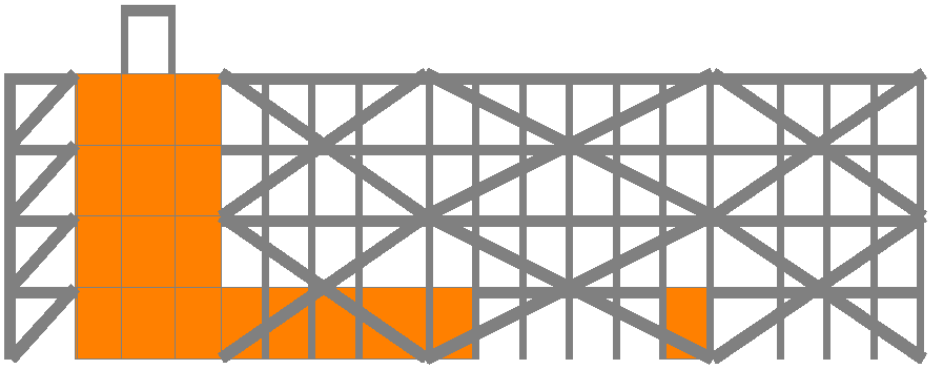


Figure 39. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0).

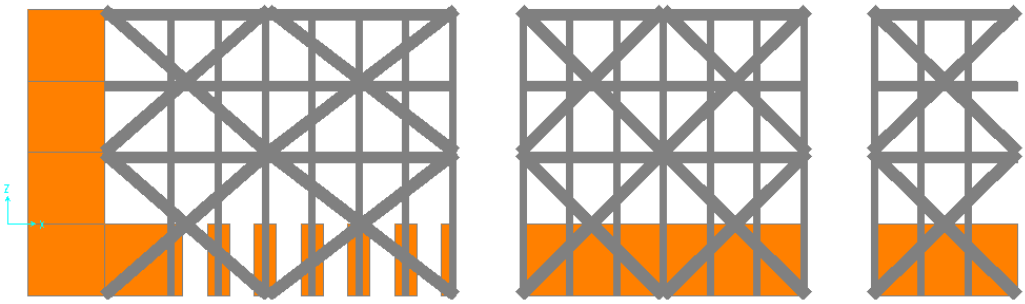


Figure 40. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8).

Les profilés métalliques que l'on a choisis pour les raidisseurs sont des sections à larges ailes HD400x1086, avec une hauteur totale de 569mm et une largeur de semelle de 454mm. Ces sections ont été choisies pour leur forte inertie, de façon à reprendre l'effort nécessaire au

soulagement des voiles et au raidissement des parties les plus souples de la structure. Il s'agit des mêmes sections pour tous les raidisseurs.

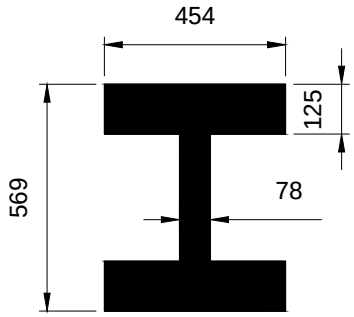


Figure 41. Section des raidisseurs (mm).

9.1.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Diminuer les effets de la torsion du bâtiment.
- Elimination du point dur situé dans la partie gauche du bâtiment.
- Soulagement des voiles sous charges sismiques.

Le bâtiment existant sous zone faiblement sismique présente un pourcentage d'éléments défaillants de 56%. Le rajout de raidisseurs dans les façades du bâtiment est une intervention qui reste extérieure mais qui est lourde en apport de matériel et en travaux. Pour qu'elle soit jugée intéressante, le pourcentage d'éléments défaillants après installation du contreventement ne doit pas être supérieur à 25%. Ces 25% d'éléments défaillants après renforcement seront renforcés par des moyens classiques avec des interventions locales.

L'objectif du renforcement par rajout de raidisseurs en façade est de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants à **25%.**

Analyse modale

L'analyse modale effectuée est de 350 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers modes est de 91% dans la direction longitudinale et 96% dans la direction transversale. Le tableau 36 présente les modes prépondérants dans les directions horizontales :

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
1	0,1962 s	0%	60%
17	0,1099 s	5%	0%
28	0,0901 s	47%	0%

Tableau 36. Modes propres principaux.

Les Figures 42, 43 et 44 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

Figure 42. Déformée pour le Mode 1

Figure 43. Déformée pour le Mode 17

Figure 44. Déformée pour le Mode 28

Le bâtiment ne présente pas de torsion dans ses modes propres principaux.

Sollicitations sismiques

La structure est à présent plus rigide. Les modes propres principaux ne se situent plus sur le plateau des accélérations mais sur la pente ascendante. Les accélérations qui s'appliquent sur le bâtiment diminuent, comme on peut le voir dans les Figures 45 et 46.

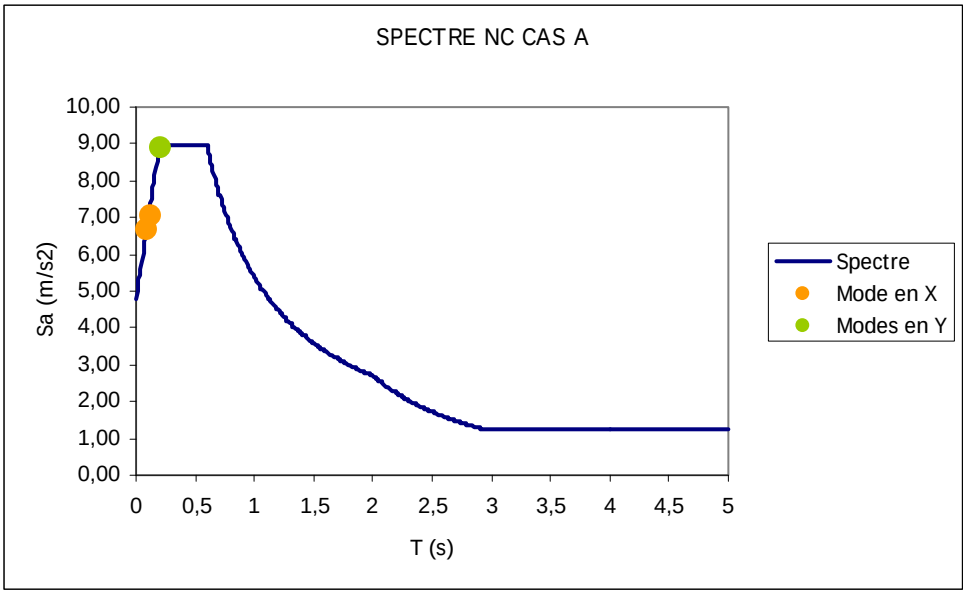


Figure 45. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

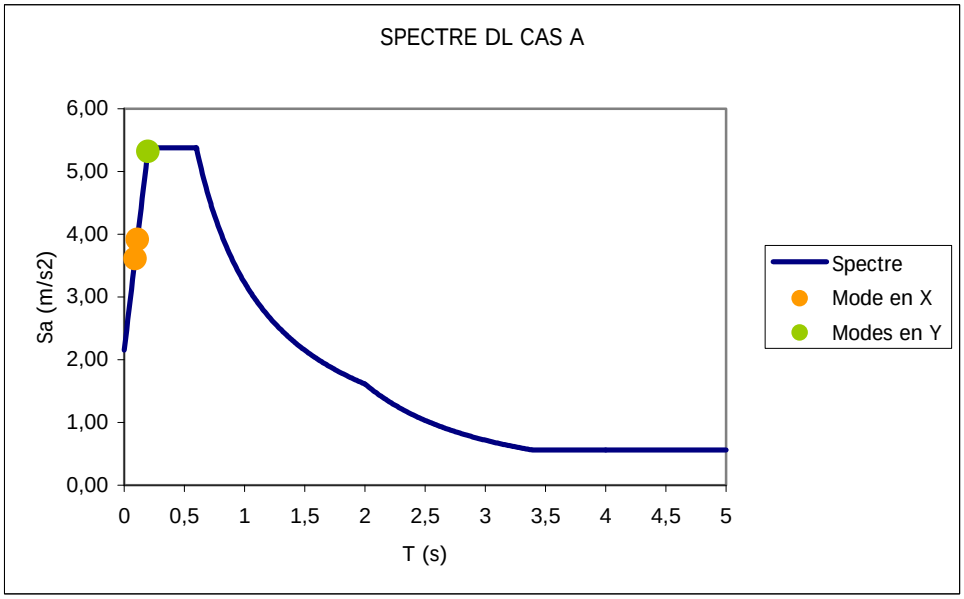


Figure 46. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

Résistance des éléments

Nous présentons dans l'Annexe 9, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Le pourcentage des éléments défaillants sont présentés dans le Tableau 37 :

Nombre d'élément défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
EXISTANT	NC	42	199	78	**318**
	DL	17	115	47	**179**
	Global	**48**	**223**	**85**	**356**
	%TOTAL	**27%**	**63%**	**87%**	**56%**
RAIDISSEURS EXTERNES	NC	12	84	41	**137**
	DL	3	44	12	**59**
	Global	**18**	**126**	**58**	**202**
	%TOTAL	**10%**	**35%**	**59%**	**32%**

Tableau 37. Pourcentage des éléments défaillants.

On peut tirer les conclusions suivantes :

Nous sommes au-dessus de la limite de 25% que l'on s'était imposée : il y a encore un pourcentage important de voiles et de poutres qui ne passent pas et nécessitent d'un important renforcement complémentaire.

L'amélioration pour les différents éléments est présentée dans le Tableau 38 :

AMELIORATION	POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
NC	17%	32%	37%	**29%**
DL	8%	20%	36%	**19%**
TOTAL	**17%**	**27%**	**28%**	**24%**

Tableau 38. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont détaillés dans les Tableaux 39 et 40 :

COMBINAISON 1.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	12,1	41,9	3,47
	min	12,0	41,9	3,50
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	6,1	43,8	7,15
	min	6,1	43,8	7,20
DEUXIEME - PREMIER	MAX	4,0	43,8	10,85
	min	4,0	43,8	11,02
PREMIER - RDC	MAX	1,9	43,8	22,65
	min	1,9	43,8	23,02
RDC - SS	MAX	0,5	43,8	90,57
	min	0,5	43,8	91,25

Tableau 39. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5).

COMBINAISON 1.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	25,2	41,9	1,66
	min	25,1	41,9	1,67
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	16,5	43,8	2,66
	min	16,4	43,8	2,67
DEUXIEME - PREMIER	MAX	10,5	43,8	4,17
	min	10,4	43,8	4,19
PREMIER - RDC	MAX	4,8	43,8	9,09
	min	4,8	43,8	9,17
RDC - SS	MAX	1,1	43,8	39,86
	min	1,1	43,8	40,21

Tableau 40. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6).

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

Renforcement complémentaire

Après le renforcement par raidisseurs en façade, les éléments défaillants de la structure sont que 18 poteaux, 126 poutres et 58 voiles. Nous calculons le renforcement en fibres de carbone nécessaire. Pour le dimensionnement de ce renforcement nous avons suivi l'ATE 3/07-540 du TFC®.

La quantité totale de bandes nécessaire est de :

- 1808m de bandes 300mm : 37 rouleaux de 50m
- 1674m de bandes 150mm : 34 rouleaux de 50m

Le détail de ce renforcement est présenté dans l'Annexe 9.

Cependant, 4 poutres, 18 voiles et 2 poteaux ne peuvent être renforcés à l'aide de bandes de fibres de carbone. Une augmentation de la section est nécessaire.

9.1.3 Conclusion

Avec le renforcement par raidisseurs en façade et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Cependant, le renforcement complémentaire est très volumineux, ce qui met en question la performance du renforcement principal.

La localisation des raidisseurs en façade ne perturbe pas l'utilisation du bâtiment, mais elle représente un fort impact pour son apparence extérieure. Il s'agit d'un renforcement classique, d'une mise en œuvre simple, dont l'intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 11 de ce rapport.

Des exemples de renforcements de bâtiments existants par raidisseurs en façade sont présentés dans l'Annexe 12.

9.2 Raidisseurs internes et externes

9.2.1 Description

Pour choisir l'emplacement des raidisseurs, nous avons cherché à rendre la structure plus régulière en plan tout en tâchant de ne pas nuire à la qualité d'utilisation du bâtiment. Cependant, nous avons jugé nécessaire, après avoir vu que l'amélioration structurelle avec des raidisseurs uniquement en façade n'était pas satisfaisante, de placer aussi des raidisseurs à l'intérieur du bâtiment.

Dans cette solution, nous plaçons donc aussi des raidisseurs dans la direction Y à l'intérieur du bâtiment. Ils sont placés dans les endroits où ils sont le moins dérangeant pour l'utilisation du bâtiment.

Les raidisseurs sont continus sur toute la hauteur du bâtiment et ne reprennent pas de poids propre de la structure mais seulement les charges variables et sismiques. Deux types de raidisseurs métalliques sont installés : des raidisseurs enjambant deux étages et des raidisseurs portant sur un seul étage. Lorsque ceci est possible, on préfère installer des raidisseurs sur deux étages puisque la reprise des efforts horizontaux se fait de façon plus efficace lorsque ceux-ci sont plus inclinés et parce que de cette façon on minimise le nombre d'ancrages.

Au total nous avons dix colonnes de contreventement avec des croix sur deux étages et onze avec des croix sur un étage. Les colonnes sont toujours continues sur toute la hauteur du bâtiment.

Les Figures 47 à 58 décrivent la géométrie de la solution de renforcement.

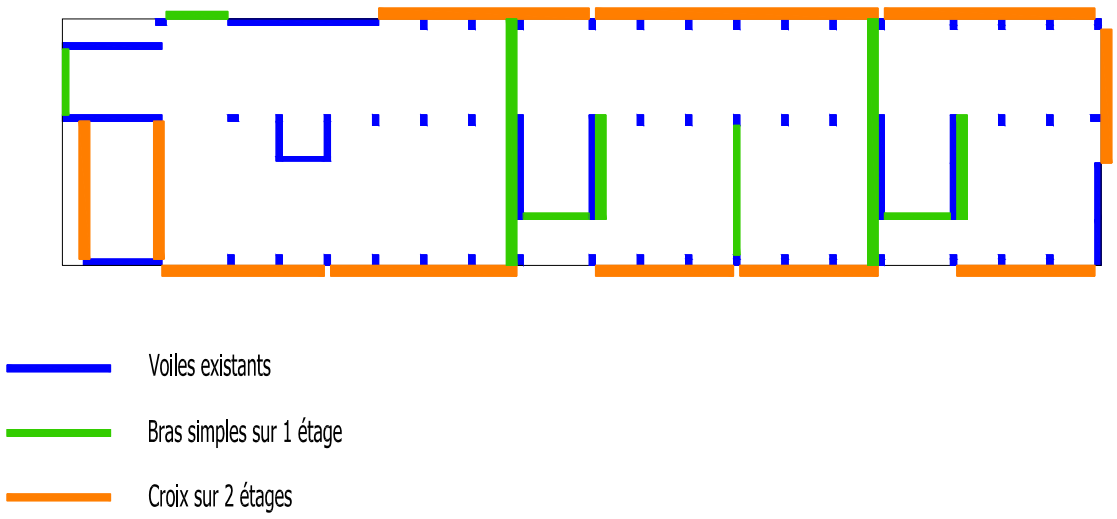


Figure 47. Vue en plan du contreventement rajouté dans la structure existante.

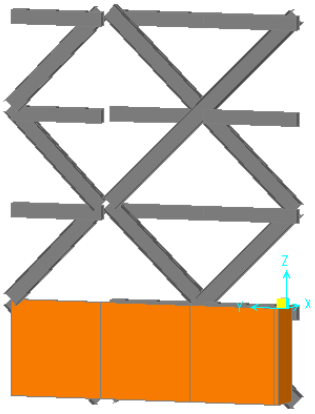


Figure 48. Vue en élévation des voiles dans le pignon ouest (X=0).

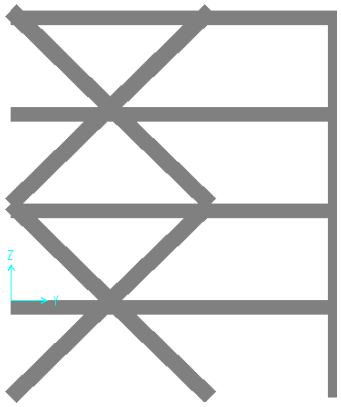


Figure 49. Coupe transversale 1 (X=4,75).

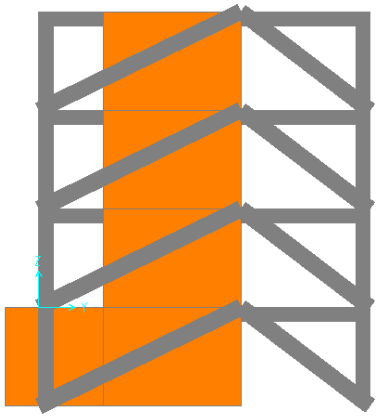


Figure 50. Coupe transversale 1 (X=22).

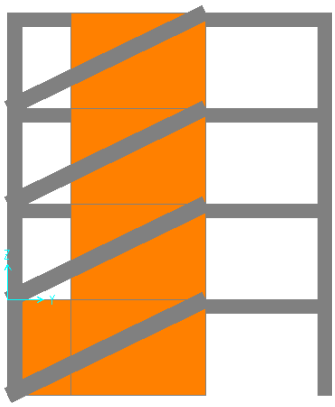


Figure 51. Coupe transversale 1 (X=25,15).

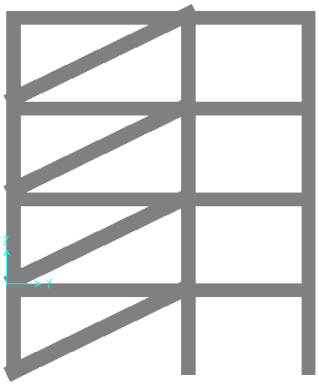


Figure 52. Coupe transversale 1 (X=32,2).

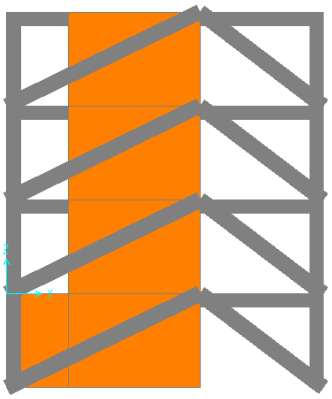


Figure 53. Coupe transversale 1 (X=39,25).

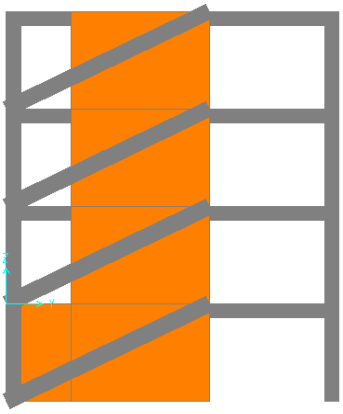


Figure 54. Coupe transversale 1 (X=42,4).

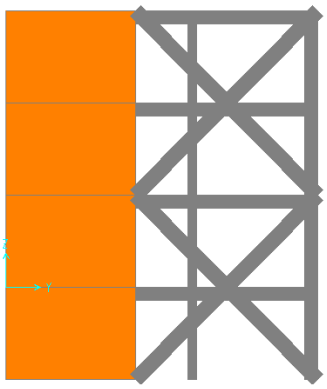


Figure 55. Vue en élévation des voiles dans le pignon est (X=49,6).

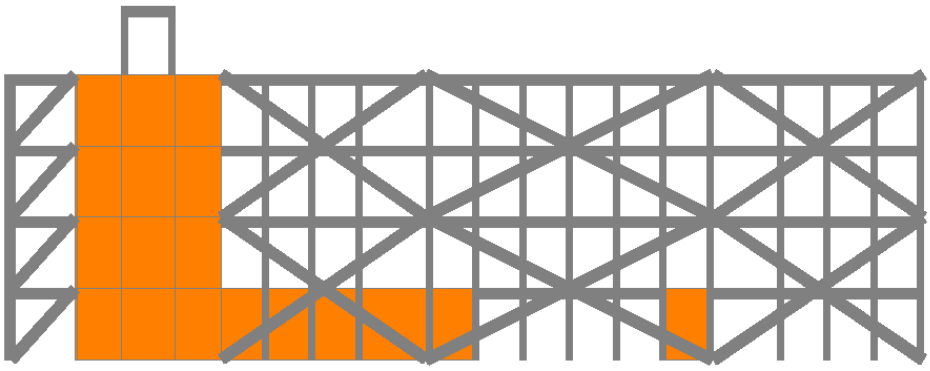


Figure 56. Vue en élévation des voiles dans la façade sud (Y=0).

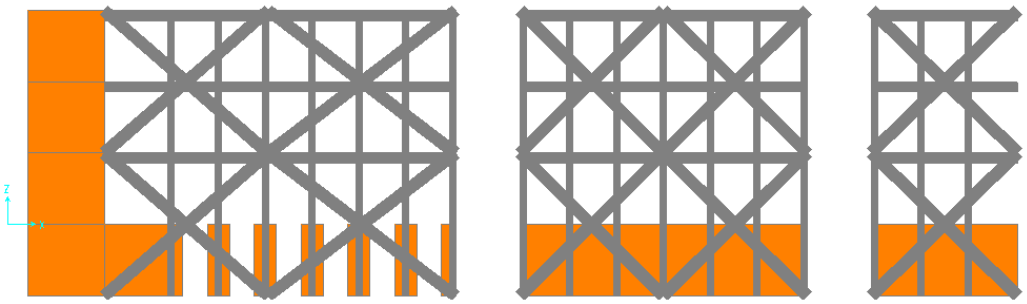


Figure 57. Vue en élévation des voiles dans la façade nord (Y=11,8).

Les profilés métalliques que l'on a choisis pour les raidisseurs sont des sections à larges ailes HD400x1086, avec une hauteur totale de 569mm et une largeur de semelle de 454mm. Ces sections ont été choisies pour leur forte inertie, de façon à reprendre l'effort nécessaire au soulagement des voiles et au raidissement des parties les plus souples de la structure. Il s'agit des mêmes sections pour tous les raidisseurs.

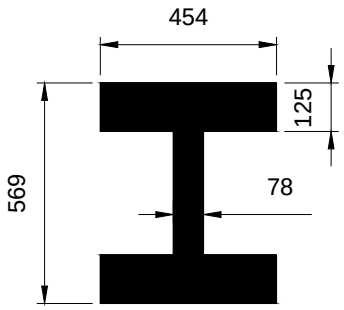


Figure 58. Section des raidisseurs (mm).

9.2.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Diminuer les effets de la torsion du bâtiment.
- Elimination du point dur situé dans la partie gauche du bâtiment.
- Soulagement des voiles sous charges sismiques.

Le bâtiment existant sous zone fortement sismique présente un pourcentage d'éléments défaillants de 56%. Le rajout de raidisseurs métalliques est une intervention aussi bien extérieure qu'intérieure, répartie sur tout le bâtiment, aussi bien en plan qu'en élévation et qui demande des travaux d'implantation importants. Pour que cette solution soit jugée intéressante, le pourcentage d'éléments défaillants après installation du contreventement ne doit pas être supérieur à 15%. Ces 15% d'éléments défaillants après renforcement seront renforcés par des moyens classiques avec des interventions locales. Nous sommes plus

exigeants pour cette solution que pour la solution ne demandant que du contreventement extérieur, pour laquelle on s'imposait un pourcentage d'éléments défaillants de 20%.

L'objectif du renforcement par rajout de croix de St André est de diminuer le pourcentage d'éléments défaillants à **15%.**

Analyse modale

L'analyse modale effectuée est de 350 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers modes est de 90% dans la direction longitudinale et 93% dans la direction. Le Tableau 41 présente les modes prépondérants dans les directions horizontales :

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
26	0,1638 s	0%	46%
84	0,0901 s	32%	0%
85	0,0899 s	12%	0%

Tableau 41. Modes propres principaux.

Les Figures 59, 60 et 61 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

Figure 59. Déformée pour le Mode 26

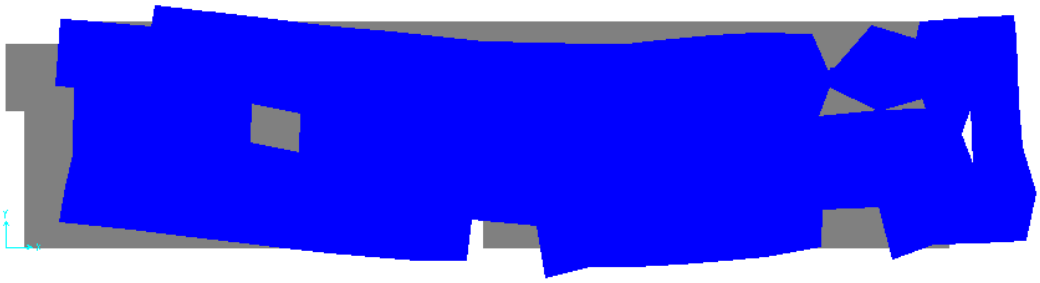


Figure 60. Déformée pour le Mode 84

Figure 61. Déformée pour le Mode 85

Le bâtiment ne présente pas de torsion dans ses modes propres principaux.

Sollicitations sismiques

La structure est à présent plus rigide. Les modes propres principaux ne se situent plus sur le plateau des accélérations mais sur la pente ascendante. Les accélérations qui s'appliquent sur le bâtiment diminuent, comme on peut le voir dans les Figures 62 et 63.

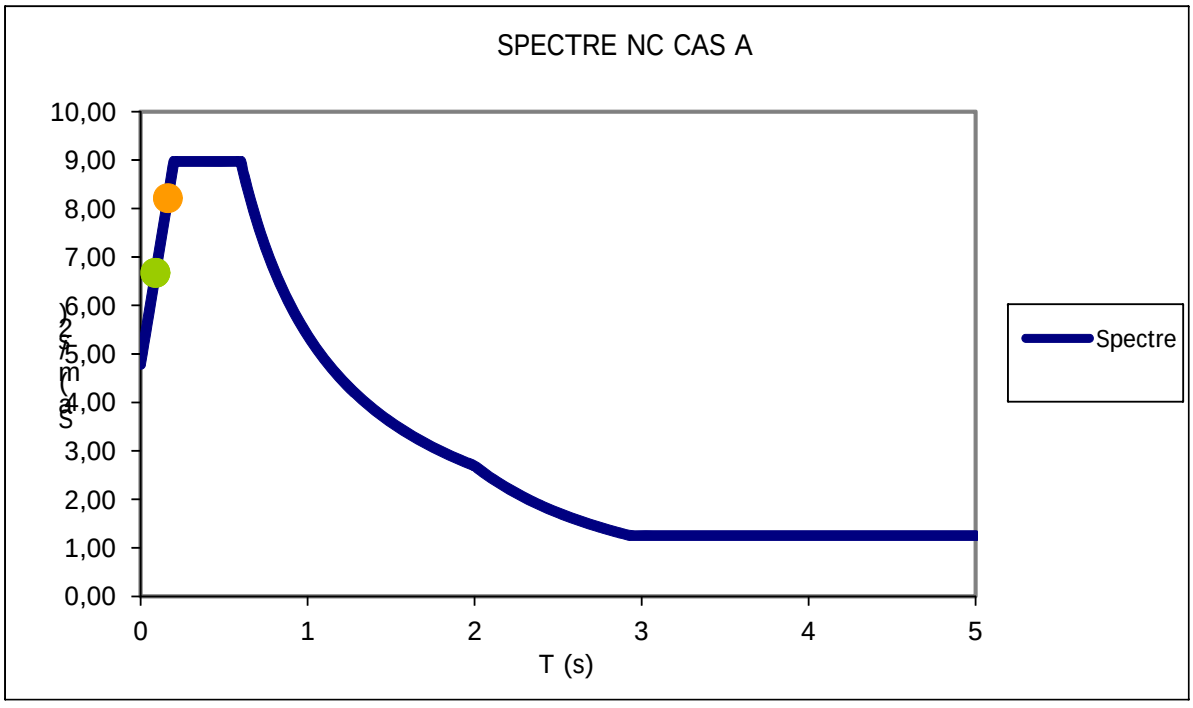


Figure 62. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

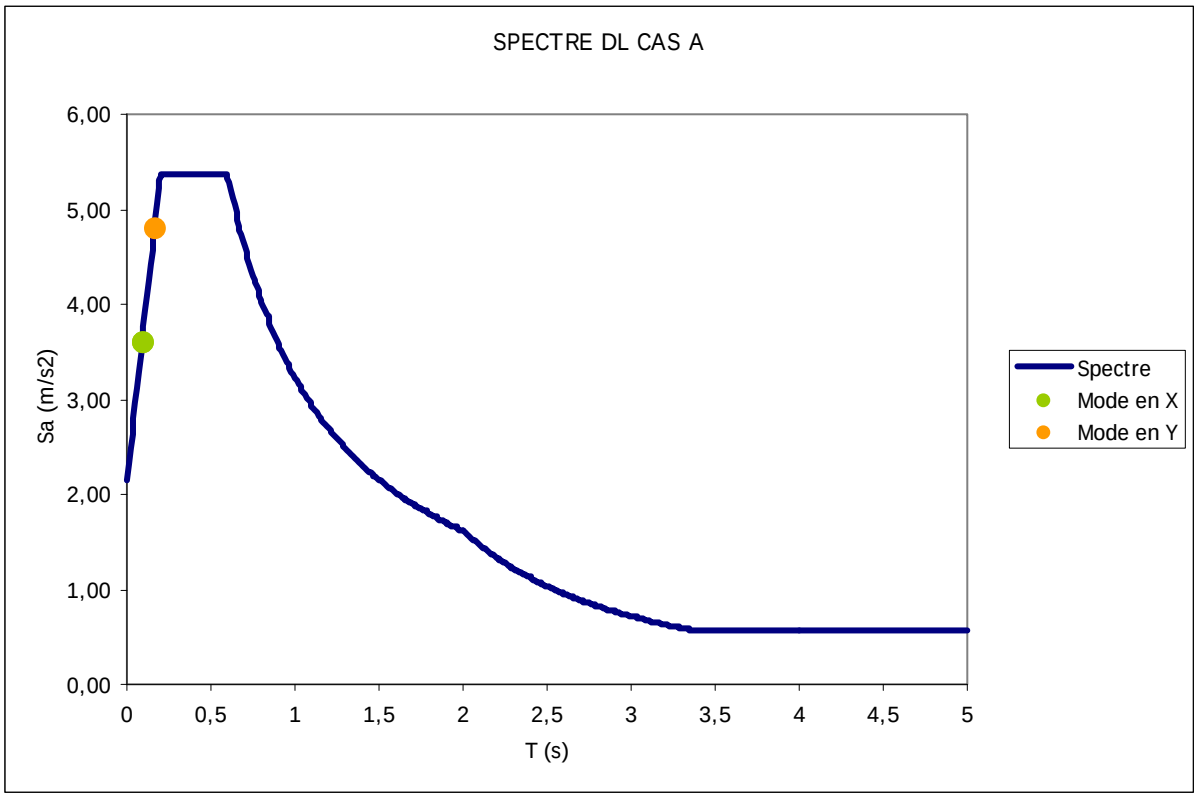


Figure 63. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

Résistance des éléments

Nous présentons dans l'Annexe 10, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

On peut voir dans le Tableau 42 le pourcentage des éléments défaillants :

Nombre d'élément défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	**VOILES (n=98)**	**TOTAL (n=632)**
EXISTANT	NC	23	56	**79**	**158**
	DL	9	32	**48**	**90**
	Global	**48**	**223**	**85**	**356**
	%TOTAL	**27%**	**63%**	**87%**	**56%**
RAIDISSEURS INTERNES ET EXTERNES	NC	4	32	**20**	**56**
	DL	2	15	**2**	**18**
	Global	**8**	**48**	**32**	**88**
	%TOTAL	**4%**	**13%**	**33%**	**14%**

Tableau 42. Pourcentage des éléments défaillants.

Nous sommes en-dessous de la limite de 15% que l'on s'était imposée.

Tous les éléments sont fortement soulagés.

Les voiles sont les éléments qui nécessitent un renforcement complémentaire le plus important.

L'amélioration pour les différents éléments est présentée dans le Tableau 43 :

AMELIORATION	POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
NC	11%	7%	60%	**16%**
DL	4%	5%	47%	**12%**
TOTAL	**22%**	**49%**	**54%**	**42%**

Tableau 43. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont détaillés dans les Tableaux 44 et 45 :

COMBINAISON 1.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	15,8	41,9	2,66
	min	15,7	41,9	2,67
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	7,0	43,8	6,27
	min	6,9	43,8	6,33
DEUXIEME - PREMIER	MAX	4,7	43,8	9,34
	min	4,6	43,8	9,47
PREMIER - RDC	MAX	2,3	43,8	18,88
	min	2,3	43,8	19,23
RDC - SS	MAX	0,6	43,8	75,42
	min	0,6	43,8	76,21

Tableau 44. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.5).

COMBINAISON 1.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	11,3	41,9	3,70
	min	11,2	41,9	3,74
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	6,6	43,8	6,59
	min	6,7	43,8	6,55
DEUXIEME - PREMIER	MAX	4,4	43,8	9,93
	min	4,4	43,8	9,90
PREMIER - RDC	MAX	2,1	43,8	20,59
	min	2,1	43,8	20,44
RDC - SS	MAX	0,5	43,8	82,91
	min	0,5	43,8	82,08

Tableau 45. Vérification des déplacements inter-étage (COMB 1.6).

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

Renforcement complémentaire

Après le renforcement par raidisseurs internes et externes, les éléments défaillants de la structure ne sont plus que 8 poteaux, 48 poutres et 32 voiles. Nous calculons pour chacun d'entre eux le renforcement en fibres de carbone nécessaire. Pour le dimensionnement de ce renforcement nous avons suivi l'ATE 3/07-540 du TFC®.

Tous les éléments défaillants sauf une poutre, 1 voile et 4 poteaux peuvent être renforcés par fibres de carbone. La quantité totale de bandes nécessaire est de :

- 640m de bandes 300mm : 13 rouleaux de 50m
- 417m de bandes 150mm : 9 rouleaux de 50m

Le détail de ce renforcement est présenté dans l'Annexe 10.

9.2.3 Conclusion

Avec le renforcement par raidisseurs internes et externes et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Le renforcement complémentaire n'est pas très volumineux, comparé à celui du renforcement avec raidisseurs uniquement en façade, ce qui justifie la performance du renforcement principal.

Ce renforcement présente cependant un impact non négligeable. Dans l'utilisation du bâtiment, puisque des raidisseurs métalliques ferment des circulations qui avant étaient libres, mais surtout dans l'apparence extérieure du bâtiment. Il s'agit d'un renforcement classique, d'une mise en œuvre simple malgré le volume important de raidisseurs à mettre en place, dont l'intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 11 de ce rapport.

Des exemples de renforcements de bâtiments existants par raidisseurs externes et internes sont présentés dans l'Annexe 12.

9.3 Isolation

9.3.1 Description

Description des travaux

Les travaux de mise en place d'une isolation à la base sont très importants. Il s'agit de couper tous les éléments verticaux d'un étage et de placer dans le plan de la coupure un système d'isolation composé d'appuis et d'amortisseurs. Les appuis sont de deux sortes : glissants et de néoprène. Ils transmettent les charges verticales du bâtiment vers les fondations mais permettent un déplacement important de la partie isolée par rapport au sol. De ce fait, les sollicitations sismiques dans la structure sont fortement diminuées. Les amortisseurs empêchent des déplacements trop importants de la structure qui poseraient problème : choc avec les bâtiments adjacents, coupure des réseaux ou malaise des occupants.

Pour mettre en place l'isolation au niveau des éléments structuraux verticaux, deux méthodes sont possibles :

- Un vérinage de la structure sur des éléments verticaux temporaires pendant la mise en place de l'isolation sur les voiles et poteaux déchargés.
- La construction de bossages temporaires autour des éléments verticaux permettant de transférer les charges sur ces bossages pendant que l'on réalise la coupure des voiles et poteau.

Il s'agit dans les deux cas de travaux importants qui impliquent un transfert temporaire de charges et donc qui doit être fait avec des mesures de précaution et de sécurité très strictes.

Dans l'Annexe 12 où ont présentés des exemples réels de renforcement, on peut voir des techniques de mise en place de cette isolation.

Description des équipements

Pour isoler la structure, nous utilisons deux appuis différents : des appuis en néoprène et des appuis glissants. Nous installons le nombre minimum d'appuis néoprène pour fournir une raideur globale du système d'isolation aux alentours de 15MN/m. Cette raideur entraîne des périodes propres principales dans le plan horizontal comprises dans l'intervalle de 2,5 à 3s.

<u>Appuis neoprène</u>

Nous n'avons qu'un seul type d'appui néoprène. Ses caractéristiques sont les suivantes :

B=300mm

te=48mm

H=132mm

Kr=0,59 MN/m

Nmax(statique)=800kN

Nmax(sismique)=650kN

Smax=100mm

ξ=10% (amortissement visqueux)

Appuis glissants

Les appuis glissants sont des appuis qui reprennent les efforts verticaux mais n'opposent aucune résistance dans le plan. Ils permettent de soulager l'effort vertical au niveau des appuis néoprène.

Amortisseurs

Pour contrôler les déplacements très importants de la structure sur appuis parasismiques, nous plaçons des amortisseurs dans les deux directions horizontales principales du bâtiment. Nous distribuons des amortisseurs qui s'opposent au déplacement en X sous les voiles en X et des amortisseurs qui s'opposent au déplacement en Y sous les voiles en Y. Pour leur installation, une vérification locale des sollicitations dans les ancrages de l'amortisseur doit être effectuée pour éviter l'éclatement des voiles. En partie inférieure, les amortisseurs sont directement ancrés aux longrines des fondations superficielles du bâtiment.

Les caractéristiques des amortisseurs sont les suivantes :

F_{max}=600kN

C=608 kN/(m/s)^0,1

α=0,1

Ce sont des amortisseurs qui peuvent supporter des forces assez importantes par rapport aux amortisseurs classiques du bâtiment car nous avons préféré diminuer le nombre d'amortisseurs de façon à pouvoir les distribuer plus facilement sous les voiles qui ont déjà un encombrement important d'appuis.

Localisation des équipements

- Localisation des appuis

Les critères de localisation des appuis ont été les suivants :

Tous les appuis néoprène sont situés sous les voiles et non pas sous les poteaux : la section des poteaux ne leur permet pas de reprendre l'effort tranchant transmis par l'appui.

L'effort vertical est repris par les appuis néoprène et les appuis glissants de façon à ne jamais excéder les efforts normaux maximaux permis dans les appuis néoprène.

On ne rajoute à la structure existante aucun élément externe au système isolateurs-amortisseurs.

Le plan de distribution des isolateurs au niveau du sous-sol est présenté dans la Figure 64 :

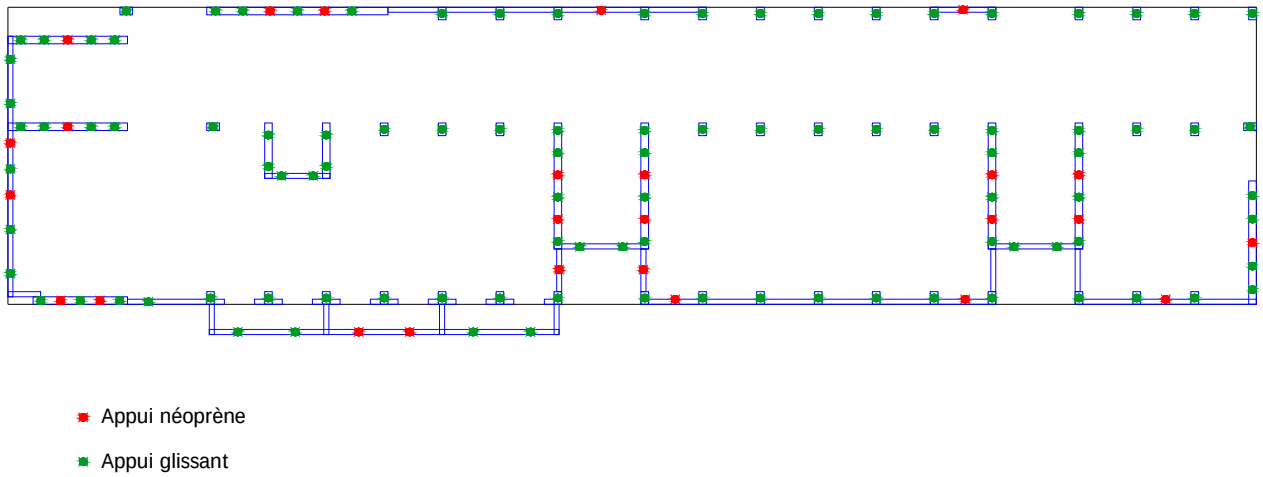


Figure 64. Répartition des appuis.

Nous avons installé 28 appuis néoprène et 97 appuis glissants.

Les 28 appuis néoprène apportent une raideur de 16,52MN/m à l'ensemble du bâtiment et les appuis glissant permettent de reprendre les charges verticales et de soulager l'effort normal dans les isolateurs.

Nous avons préféré placer les appuis néoprène sous les voiles. Ceci ne nous a pas permis de rapprocher le centre de gravité et le centre de masse de l'étage. Les modes principaux de la structure présentent donc de la torsion, ce qui est défavorable pour les déplacements aux appuis. L'amortissement pour la limitation des déplacements est d'autant plus important.

- Localisation des amortisseurs

Pour placer les amortisseurs dans la direction X nous avons plus de place sous les voiles. Nous les plaçons donc dans les coupures des voiles pour minimiser l'encombrement des équipements.

Pour les amortisseurs en Y nous avons des coupures de voiles très encombrées. Nous choisissons de placer des amortisseurs face aux voiles en Y lorsque ceci est possible.

Le plan de situation des amortisseurs est présenté dans la Figure 65 :

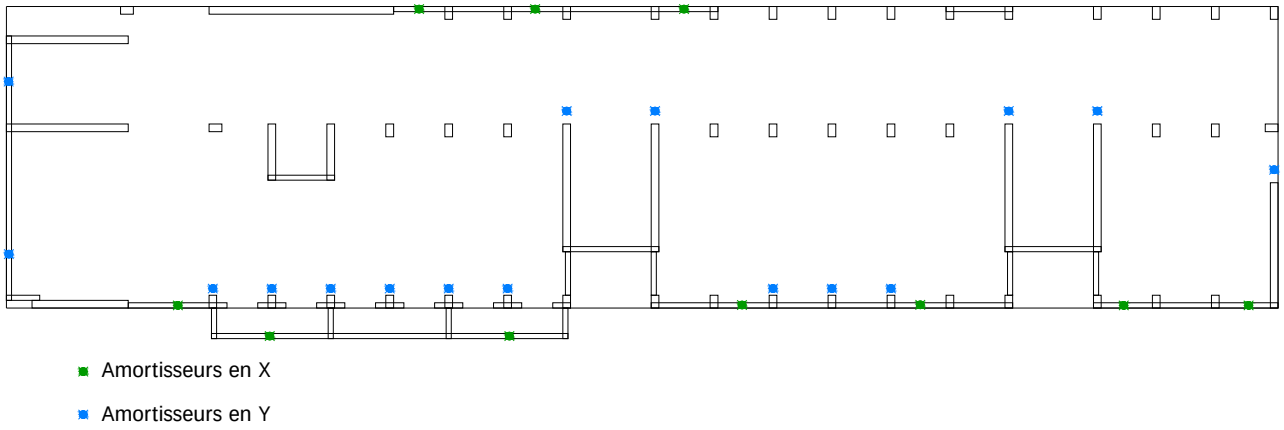


Figure 65. Répartition des amortisseurs.

Conclusion

L'intervention pour l'installation de l'isolation au sous-sol est une intervention lourde en travaux et en volume d'équipements. L'avantage est que la vaste majorité des travaux se réalise uniquement au niveau du sous-sol.

Les équipements à mettre en place sont les suivants :

- 28 appuis néoprène
- 79 appuis glissants
- 10 amortisseurs en X
- 16 amortisseurs en Y

9.3.2 Comportement structurel

Objectif du renforcement

Les objectifs du comportement général du bâtiment sont les suivants :

- Augmentation de la période propre principale du bâtiment jusqu'à une valeur de 2,5 à 3s.
- Limitation des déplacements au niveau de l'isolation à 100mm maximum (distorsion maximale des appareils d'appui).

On adapte le nombre et les caractéristiques des isolateurs tout en les combinant avec des appuis glissants pour atteindre une raideur globale du bâtiment adaptée aux périodes de 2,5 à 3s et nous installons des amortisseurs pour diminuer le déplacement au niveau de l'isolation.

L'implantation d'amortisseurs est une intervention lourde sur la structure. Nous nous fixons donc une limitation du pourcentage d'éléments défaillants assez restrictive pour minimiser le coût des renforcements complémentaires à faire. Nous fixons un pourcentage maximal d'éléments défaillants de **10%**.

Analyse modale

L'analyse modale effectuée est de 12 modes. La masse modale mobilisée avec ces premiers modes est de 100% dans la direction longitudinale et 100% dans la direction transversale. On ne considère pas la mobilisation dynamique de la structure dans la direction verticale.

Le Tableau 46 présente les modes prépondérants dans les directions horizontales :

Modes propres	Périodes propres	Pourcentage de masse modale selon X	Pourcentage de masse modale selon Y
1	2,902 s	50%	3%
2	2,751 s	5%	95%
3	2,591 s	45%	2%

Tableau 46. Modes propres principaux.

Les Figures 66, 67 et 68 présentent les déformées modales du bâtiment pour les trois modes prépondérants.

Figure 66. Déformée pour le Mode 1

Figure 67. Déformée pour le Mode 2

Figure 68. Déformée pour le Mode 3

Le premier et le troisième mode sont des modes de rotation autour de l'axe vertical.

Le deuxième mode est de translation dans la direction Y.

Avec une répartition des isolateurs qui aurait superposé centre de gravité et centre de torsion de la structure, nous aurions évité la rotation autour de l'axe vertical. Cependant, ceci n'a pas été possible une fois nous nous sommes imposés de placer les isolateurs sous les voiles, répartis de façon très irrégulière en plan.

Sollicitations sismiques

Les isolateurs utilisés contribuent à la dissipation d'énergie de la structure. Pour représenter cela dans notre modèle, nous avons introduit un coefficient d'amortissement ξ=10% dans les formules des spectres élastiques.

Nous n'avons pas introduit de coefficient de comportement puisque nous ne voulons pas considérer la plastification dans la structure et la formation de rotules plastiques dans la résistance du bâtiment isolé.

Les accélérations maximales correspondant aux trois modes propres principaux de la structure sont inférieures à 2,52m/s^2 pour l'état de quasi-effondrement et inférieures à 1,18m/s^2 pour l'état de limitation de dommages, comme on peut le voir dans les Figures 69 et 70 respectivement :

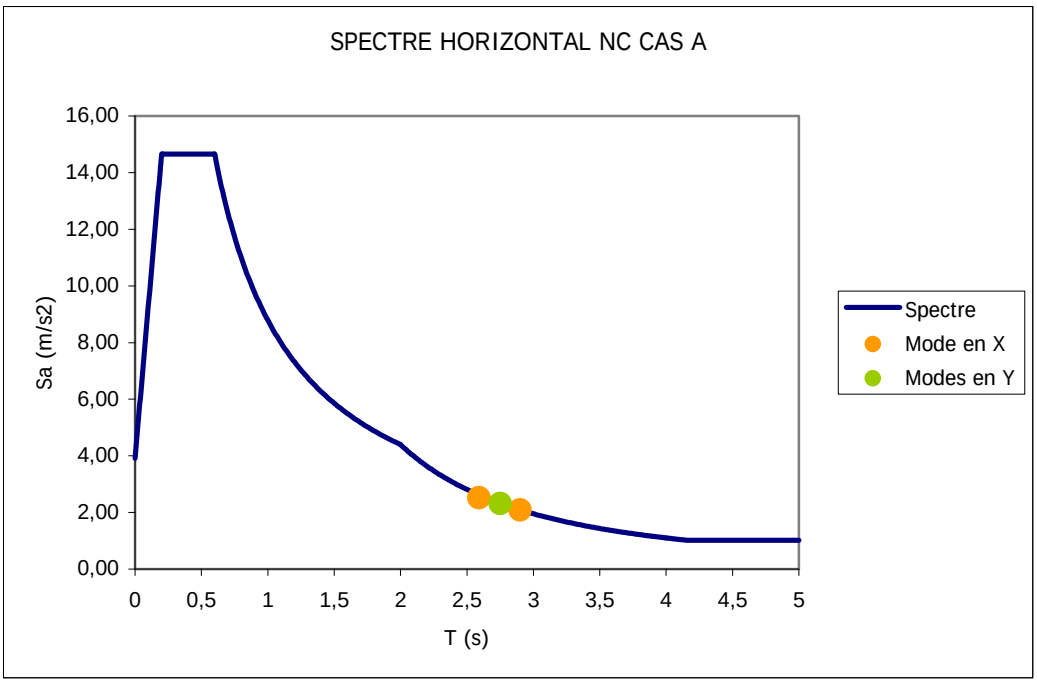


Figure 69. Spectre de calcul pour l'état de Non Effondrement.

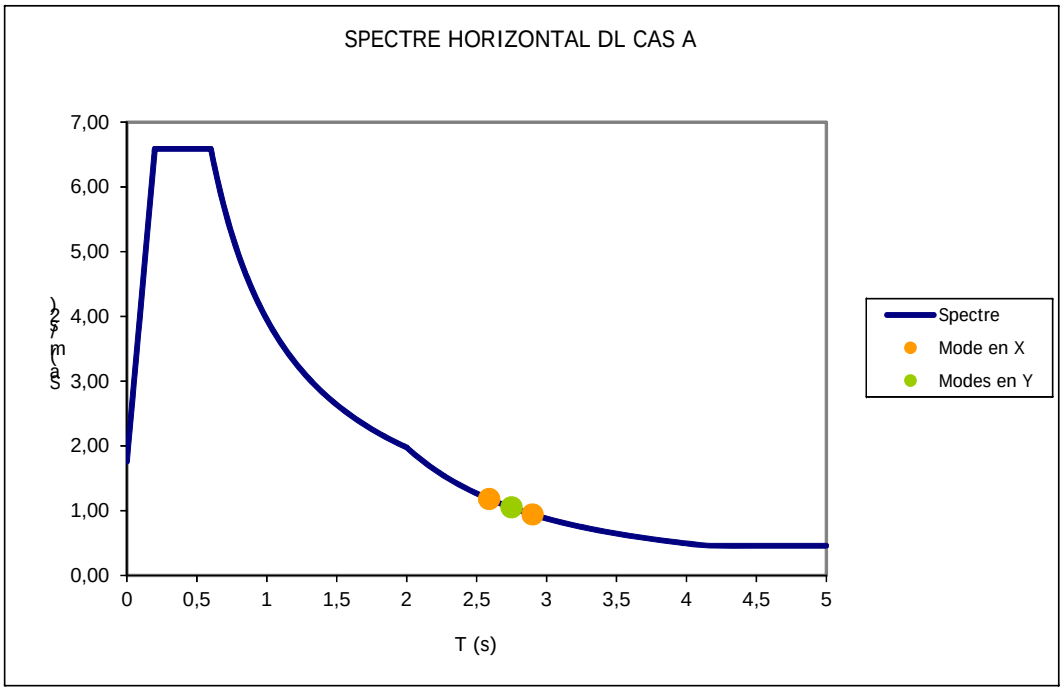


Figure 70. Spectre de calcul pour l'état de Limitation de Dommages.

Résistance des éléments

Nous présentons dans l'Annexe 11, les éléments défaillants pour chaque combinaison puis le récapitulatif du nombre d'éléments défaillants dans l'ensemble des combinaisons. Sont aussi présentés les plans des éléments défaillants par étage.

Le Tableau 47 rassemble les résultats de l'analyse des différents éléments de la structure :

Nombre d'éléments défaillants		POTEAUX (n=178)	POUTRES (n=356)	VOILES (n=98)	**TOTAL (n=632)**
EXISTANT (avec sous-sol)	NC	23	56	79	**158**
	DL	9	32	48	**90**
	Global	**48**	**223**	**85**	**356**
	%TOTAL	**27%**	**63%**	**87%**	**56%**
ISOLATION (avec sous-sol)	NC	5	18	16	**38**
	DL	8	20	6	**34**
	Global	**11**	**36**	**24**	**71**
	%TOTAL	**6%**	**10%**	**24%**	**11%**

Tableau 47. Pourcentage d'éléments défaillants (avec sous-sol).

Avec l'isolation, on parvient à diminuer le nombre d'éléments défaillants à 11% au lieu de 56% pour le bâtiment existant. Cependant, ce résultat n'est pas très représentatifs puisque,

lors de l'intervention dans la structure pour installer l'isolation, une intervention est nécessaire sur tous les éléments verticaux du sous-sol (voiles et poteaux).

Il est donc plus intéressant de regarder uniquement les éléments qui doivent être renforcés dans tous les étages sauf au sous-sol. Les éléments défaillants dans ce cas-là sont présentés dans le Tableau 48 :

Nombre d'élément défaillants		POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
EXISTANT (sans sous-sol)	NC	29	56	80	**165**
	DL	12	32	47	**91**
	TOTAL	**47**	**223**	**40**	**310**
	%TOTAL	**35%**	**63%**	**89%**	**58%**
ISOLATION (sans sous-sol)	NC	0	18	5	**22**
	DL	1	20	2	**23**
	TOTAL	**2**	**36**	**7**	**24**
	%TOTAL	**1%**	**10%**	**16%**	**8%**

Tableau 48. Pourcentage d'éléments défaillants (sans sous-sol).

Dans les étages autres que le sous-sol, les éléments défaillants sont très peu nombreux et donc une faible intervention ponctuelle au niveau de ceux-ci permettra de mettre le bâtiment au niveau de sécurité désiré.

L'amélioration pour les différents éléments sans considérer le sous-sol est présentée dans le Tableau 49 :

AMELIORATION	POTEAUX	POUTRES	VOILES	**TOTAL**
NC	21%	11%	168%	**27%**
DL	8%	3%	99%	**13%**
Global	**34%**	**53%**	**73%**	**50%**

Tableau 49. Pourcentage d'amélioration par rapport au bâtiment existant.

Déplacements inter-étage

Les déplacements extrêmes des différents étages sont présentés dans les Tableaux 50 et 51 :

COMBINAISON 1.5				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	22,1	41,9	1,90
	min	21,2	41,9	1,98
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	26,2	43,8	1,67
	min	15,1	43,8	2,90
DEUXIEME - PREMIER	MAX	22,8	43,8	1,91
	min	22,1	43,8	1,98
PREMIER - RDC	MAX	10,7	43,8	4,08
	min	10,0	43,8	4,39

Tableau 50. Vérification des déplacements inter-étage (COMB1.5).

COMBINAISON 1.6				
DEPLACEMENTS RELATIFS		ds (mm)	dslim (mm)	Fs
QUATRIEME - TROISIEME	MAX	27,4	41,9	1,53
	min	26,5	41,9	1,58
TROISIEME - DEUXIEME	MAX	22,7	43,8	1,93
	min	21,9	43,8	1,99
DEUXIEME - PREMIER	MAX	16,9	43,8	2,59
	min	16,1	43,8	2,71
PREMIER - RDC	MAX	7,1	43,8	6,19
	min	6,3	43,8	6,94

Tableau 51. Vérification des déplacements inter-étage (COMB1.5).

Les déplacements inter-étage sont acceptables.

Nous n'avons pas tenu en compte le déplacement relatif entre le rez-de-chaussée et le sous-sol puisque c'est là où se situe l'isolation. Par contre, avec l'ajout de amortisseurs, nous avons limité ce déplacement, qui correspond à la distorsion des appuis néoprène, à 100mm, limite imposée par le fabriquant des appareils d'appui.

Renforcement complémentaire

Après le renforcement par isolation, les éléments défaillants de la structure ne sont plus que 35 poutres et 7 voiles. Nous calculons pour chacun d'entre eux le renforcement en fibres de carbone nécessaire. Pour le dimensionnement de ce renforcement nous avons suivi l'ATE 3/07-540 du TFC®.

Tous les éléments défaillants, sauf trois poutres et un voile, peuvent être renforcés par fibres de carbone. La quantité totale de bandes nécessaire est de :

- 280m de bandes 300mm : 6 rouleaux de 50m
- 101m de bandes 150mm : 3 rouleaux de 50m

Le détail de ce renforcement est présenté dans l'Annexe 11.

Les éléments qui ne sont pas renforcés par fibre de carbone devront être renforcés par élargissement de leur section.

9.3.3 Conclusion

Avec le renforcement par isolation à la base et le renforcement complémentaire, le bâtiment est complètement justifié face au séisme (sauf pour l'étude des nœuds que nous ne considérons pas dans cette étude). Le renforcement complémentaire est peu important, ce qui justifie la performance du renforcement principal.

Ce renforcement représente un changement complet du fonctionnement résistant de l'ouvrage. Si bien l'application du renforcement se réalise uniquement au niveau du sous-sol, l'effet de celui-ci est ressenti dans tout le bâtiment puisque des déplacements plus importants auront lieu lors du séisme. Cela implique que les joints avec les bâtiments adjacents doivent être adaptés à ces déplacements pour que ne se produisent pas des chocs entre bâtiments qui produiraient des effets plus défavorables que ceux que l'on évite avec l'isolation.

Il s'agit d'un renforcement peu classique et d'une mise en œuvre compliquée. Si bien l'isolation est assez courante dans des bâtiments neufs dans des zones de forte sismicité, l'isolation comme mesure de renforcement est assez rare et coûteuse. Son intérêt face aux autres solutions envisagées est étudié dans le Chapitre 11 de ce rapport.

10 Perturbations et coût - Zone de forte sismicité

10.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'évaluation qualitative des perturbations et du coût des différents renforcements étudiés.

On décrit dans un premier temps les perturbations et les coûts qu'entraîne le renforcement puis on en donne une appréciation qualitative pour pouvoir comparer d'une façon générale les différentes solutions de renforcement.

La comparaison des différents renforcements est présentée à la fin du chapitre.

10.2 Raidisseurs en façade

10.2.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

L'intervention pour la mise en place du contreventement a lieu principalement depuis l'extérieur, ce qui permet des meilleures conditions d'utilisation du bâtiment pendant les travaux. Cependant, presque la totalité de la façade est concernée et sur toute sa hauteur. La totalité du bâtiment sera concernée et devra réduire son activité, mais pas de façon simultanée.

Les nuisances sonores concernent tout le bâtiment.

Durée des travaux

La durée des travaux est la moins importante pour cette solution de renforcement puisque les raidisseurs métalliques sont préfabriqués et ce n'est que leur installation et ancrage qui doit s'effectuer sur place.

Perturbations après les travaux

Une fois les travaux finis, le renforcement n'a plus aucun impact sur l'utilisation du bâtiment puisque les raidisseurs sont placés en façade dans des endroits autres que ceux d'entrée du bâtiment. Le seul impact est l'impact visuel, puisque l'aspect extérieur du bâtiment est modifié par le rajout de nouveaux éléments en façade.

10.2.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Le contreventement mis en place comporte l'installation de 96 profilés métalliques de longueur variant de 4,71 à 7,87m. La section de ces éléments est de 138,6cm2. Cette section est assez importante puisque nous recherchons une forte inertie de ces raidisseurs afin de décharger les voiles existants.

Volume de Matériaux

Le volume de matériaux nécessaire pour l'ancrage des raidisseurs n'est pas très important. Il s'agit du renforcement au niveau des nœuds d'ancrage.

Difficulté des travaux

L'installation de raidisseurs est une intervention assez classique et, étant situés uniquement en façade, l'accès et l'espace de travail ne présente pas de difficulté particulière.

Renforcement Complémentaire

Les renforcements complémentaires à effectuer portent sur 32% des éléments de la structure. C'est donc un renforcement complémentaire très important et avec un coût pouvant dépasser celui des raidisseurs métalliques.

L'étude sur le renforcement complémentaire en TFC montre qu'il es possible de réduire le pourcentage d'éléments défaillants à 4%, mais ceci avec un volume extrêmement important de TFC (37 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 34 rouleaux de bandes de 150mm).

Le renforcement complémentaire est donc très important.

10.2.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 52 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	**
Durée des travaux	***
Perturbations après les travaux	**
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	****
Volume de matériaux	**
Difficulté des travaux	**
Renforcement complémentaire	*****

Tableau 52. Récapitulatif des coûts et perturbations.

10.3 Raidisseurs internes et externes

10.3.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

L'intervention pour la mise en place du contreventement a lieu principalement depuis l'extérieur pour les raidisseurs placés en façade, mais aussi à l'intérieur, ce qui est plus dérangeant pour le maintien de l'utilisation du bâtiment pendant les travaux. De plus, presque la totalité de la façade est concernée et sur toute sa hauteur. La totalité du bâtiment sera concernée et devra réduire son activité, mais pas de façon simultanée.

Les nuisances sonores concernent tout le bâtiment.

Durée des travaux

La durée des travaux est la moins importante pour cette solution de renforcement puisque les raidisseurs métalliques sont préfabriqués et ce n'est que leur installation et ancrage qui doit s'effectuer sur place.

Perturbations après les travaux

Une fois les travaux finis, il y aura un double impact sur le bâtiment : visuel, dû au changement de l'aspect extérieur du bâtiment après installation des raidisseurs en façade ; et d'encombrement interne, puisque des raidisseurs intérieurs bloquent partiellement le passage à certains endroits du bâtiment.

10.3.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Le contreventement mis en place comporte l'installation de 132 profilés métalliques de longueur variant de 4,19 à 8,00m. La section de ces éléments est de 138,6cm2. Cette section est assez importante puisque nous recherchons une forte inertie de ces croix afin de décharger les voiles existants.

Volume de Matériaux

Le volume de matériaux nécessaire pour l'ancrage des raidisseurs n'est pas très important. Il s'agit du renforcement au niveau des nœuds d'ancrage.

Difficulté des travaux

L'installation de raidisseurs est une intervention assez classique qui ne présente pas de difficulté d'exécution particulière.

Renforcement Complémentaire

Les renforcements complémentaires à effectuer portent sur 14% des éléments de la structure. C'est donc un renforcement complémentaire réduit.

Un renforcement complémentaire en TFC permet de réduire le pourcentage d'éléments défaillants à 1% et ceci avec un volume peu important de TFC (13 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 9 rouleaux de bandes de 150mm).

Le renforcement complémentaire est donc peu important.

10.3.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 53 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	***
Durée des travaux	***
Perturbations après les travaux	***
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	*****
Volume de matériaux	**
Difficulté des travaux	**
Renforcement complémentaire	*

Tableau 53. Récapitulatif des coûts et perturbations.

10.4 Isolation

10.4.1 Evaluation des Perturbations

Réduction de l'utilisation du bâtiment

Les travaux pour mettre en place l'isolation de l'école sont concentrés au sous-sol de celle-ci. Même s'il s'agit de travaux importants, leur confinement à un seul niveau du bâtiment permet une utilisation partielle de celui-ci .Les nuisances sonores seront cependant constantes pendant la durée des travaux.

Durée des travaux

Le confinement des travaux au niveau du sous-sol fait que l'intervention soit plus efficace. Cependant, il s'agit d'une solution plus longue à mettre en place que le rajout de raidisseurs métalliques ou de voiles en béton armé.

Perturbations après les travaux

Il n'y a pas de perturbation au niveau de l'utilisation du bâtiment puisque les appuis et amortisseurs se situent à la base des voiles et poteaux existants. Cependant, des prévisions pour les déplacements possibles de la structure doivent être prévues.

Il n'y a pas de perturbation visuelle dans le sens architectural après intervention dans le bâtiment.

10.4.2 Evaluation des coûts

Volume d'équipements

Le renforcement par isolation à la base implique l'installation d'un grand nombre d'équipements. Dans le dimensionnement de notre solution de renforcement nous avons listé les équipements suivants :

- 28 appuis néoprène
- 79 appuis glissants
- 10 amortisseurs en X
- 16 amortisseurs en Y

Volume de Matériaux

Le volume de matériaux nécessaire pour le renforcement temporaire des éléments lors de l'installation des amortisseurs est non-négligeable. De nombreux bossages temporaires et définitifs doivent être mis en place.

Difficulté des travaux

La coupure de voiles et de poteaux présente une plus grande difficulté d'exécution que les méthodes plus traditionnelles de rajout de voiles ou de raidisseurs métalliques. S'agissant d'une intervention moins habituelle dans la réparation, la difficulté des travaux en est accrue.

Renforcement Complémentaire

Les renforcements complémentaires sont à effectuer sur 11% des éléments de la structure. Un renforcement complémentaire en TFC permet de réduire le pourcentage d'éléments défaillants à un 1% et ceci avec un volume peu important de TFC (6 rouleaux de 50m de bandes de 300mm de largeur et 10 rouleaux de bandes de 150mm). Le renforcement complémentaire est donc peu important.

10.4.3 Récapitulatif

Dans le Tableau 54 nous évaluons de façon qualitative les perturbations et les coûts du renforcement. Avec une échelle de 1 à 5 (du moins important au plus important), nous qualifions les différents points considérés.

PERTURBATIONS PENDANT ET APRES TRAVAUX	
Réduction de l'utilisation du bâtiment	*
Durée des travaux	****
Perturbations après les travaux	*
COUT DU RENFORCEMENT	
Volume Equipements	*****
Volume de matériaux	**
Difficulté des travaux	****
Renforcement complémentaire	*

Tableau 54. Récapitulatif des coûts et perturbations.

10.5 Comparaison des renforcements

Le Tableau 55 présente le récapitulatif de l'évaluation qualitative des coûts et perturbations des trois solutions étudiées :

	ISOLATION	RAIDISSEURS EXTERNES	RAIDISSEURS INTERNES ET EXTERNES
PERTURBATIONS			
Réduction de l'utilisation du bâtiment	*	**	***
Durée des travaux	****	***	***
Perturbations après les travaux	*	**	***
COUT			
Volume Equipements	*****	****	*****
Volume de matériau	**	**	**
Difficulté des travaux	****	**	**
Renforcement complémentaire	*	*****	*

Tableau 55. Comparaison des coûts et perturbations.

La Figure 71 situe les trois solutions dans le graphique de classification des interventions par rapport à leurs coûts et perturbations :

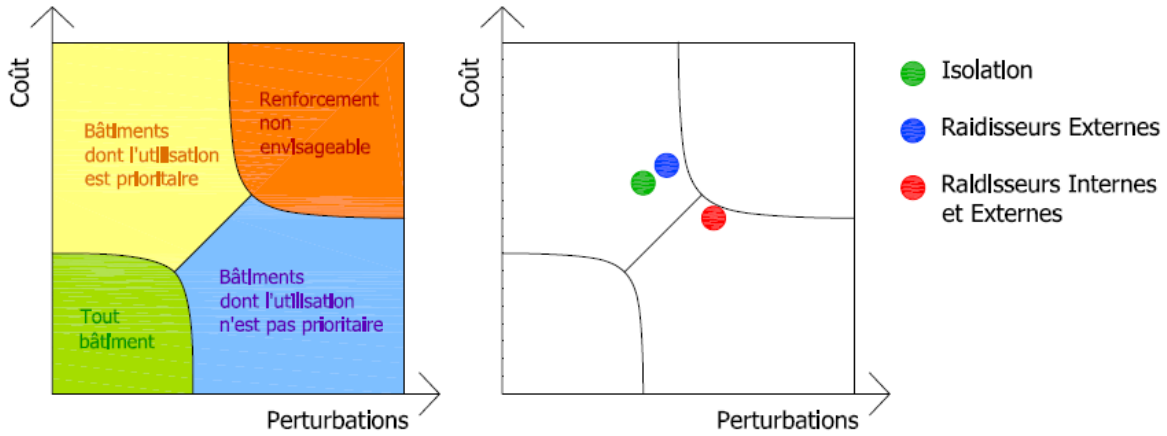


Figure 71. Comparaison des renforcements (zone 5).

11 Récapitulatif et Conclusion

11.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté le bâtiment existant et le détail de plusieurs renforcements proposés, aussi bien pour une zone de faible sismicité (zone 2) comme pour une zone de forte sismicité (zone 5).

Dans ce chapitre nous rassemblons les résultats obtenus pour dégager des conclusions générales sur les avantages et les inconvénients des différentes solutions de renforcement et pouvoir ainsi orienter l'ingénieur lors d'un avant-projet pour un bâtiment similaire.

11.2 Zone de faible sismicité

Amélioration du comportement de la structure

Dans le Tableau 56, sont exposés le nombre d'éléments défaillants dans le bâtiment existant et après les différentes interventions principales.

RENFORCEMENT PRINCIPAL	Nombre d'éléments défaillants								Amélioration
	POTEAUX		POUTRES		VOILES		TOTAL		
EXISTANT	2	1%	35	10%	43	44%	80	13%	
CROIX DE ST ANDRE	0	0%	5	1%	26	27%	31	5%	61%
RAJOUT VOILES	0	0%	0	0%	19	19%	19	3%	76%
TFC	0	0%	0	0%	4	4%	4	1%	95%

Tableau 56. Récapitulatif des éléments défaillants (sans renforcement complémentaire).

Si à ce renforcement principal on rajoute le renforcement secondaire par bandes de TFC, les éléments défaillants qui devront être renforcés par des agrandissements de section sont ceux du Tableau 57 :

RENFORCEMENT PRINCIPAL + COMPLEMENTAIRE	Nombre d'éléments défaillants								Amélioration
	POTEAUX		POUTRES		VOILES		TOTAL		
EXISTANT	2	1%	35	10%	43	44%	80	13%	
CROIX DE ST ANDRE	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	100%
RAJOUT VOILES	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	100%
TFC	0	0%	0	0%	4	4%	4	1%	95%

Tableau 57. Récapitulatif des éléments défaillants (avec renforcement complémentaire).

Coût et Perturbations

Le Tableau 58 présente le récapitulatif de l'évaluation qualitative des coûts et perturbations des trois solutions étudiées pour une zone de faible sismicité :

	RAJOUT VOILES	CROIX DE ST ANDRE	TFC
PERTURBATIONS			
Réduction de l'utilisation du bâtiment	**	**	*
Durée des travaux	**	*	*
Perturbations après les travaux	*	*	-
COUT			
Volume Equipements	-	***	-
Volume de matériel	***	*	**
Difficulté des travaux	*	*	*
Renforcement complémentaire	*	*	*

Tableau 58. Récapitulatif des coûts et perturbations (zone 2).

La Figure 72 situe les trois solutions dans le graphique de classification des interventions par rapport à leurs coûts et perturbations :

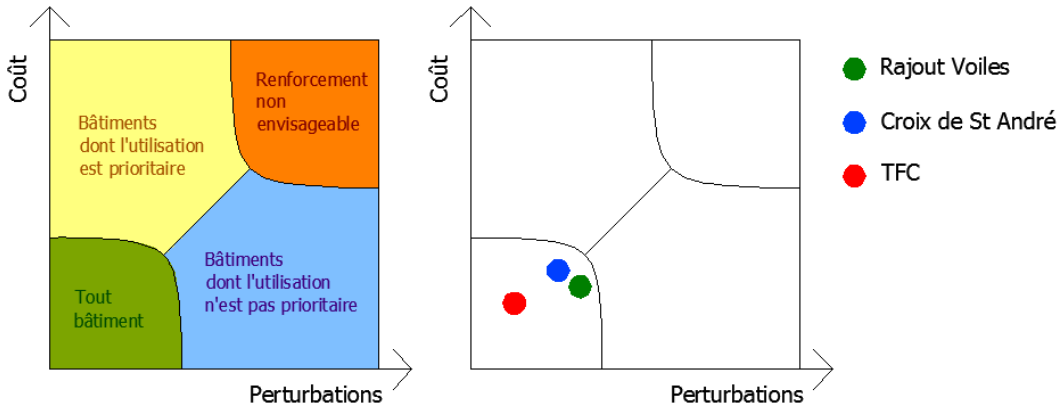


Figure 72. Comparaison des renforcements (zone 2).

11.3 Zone de forte sismicité

Amélioration du comportement de la structure

Dans le Tableau 59 sont exposés le nombre d'éléments défaillants dans le bâtiment existant et après les différentes interventions principales.

RENFORCEMENT PRINCIPAL	Nombre d'éléments défaillants								Amélioration (Renfort/Existant)
	POTEAUX		POUTRES		VOILES		TOTAL		
EXISTANT	48	27%	223	63%	85	87%	357	56%	
RAIDISSEURS EXT	18	10%	126	35%	58	59%	202	32%	43%
RAIDISSEURS INT ET EXT	8	4%	48	13%	32	33%	88	14%	75%
ISOLATION (sans sous-sol)	2	1%	36	10%	7	16%	45	8%	85%

Tableau 59. Récapitulatif des éléments défaillants (sans renforcement complémentaire).

Si à ce renforcement principal on rajoute le renforcement secondaire par bandes de TFC, les éléments défaillants qui devront être renforcés par des agrandissements de section sont ceux du Tableau 60 :

RENFORCEMENT PRINCIPAL + COMPLEMENTAIRE	Nombre d'éléments défaillants								Amélioration (Renfort/Existant)
	POTEAUX		POUTRES		VOILES		TOTAL		
EXISTANT	48	27%	223	63%	85	87%	357	56%	
RAIDISSEURS EXT	2	1%	4	1%	18	18%	24	4%	93%
RAIDISSEURS INT ET EXT	4	2%	1	0%	1	1%	6	1%	98%
ISOLATION (sans sous-sol)	0	0%	3	1%	1	1%	4	1%	99%

Tableau 60. Récapitulatif des éléments défaillants (avec renforcement complémentaire).

Coût et Perturbations

Le Tableau 61 présente le récapitulatif de l'évaluation qualitative des coûts et perturbations des trois solutions étudiées pour une zone de faible sismicité :

	ISOLATION	RAIDISSEURS EXTERNES	RAIDISSEURS INTERNES ET EXTERNES
PERTURBATIONS			
Réduction de l'utilisation du bâtiment	*	**	***
Durée des travaux	****	***	***
Perturbations après les travaux	*	**	***
COUT			
Volume Equipements	*****	****	*****
Volume de matériel	**	**	**
Difficulté des travaux	****	**	**
Renforcement complémentaire	*	*****	**

Tableau 61. Récapitulatif des coûts et perturbations (zone5).

La Figure 73 situe les trois solutions dans le graphique de classification des interventions par rapport à leurs coûts et perturbations :

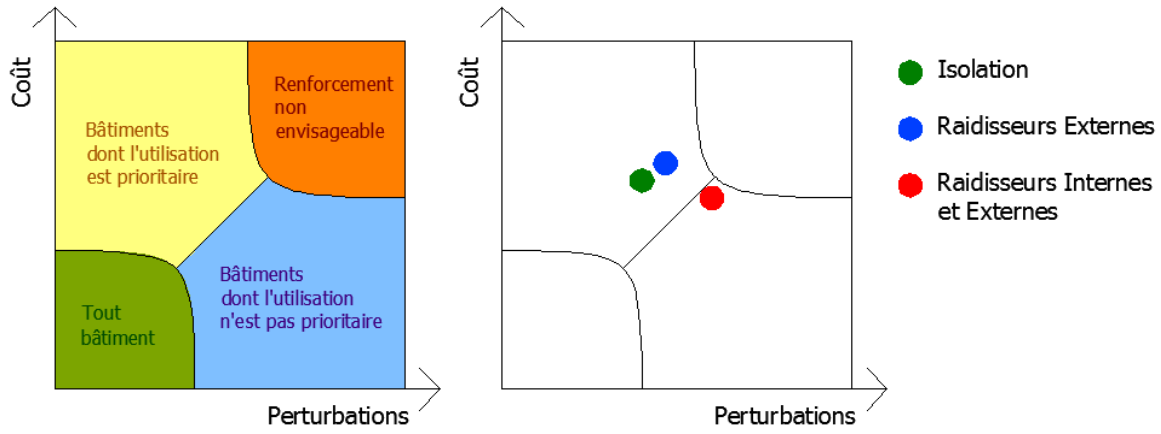


Figure 73. Comparaison des renforcements (zone 5).

11.4 Conclusion

Tous ces renforcements atteignent, avec le renforcement complémentaire de TFC, des pourcentages d'amélioration du comportement structurel du bâtiment semblables (1% d'élément défaillants dans le cas le plus défavorable de la zone faiblement sismique et 4% pour la zone fortement sismique). Au niveau structurel, ces solution sont donc efficaces et peuvent être envisagées lors du renforcement d'un bâtiment avec des caractéristiques semblables à l'école primaire considérée.

L'étude qualitative comparative des différents renforcements montre que le renforcement optimal à choisir parmi ceux étudiés n'est pas le même selon les contraintes du bâtiment :

- Pour la zone 2, le renforcement par fibres de carbone est celui qui présente des conditions optimales aussi bien de coût comme de perturbations. Cependant, dans des cas où l'approvisionnement en TFC® peut être cher ou le personnel formé pour sa pose non disponible, les autres solutions sont aussi à tenir en compte. Si dans certains pays le prix du métal est relativement peu cher, la solution par croix de St André est à préférer pendant que lorsque celui-ci n'est pas rentable, la solution classique par rajout de voiles serait la plus adaptée.

- Pour la zone 5, l'étude qualitative comparative des différents renforcements montre que le renforcement optimal à choisir parmi ceux étudié n'est pas le même selon les contraintes du bâtiment à renforcer. Une solution par raidisseurs internes et externes pourrait être préférable pour un bâtiment moins sensible aux perturbations causées par les travaux mais avec un budget moins important pour ceux-ci ; pendant que pour un bâtiment dont l'utilisation doit être maintenue lors des travaux, l'isolation serait la première solution à envisager.

Cette étude nous permet donc d'avoir une vision d'ensemble sur l'efficacité, les avantages et les inconvénients des solutions contemplées pour chaque zone sismique. Les conclusions qui ont été dégagées serviront de base à un ingénieur confronté à un avant-projet de renforcement d'un bâtiment similaire pour choisir le renforcement à mettre en place une fois considérées les contraintes particulières de son projet.

12 Conclusion Générale

A la fin de ce PFE au sein de Freyssinet International, nous avons donc réussi à atteindre les objectifs que nous nous étions fixés. Nous avons fourni le rapport listant les différentes solutions de renforcement et nous en avons étudié la pertinence de quelques-unes pour un bâtiment type choisi, l'école primaire en Turquie.

Cependant, il ne s'agit pas d'une étude fermée. Si nous avions disposé de plus de temps, le catalogue des solutions existantes aurait pu être élargi et d'autres solutions de renforcement étudiées pour l'école primaire. En particulier, nous aurions voulu étudier la pertinence de deux autres solutions de renforcement : les croix amorties, dont nous présentons quelques exemples existants dans l'Annexe 12, et les masses accordées, solution utilisée principalement pour des immeubles de grande hauteur mais qui peut aussi avoir une application intéressante pour les bâtiments de taille moyenne en béton armé.

Ces pistes de continuation serviront à enrichir l'étude effectuée. Néanmoins, le travail et les rapports émis ont une bonne cohérence d'ensemble et peuvent être exploités dans leur forme actuelle.

D'un point de vue personnel, les recherches effectuées sur le renforcement parasismique ont été très enrichissantes. Elles m'ont permis de compléter et appliquer les connaissances en dynamique et en mécanique des structures acquises tout au long des études. Et elles m'ont aussi donné l'opportunité de m'intéresser à ce champ d'activité qu'est l'impact des séismes sur les structures, champ qui est d'actualité, aussi bien à cause des désastres naturels qui en font prendre conscience dans le monde, comme par l'endurcissement des normes sismiques dans la plupart des pays.

Je voudrais finir ce rapport en remerciant encore une fois l'équipe de Freyssinet International, dont j'ai apprécié l'accueil et l'appui constant pendant mon PFE et qui a veillé en tout moment au bon déroulement de celui-ci.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

AGENCE QUALITE CONSTRUCTION, AQC. *Renforcer le bâti existant en zone sismique*. Plaquette : 2011, 8 p. {**Ref. 2**}

ASSOCIATION FRANÇAISE DU GENIE PARARISMIQUE, AFPS. *Guide de la conception parasismique des bâtiments*. France : Eyrolles, 2004, 159 p. {**Ref. 7**}

CONFEDERATION SUISSE, Office Fédéral de l'EnVironnement (OFEV). *Confortement parasismique des constructions. Stratégie et recueil d'exemples en Suisse*. Lieu d'édition : OFEV, 2008, 84 p. {**Ref. 1**}

RUTHERFORD & CHEKENE. *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existig Structures*. : 2006, 571 p. {**Ref. 8**}

SIKA. *Systèmes de renforcements structuraux Sika CarboDur*. Plaquette : 20 p. {**Ref. 3**}

Rapports imprimés

CONSTANTINOU AND SYMANS. *Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers*. Buffalo, 1992 {**Ref. 9**}

Communication dans un congrès

DAVIDOVICI. Renforcement de bâtiments scolaires. In : Présentation Dynamic Concept, *2009*. 76 p° {**Ref. 6**}

I.G. Buckle. Passive control of structures for seismic loading. In : 12 WCEE World Conference on Earthquake Engineering, *2000*. 13 p° {**Ref. 11**}

Kawamura et al.. Seismic Isolation Retrofit in Japan. In : 12 WCEE World Conference on Earthquake Engineering, *2000*. 8 p° {**Ref. 10**}

QAZI, Samiullah. Comportement mécanique sous sollicitations alternées de voiles béton armé renforcés par matériaux composites. In : Laboratoire de Génie Civi & Ingénierie Environmentalel, LGCIE, *Séminaire doctorants*, *Valgrisenche, Italie*, *2010*. 41 p° {**Ref. 5**}

Sites web consultés

MTS. [26 août 2011], www.mts-fr.com {**Ref. 4**}

Earthquake Protection Systems. [26 août 2011], www.earthquakeprotection.com {**Ref. 12**}

Annexes

Annexe 1 Synthèse des méthodes de renforcement parasismique des bâtiments

1. INTRODUCTION……..... 4

2. CLASSIFICATION DES SOLUTIONS……..... 5

3. RIGIDIFICATION ET RENFORCEMENT DE LA STRUCTURE…..... 6

3.1. Amélioration de la régularité du bâtiment..... 6

3.1.1. Elimination de joints..... 6

3.1.2. Création de joints parasismiques.....7

3.1.3. Rajout de voiles ou noyaux..... 7

3.1.4. Installation de câbles précontraints..... 10

3.1.5. Eviter le changement brusque de la section des éléments.....12

3.2. Contreventement de la structure..... 12

3.2.1. Rajout de voiles en béton armé ou treillis en acier..... 13

3.2.2. Extensions rigides..... 14

3.2.3. Remplissage de portiques.....16

3.2.4. Contreforts extérieurs.....17

3.3. Renforcement d'éléments..... 19

3.3.1. Poteaux et voiles en béton armé.....20

3.3.2. Parois en maçonnerie..... 29

3.3.3. Nœuds et connections..... 34

3.3.4. Affaiblissement de voiles.....37

4. AUGMENTATION DE LA DUCTILITE.....42

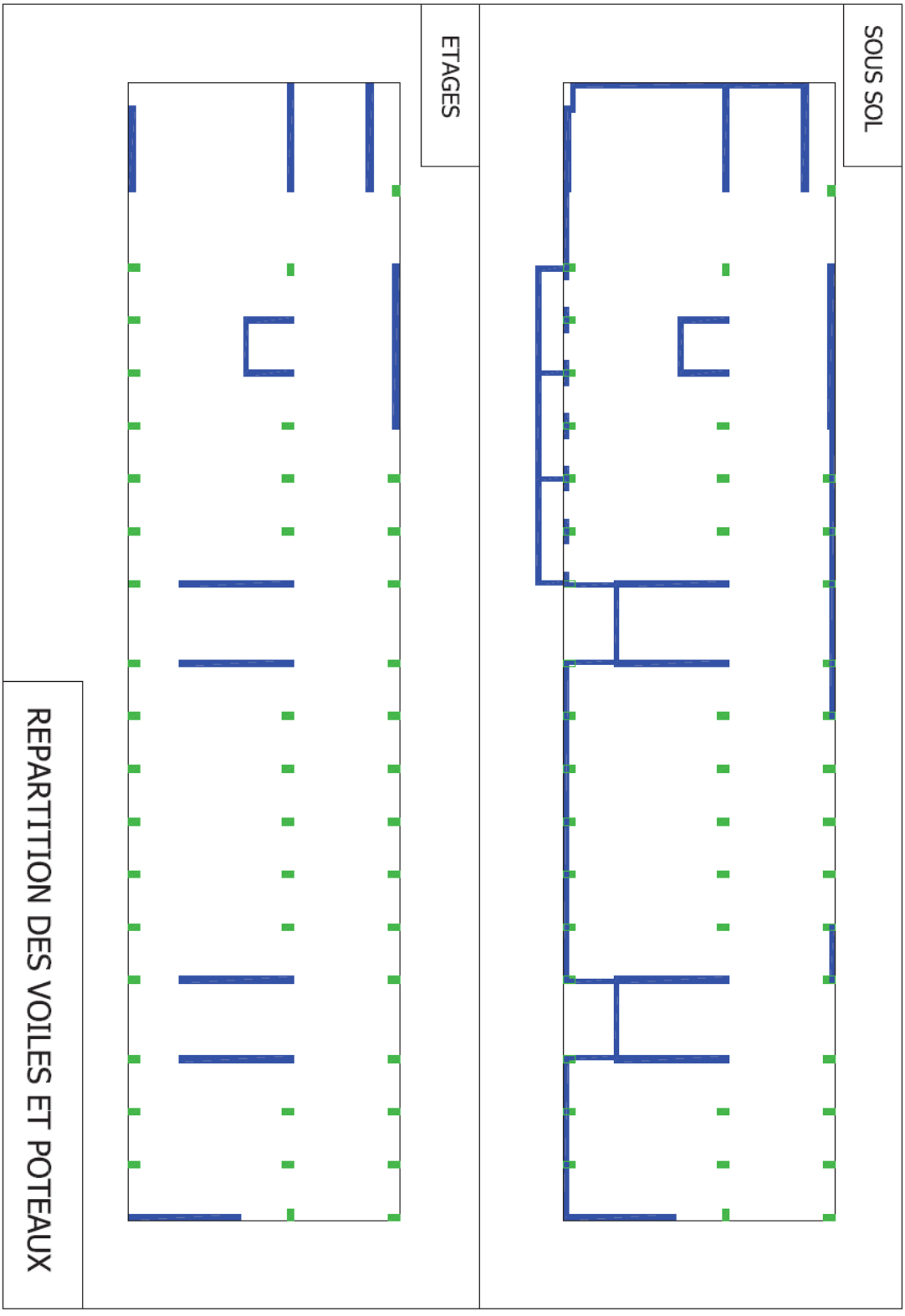
4.1. Application de lamelles en fibre de carbone.....42

4.2. Supprimer le bridage des poteaux.....42

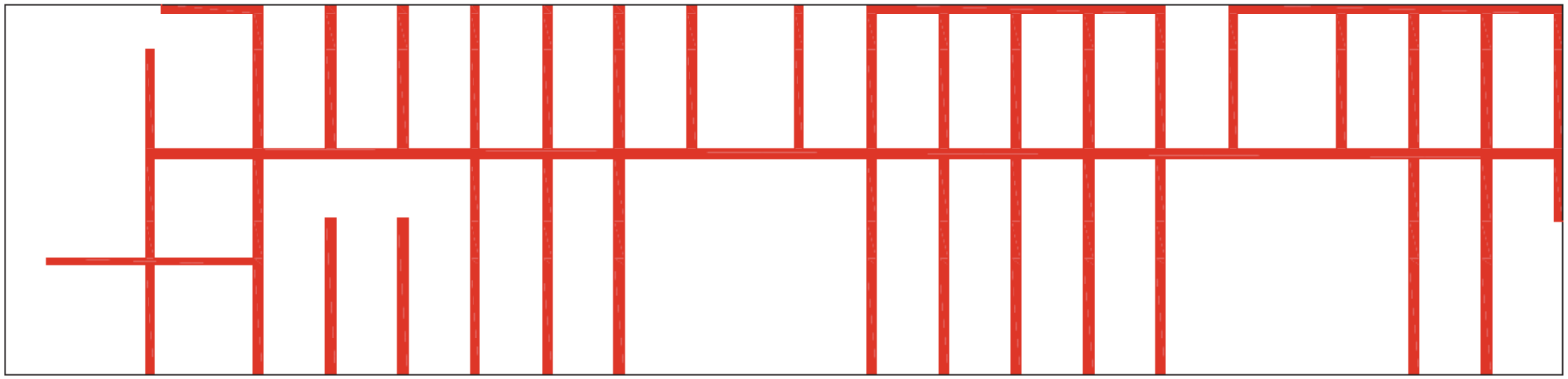
4.3. Supprimer le remplissage de cadres avec des parois en maçonnerie.....43

4.4. Garantir la position des rotules plastiques dans des structures à portiques..... 43
5. ISOLATION PARASISMIQUE..... 44
5.1. Amortisseurs élasto-plastiques..... 44
5.2. Amortisseurs par frottement..... 47
5.3. Matériaux à mémoire de forme.....49
6. AUGMENTATTION DE LA DISSIPATION D'ENERGIE..... 56
6.1. Amortisseurs viscoélastiques.....56
6.2. Dissipateurs par friction.....56
6.3. Amortisseurs visqueux.....59
6.4. Amortisseurs visqueux précontraints (contreventement actif)..... 62
6.5. Protection par câbles amortis.....63
6.6. Amortisseurs à dissipation indirecte.....66
7. ANNEXE A : Facteur de conformité dans la norme suisse..... 70
8. LISTE DES FIGURES.....72
9. BIBLIOGRAPHIE..... 74

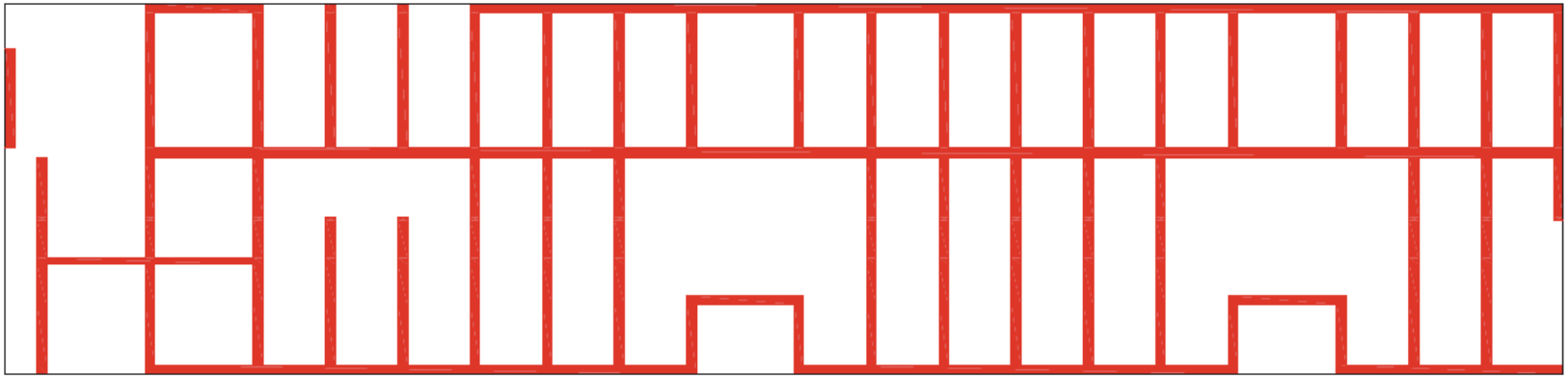
Annexe 2 Description du bâtiment sélectionné



SOUS SOL



ETAGES



REPARTITION DES POUTRES

Annexe 3 Détail des vérifications de la structure

Les vérifications effectuées sont particulières à chaque cas de charge et à la méthode de modélisation du séisme utilisée. Pour notre cas, étude avec spectre de réponse élastique réduit par coefficients de comportement, elles sont présentées dans le Tableau 62 :

Sollicitation	Vérification	Etat Limite de Quasi-effondrement (NC)	Etat limite de Dommages Significatifs (SD)	Etat limite de Limitation de Dommages (LD)
Eléments soumis à la flexion	Déformations	-	-	Limitation du déplacement inter-étage
	Contraintes	Résistance ultime	Résistance ultime	Limite élastique
Eléments soumis à l'effort tranchant	Sollicitations	$V < VR$	-	-
Nœuds Poteau/Poutre	Sollicitations	$Vjhd < Vjhd,max$	-	-

Tableau 62. Liste des vérifications.

Pour l'état limite de dommages significatifs (SD), la seule vérification à faire est celle de la résistance ultime des éléments soumis à la flexion. Cette vérification est déjà réalisée et de façon plus contraignante pour l'état limite de quasi-effondrement (NC). L'étude de l'état limite de dommages significatifs n'est donc pas pertinente et nous nous limiterons aux vérifications des états limites NC et DL.

FLEXION

L'Eurocode 8 ne fournit pas d'expression particulière pour la vérification des sections soumises à flexion. On réalise donc une vérification classique des sections en béton armé sous flexion pour les poutres et sous flexion composée pour les poteaux et voiles.

Avec le logiciel SAP, sous une étude avec spectre de calcul, nous n'obtenons que les efforts maximaux et minimaux non concomitants. Pour considérer les cas les plus défavorables, nous considérons de façon concomitante les sollicitations de flexion et tranchant maximaux en valeur absolue avec la compression maximale puis traction maximale.

Nous vérifions de cette façon poutres, poteaux et voiles. Pour les poutres et les poteaux nous vérifions plusieurs sections d'un même élément, et pour les voiles nous vérifions la section d'encastrement en partie inférieure de chaque voile.

CISAILLEMENT

L'expression de la résistance à l'effort tranchant est définie dans l'expression (A.12) de l'Eurocode 8, partie 3, pour les structures en béton armé :

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}}\left[\frac{h-x}{2L_V}\min\left(N\,;\,0{,}55A_c f_c\right)+\left(1-0{,}05\,\min\left(5\,;\,\mu_\Delta^{pl}\right)\right)\cdot\left[0{,}16\,\max(0{,}5\,;\,100\rho_{tot})\left(1-0{,}16\,\min\left(5\,;\,\frac{L_V}{h}\right)\right)\sqrt{f_c}A_c+V_w\right]\right]$$

(EN 1998-3 §A.3.3.1 (1))

Pour les murs et les poteaux, il existe une deuxième restriction.

Poteaux : lorsque le rapport de portée d'effort tranchant L_V/h est inférieur ou égal à 2, la résistance à l'effort tranchant ne doit pas être prise supérieure à la valeur donnée par l'expression donnée ci-dessous (expression A.16 de l'Eurocode 8 Partie 3).

$$V_{R,max} = \frac{\frac{4}{7}\left(1-0{,}02\,\min\left(5\,;\,\mu_\Delta^{pl}\right)\right)}{\gamma_{el}}\left(1+1{,}35\,\frac{N}{A_c f_c}\right)\left(1+0{,}45\left(100\rho_{tot}\right)\right)\sqrt{\min\left(40\,;f_c\right)}b_w z\sin 2\delta$$

(EN 1998-3 §A.3.3.1 (3))

Murs : la résistance à l'effort tranchant ne peut être prise supérieure à la valeur donnée par l'expression suivante (expression A.15 de l'Eurocode 8 Partie 3).

$$V_{R,max} = \frac{0{,}85\left(1-0{,}06\,\min\left(5\,;\,\mu_\Delta^{pl}\right)\right)}{\gamma_{el}}\left(1+1{,}8\,\min\left(0{,}15\,;\,\frac{N}{A_c f_c}\right)\right)\left(1+0{,}25\,\max\left(1{,}75\,;\,100\rho_{tot}\right)\right)\left(1-0{,}2\,\min\left(2\,;\frac{L_V}{h}\right)\right)\sqrt{f_c}b_w z$$

(EN 1998-3 §A.3.3.1 (2))

Pour tous les éléments, on vérifiera l'effort tranchant dans les deux directions perpendiculaires à leur axe.

Pour chaque vérification, on considère l'effort tranchant maximal avec les efforts concomitants les plus défavorables : compression minimale et moment maximal en valeur absolue.

NOEUDS

L'Eurocode 8, Partie 1, nous fournit les expressions pour évaluer la demande et la capacité des nœuds poteau/poutre. Cependant, cette vérification n'est faite que pour les structures à haute ductilité pour lesquelles on considère la formation de rotules plastiques au niveau des nœuds. Dans notre cas, comme on ne travaille qu'avec des pourcentages de ferraillage dans les nœuds, nous ne considérons pas la formation de rotules plastiques dans les nœuds poteau/poutre et donc nous ne faisons pas de vérification supplémentaire pour ces éléments.

DEPLACEMENTS

Le déplacement maximal inter-étage admis par l'Eurocode 8 Partie 1 §4.4.3.2 est le suivant :

Pour des bâtiments avec éléments non structuraux composés de matériaux fragiles fixés à la structure (cas le plus défavorable) :

$d_r \cdot \nu \leq 0{,}005 \cdot h$ *(EN 1998-1 §4.4.3.2)*

avec :

d_r :déplacement de calcul entre étages

h : hauteur entre étages

ν : coefficient de réduction (ν=0,4 pour des bâtiments de catégorie III)

Le déplacement de calcul entre étages est le suivant :

$d_s = q_d \cdot d_e$ *(EN 1998-3 §4.3.4)*

avec :

q_d : le coefficient de comportement lié au déplacement (supposé égal à q)

d_e : déplacement déterminé par l'analyse linéaire basée sur le spectre de réponse de calcul.

Dans notre étude avec un spectre de réponse, nous obtenons les déplacements extrêmes de chaque point. Pour déterminer le déplacement maximal inter-étage, nous faisons la moyenne des déplacements maximaux d'un étage et nous les comparons aux déplacements minimaux des étages adjacents. Nous obtenons ainsi la différence de déplacements la plus défavorable entre étages.

Annexe 4 Analyse structurelle : Bâtiment existant en zone 2

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 63 à 71 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 2.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 2.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux

Tableau 63. Poteaux défaillants face à la flexion :

	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2	0 / 2	0 / 2
Nombre TOTAL	**0 / 178**	**0 / 178**	**0 / 178**	**0 / 178**

Tableau 64. Poteaux défaillants face au cisaillement :

	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	2 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2
TOTAL	**2 / 178**	**0 / 178**

Tableau 65. Récapitulatif des poteaux défaillants :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44
PREMIER ETAGE	2 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2
Nombre TOTAL	**2 / 178**
Pourcentage TOTAL	**1 %**

Poutres

Tableau 66. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	2 / 71	0 / 71	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	8 / 94	3 / 94	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	15 / 94	7 / 94	2 / 94	1 / 94
DEUXIEME ETAGE	8 / 94	8 / 94	0 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**33 / 356**	**18 / 356**	**2 / 356**	**1 / 356**

Tableau 67. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	0 / 94	0 / 94
DEUXIEME ETAGE	0 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**0 / 356**	**0 / 356**

Tableau 68. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	2 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	9 / 94
PREMIER ETAGE	15 / 94
DEUXIEME ETAGE	9 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**35 / 356**
Pourcentage TOTAL	**10 %**

Voiles

Tableau 69. Voiles défaillants face à la flexion :

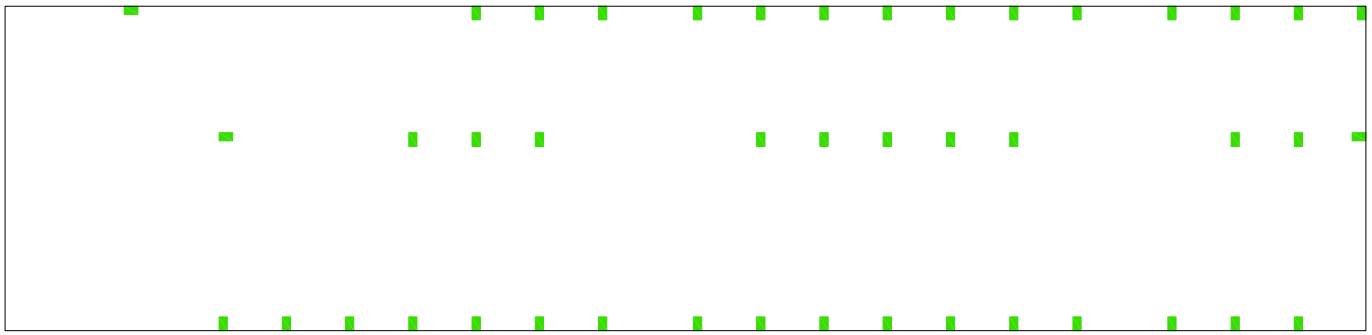
	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	5 / 53	4 / 53	3 / 53	1 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	4 / 14	3 / 14	4 / 14	1 / 14
PREMIER ETAGE	2 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**11 / 98**	**7 / 98**	**7 / 98**	**2 / 98**

Tableau 70. Voiles défaillants face au cisaillement :

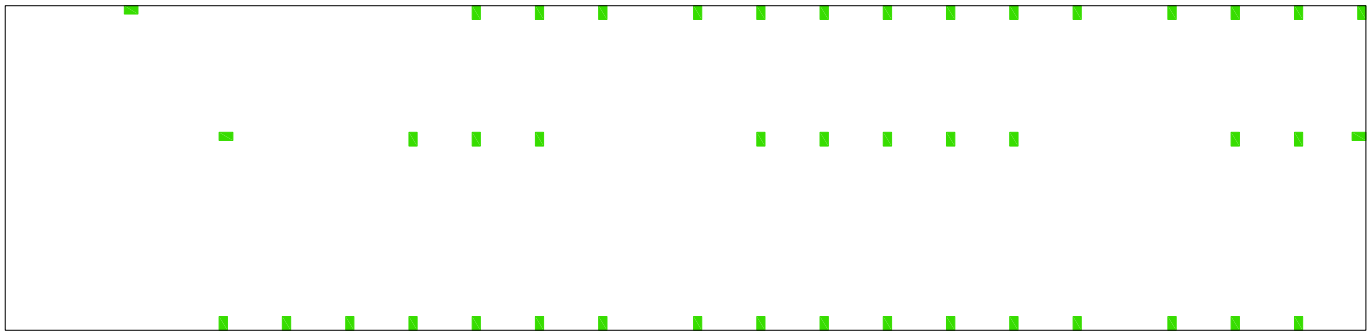
	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	4 / 53	10 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 14	7 / 14
PREMIER ETAGE	6 / 14	4 / 14
DEUXIEME ETAGE	2 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**22 / 98**	**26 / 98**

Tableau 71. Récapitulatif des voiles défaillants :

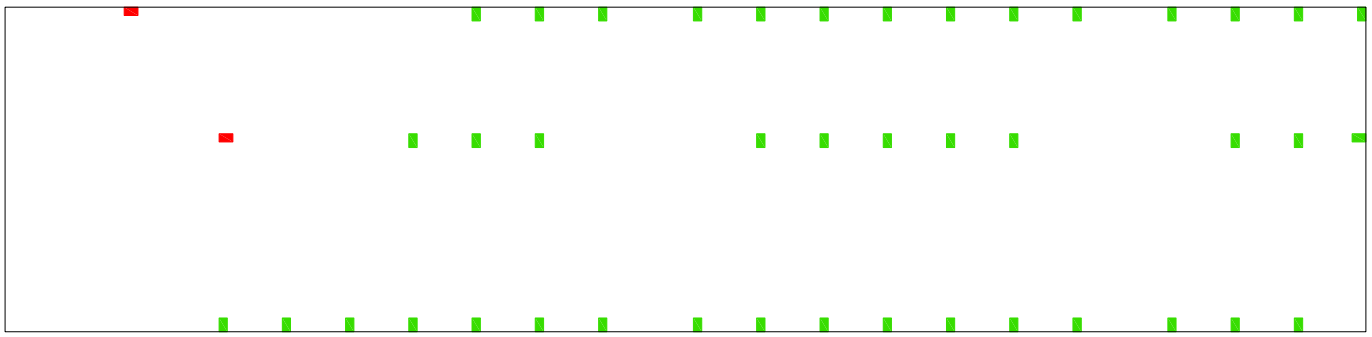
	Récapitulatif
SOUS-SOL	19 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	13 / 14
PREMIER ETAGE	9 / 14
DEUXIEME ETAGE	2 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**43 / 98**
Pourcentage TOTAL	**44 %**



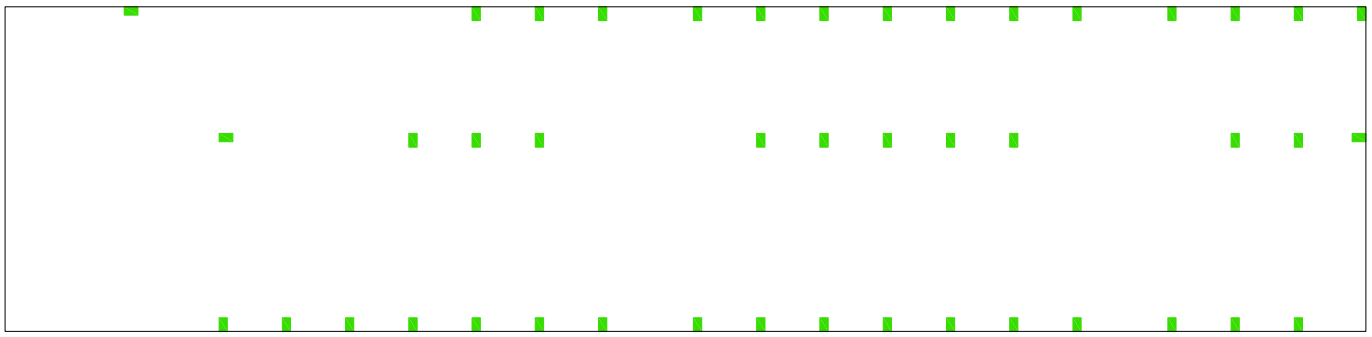
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



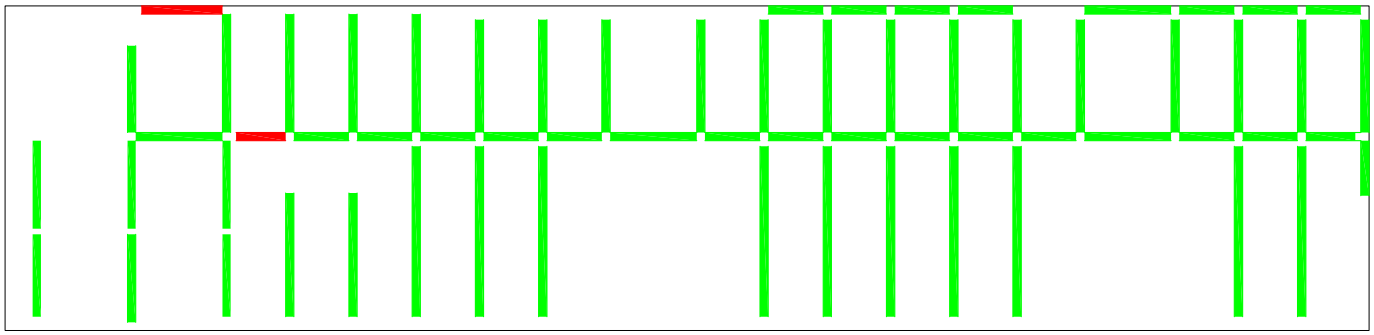
Premier Etage



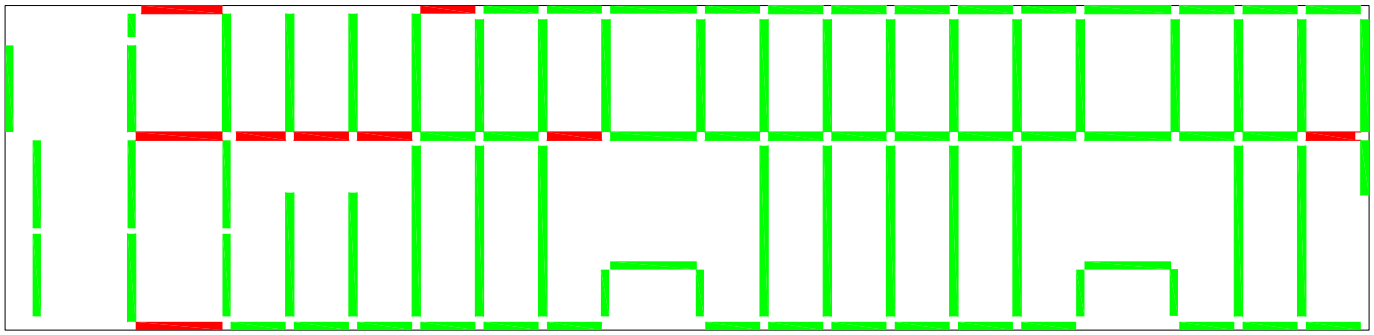
Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT

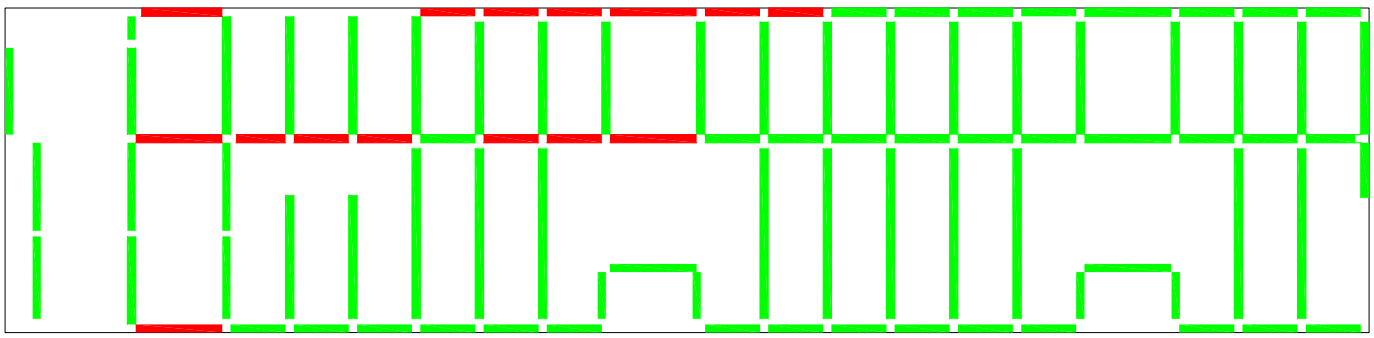
POTEAUX : CAS B



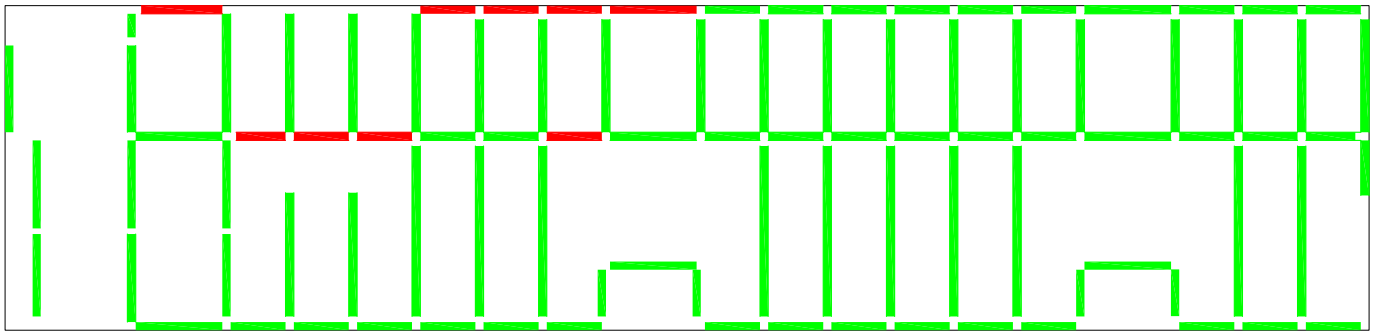
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



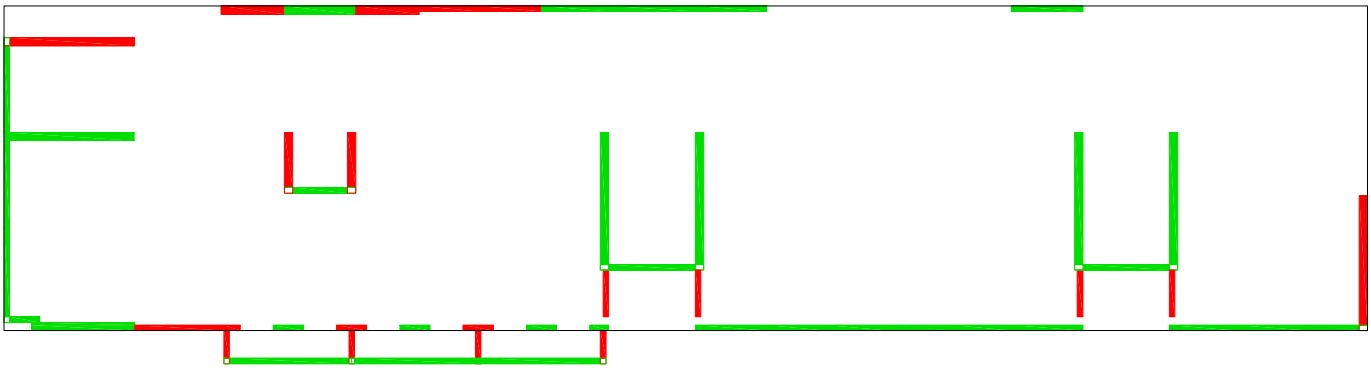
Premier Etage



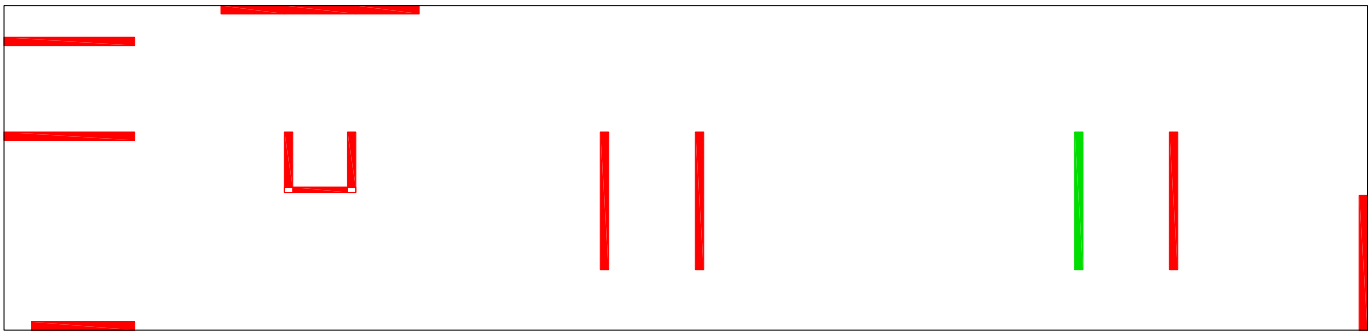
Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT

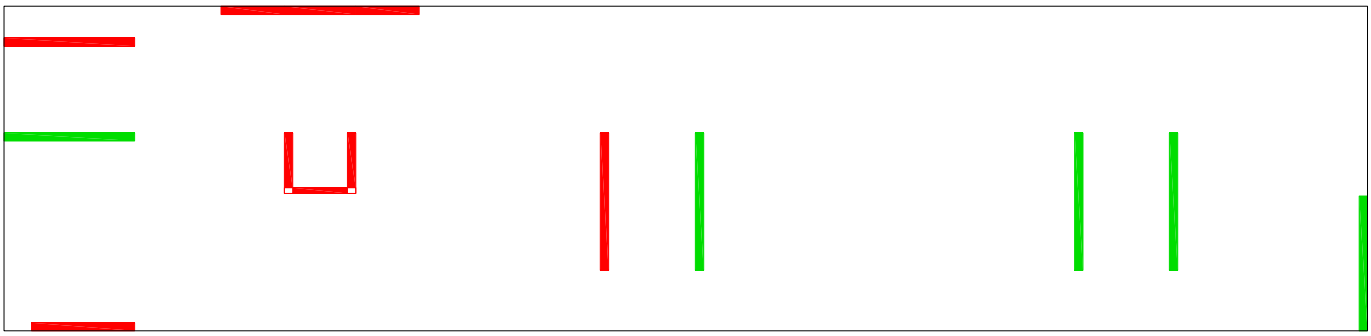
POUTRES : CAS B



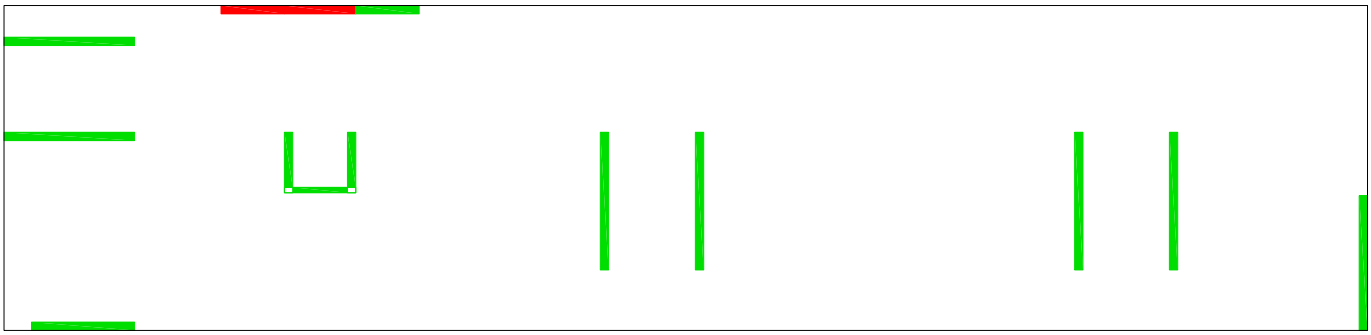
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT | VOILES : CAS B

Annexe 5 Renforcement par voiles rajoutés en zone 2

Renforcement principal

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 72 à 74 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 2.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 2.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux Tous les poteaux résistent à la flexion et au cisaillement.

Poutres Toutes les poutres résistent à la flexion et au cisaillement.

Voiles

Tableau 72. Voiles défaillants face à la flexion :

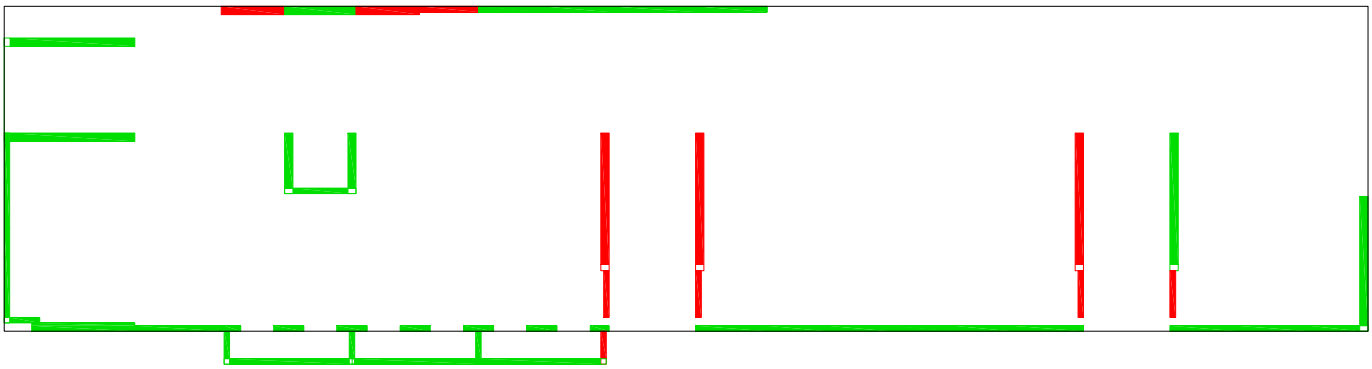
	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	1 / 53	1 / 53	1 / 53	0 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	2 / 14	0 / 14	1 / 14	0 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**3 / 98**	**1 / 98**	**1 / 98**	**0 / 98**

Tableau 73. Voiles défaillants face au cisaillement :

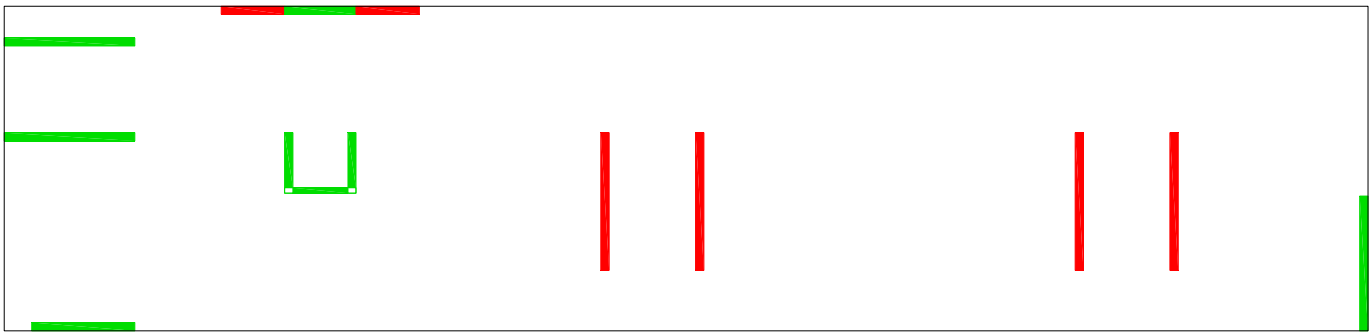
	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	2 / 53	8 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	1 / 14	5 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	2 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**3 / 98**	**15 / 98**

Tableau 74. Récapitulatif des voiles défaillants :

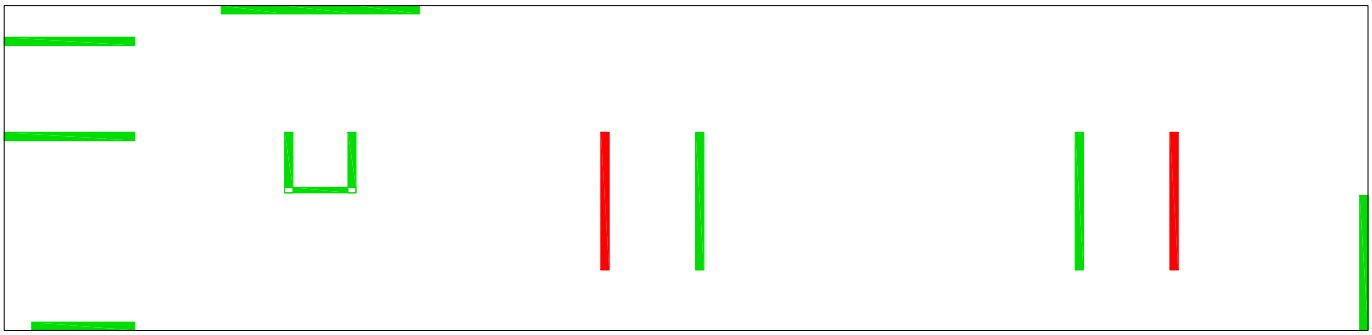
	Récapitulatif
SOUS-SOL	11 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	6 / 14
PREMIER ETAGE	2 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**19 / 98**
Pourcentage TOTAL	**19 %**



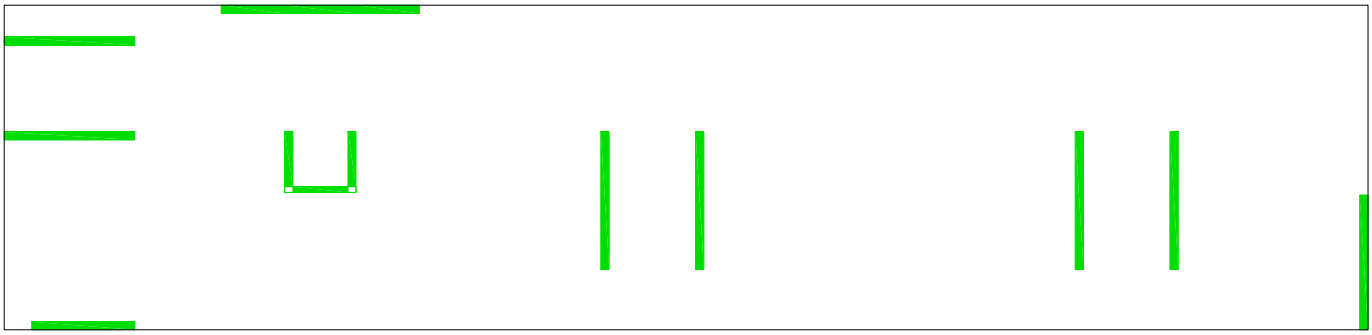
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

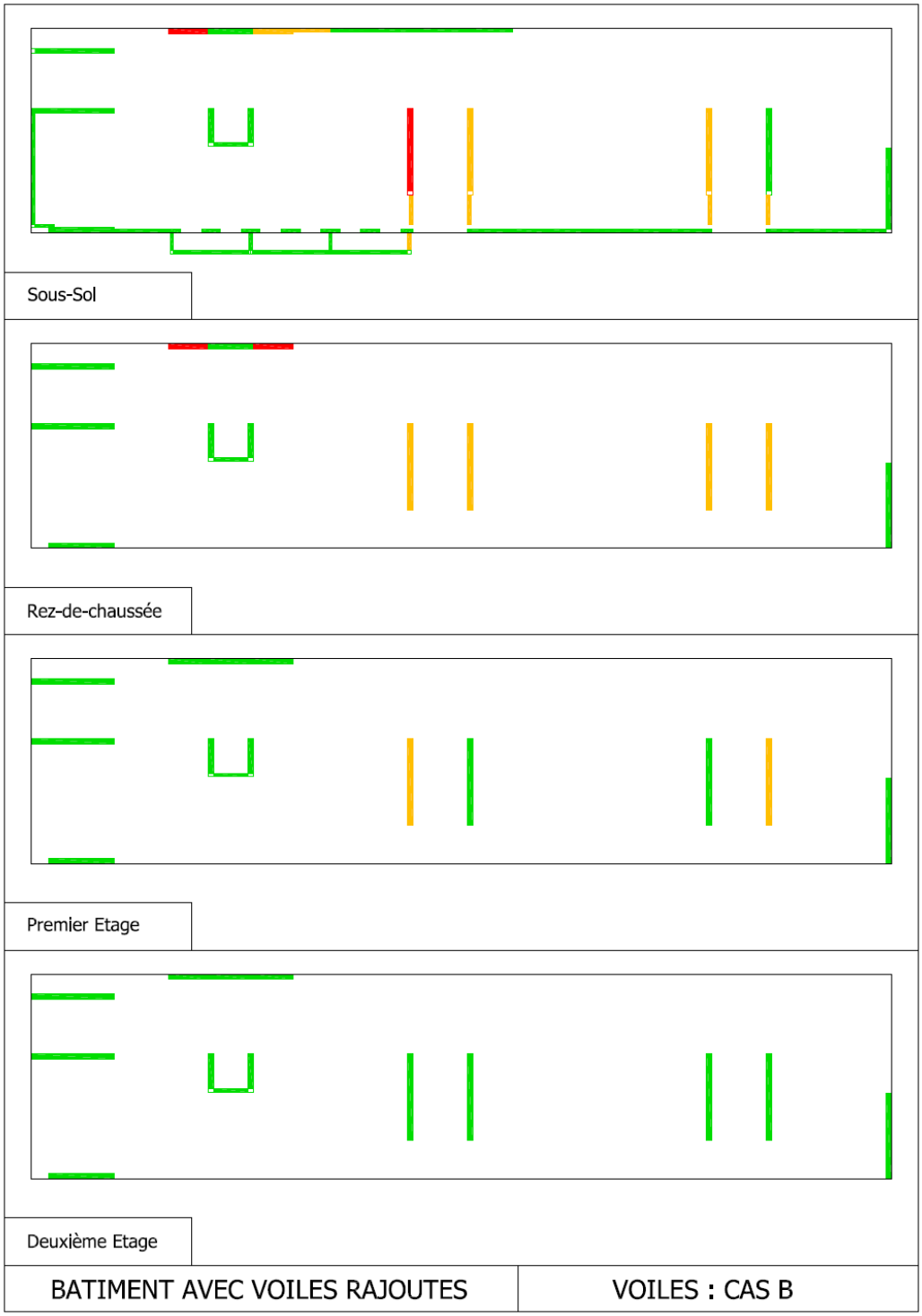
BATIMENT AVEC VOILES RAJOUTES	VOILES : CAS B

Renforcement complémentaire-Voiles

Les éléments à renforcer de façon complémentaire sont présentés dans le tableau suivant :

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement



Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 75. Renforcement vertical à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 30 en Y SS 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 17D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 10D	3	150	0,48	3,5	21
Voile 30 en Y RDC 11D	3	150	0,48	3,5	21
Voile 30 en Y RDC 17D	3	150	0,48	3,5	21
Voile 30 en Y RDC 18D	3	150	0,48	3,5	21
Voile 30 en Y PREMIER 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y PREMIER 18D	1	150	0,48	3,5	7
				TOTAL	112 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 76. Renforcement horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X SS A07	1	3	1	0	150	0,48	67	2,15	11
Voile 20 en Y SS 10G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 20 en Y SS 10H	2	3	0	0	150	0,48	175	1,2	7
Voile 20 en Y SS 11G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 20 en Y SS 17G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 20 en Y SS 18G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 30 en X SS A06	1	2	3	0	150	0,48	113	2,3	18
Voile 30 en X RDC A06	1	3	1	0	150	0,48	200	2,3	12
								TOT	103 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à la flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 77. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 30 en X SS A04	0	5	2	300	0,48	33	3,5	112
Voile 30 en Y SS 10D	2	0	0	300	0,48	4300	3,5	14
Voile 30 en X RDC A04	7	0	0	300	0,48	33	3,5	49
Voile 30 en X RDC A06	0	7	0	300	0,48	33	3,5	98
							TOT	273 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement TFC est symétrique des deux côtés des voiles.

Annexe 6 Renforcement par croix de St André en zone 2

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 78 à 83 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 2.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 2.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux Tous les poteaux résistent à la flexion et au cisaillement.

Poutres

Tableau 78. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	0 / 94	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	2 / 94	2 / 94	1 / 94	0 / 94
DEUXIEME ETAGE	2 / 94	3 / 94	1 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**4 / 356**	**5 / 356**	**2 / 356**	**0 / 356**

Tableau 79. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	0 / 94	0 / 94
DEUXIEME ETAGE	0 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**0 / 356**	**0 / 356**

Tableau 80. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94
PREMIER ETAGE	2 / 94
DEUXIEME ETAGE	3 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**5 / 356**
Pourcentage TOTAL	**1 %**

Voiles

Tableau 81. Voiles défaillants face à la flexion :

	COMB 2.3	COMB 2.4	COMB 2.5	COMB 2.6
SOUS-SOL	1 / 53	0 / 53	1 / 53	0 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	2 / 14	0 / 14	1 / 14	0 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**3 / 98**	**0 / 98**	**2 / 98**	**0 / 98**

Tableau 82. Voiles défaillants face au cisaillement :

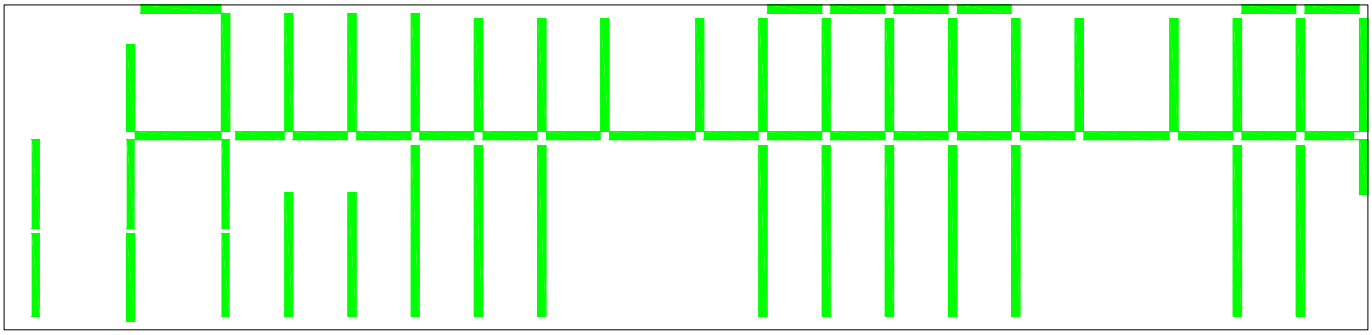
	COMB 2.3	COMB 2.4
SOUS-SOL	3 / 53	13 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	1 / 14	5 / 14
PREMIER ETAGE	2 / 14	1 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**6 / 98**	**19 / 98**

Tableau 83. Récapitulatif des voiles défaillants :

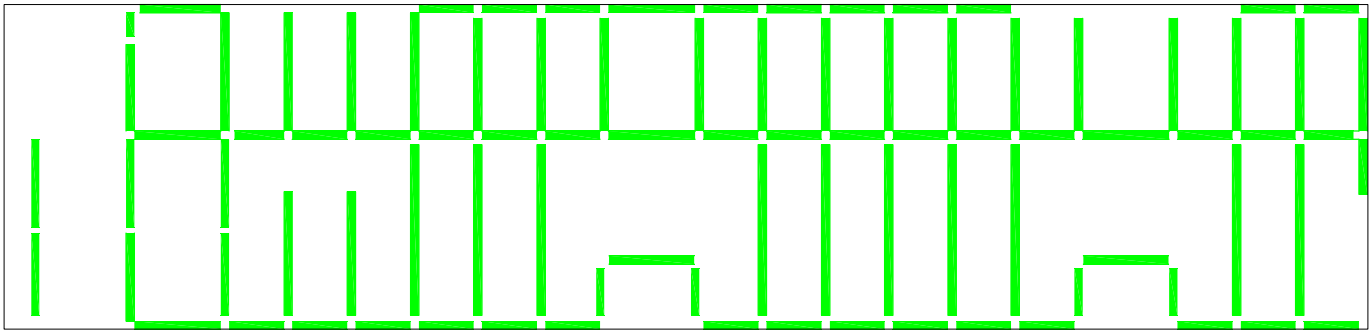
	Récapitulatif
SOUS-SOL	16 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	7 / 14
PREMIER ETAGE	3 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**26 / 98**
Pourcentage TOTAL	**27 %**

Croix de St André

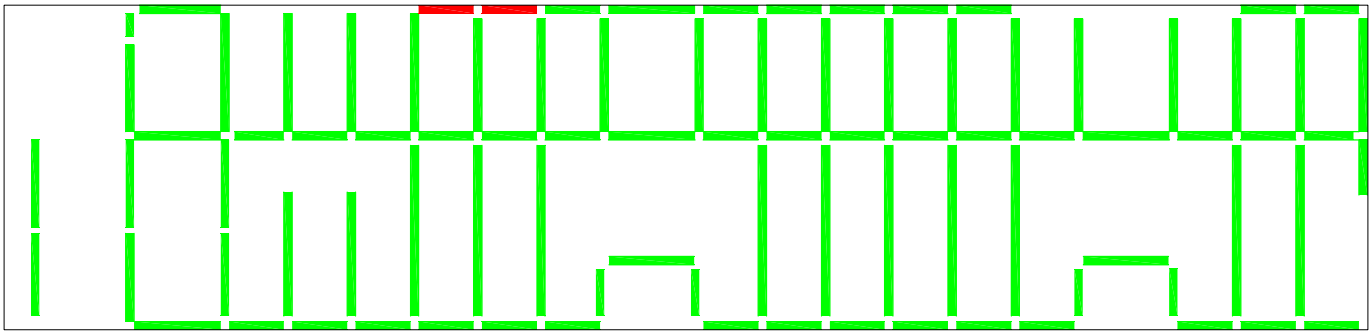
Les efforts dans les croix ont aussi été vérifiés. On a vérifié la résistance face à la traction, à la compression et le non flambement de celles-ci. Du fait d'avoir choisi des sections à forte inertie pour attirer les efforts de la structure et soulager les voiles, la résistance de ces croix est bien supérieure aux sollicitations qu'elles reçoivent et elles sont largement justifiées pour les combinaisons sismiques étudiées.



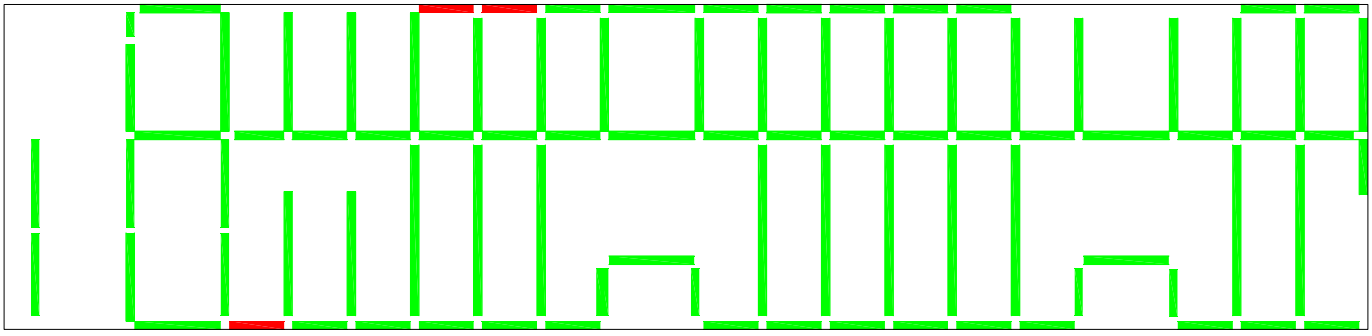
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



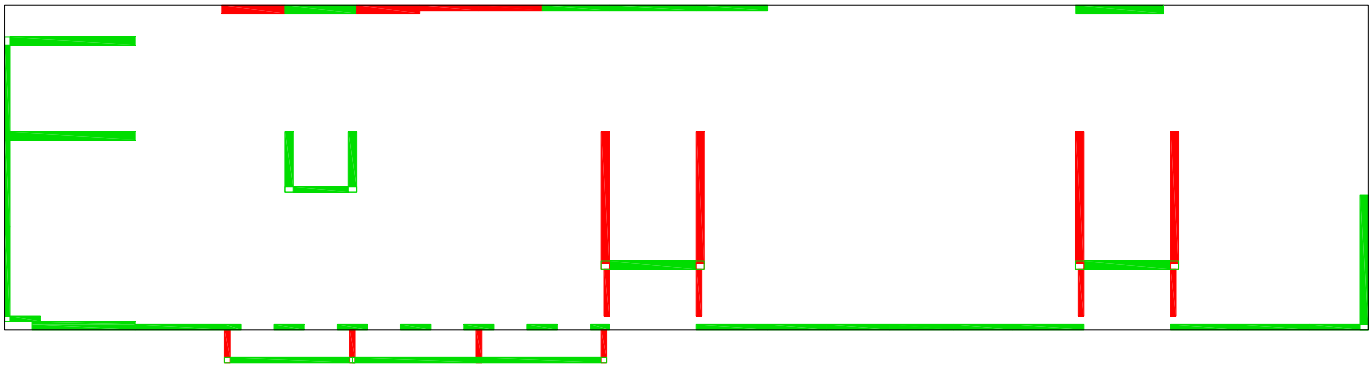
Premier Etage



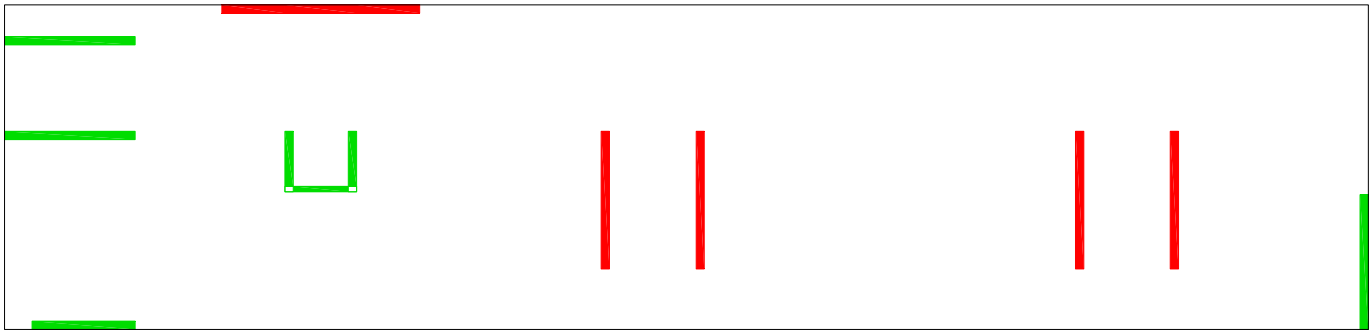
Deuxième Etage

CROIX DE ST ANDRE

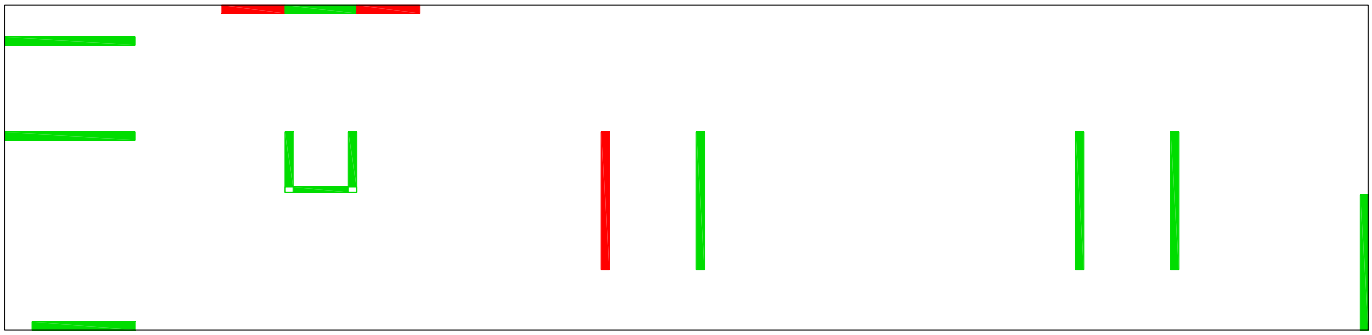
POUTRES : CAS B



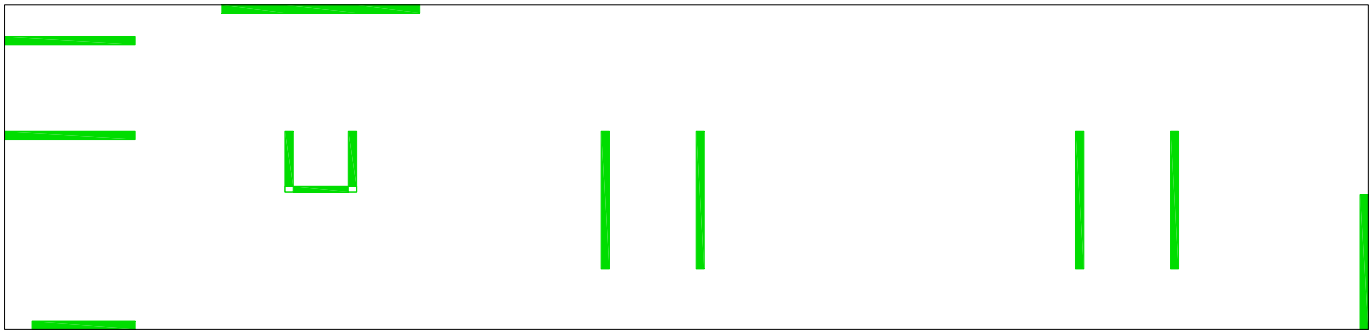
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

CROIX DE ST ANDRE

VOILES : CAS B

Renforcement complémentaire-Poutres

Les éléments à renforcer de façon complémentaire sont présentés dans le tableau suivant :

Eléments défaillants à la flexion

Renforcement à a flexion et au tranchant

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Voici le détail des renforts dimensionnés pour les différentes poutres :

Tableau 84. Renforcement des poutres :

POUTRES en X	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur des bandes (m)
PREMIER A07	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER A08	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME A07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME A08	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME G04	1	0	0	1,65	3,30
				TOTAL	22 m

Il s'agit de couches de 300mm de largeur et 0,48mm d'épaisseur.

Renforcement complémentaire-Voiles

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement

Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 85. Renforcement vertical à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 30 en Y SS 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 17D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 17D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 18D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y PREMIER 10D	1	150	0,48	3,5	7
				TOTAL	56 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 86. Renforcement horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X SS A07	1	4	1	0	150	0,48	13	2,15	13
Voile 20 en X SS A08	1	5	0	0	150	0,48	13	2,3	12
Voile 20 en Y SS 04H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 06H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 08H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 10G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 20 en Y SS 10H	2	3	0	0	150	0,48	175	1,2	7
Voile 20 en Y SS 11G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14

Voile 20 en Y SS 17G	1	1	2	0	150	0,48	175	2,3	12
Voile 20 en Y SS 18G	1	1	2	0	150	0,48	175	2,3	12
Voile 30 en X RDC A05	1	4	2	0	150	0,48	60	2,6	21
Voile 30 en X RDC A06	1	6	0	0	150	0,48	60	2,3	14
Voile 30 en X PREMIER A04	1	6	0	0	150	0,48	60	2,3	14
Voile 30 en X PREMIER A06	1	6	0	0	150	0,48	60	2,3	14
Voile 30 en Y RDC 06D	1	6	0	0	150	0,48	60	2,1	13
								TOT	171 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à la flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 87. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 30 en X RDC A04	3	0	0	300	0,48	700	3,5	21
Voile 30 en X RDC A06	4	3	0	300	0,48	33	4,5	90
Voile 30 en X SS A04	6	1	0	300	0,48	33	5,5	88
							TOT	199 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement TFC est symétrique dans les deux faces des voiles.

Annexe 7 Renforcement par fibres de carbone en zone 2

On présente dans cette annexe les éléments renforcés par fibres de carbone.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 2.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 2.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 2.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Renforcement Poutres

Renforcement à la flexion et au tranchant

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Voici le détail des renforts dimensionnés pour les différentes poutres :

Tableau 88. Renfort des poutres :

POUTRES en X	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur des bandes (m)
SS A03	1	0	0	2,44	4,88
SS C04	1	0	56	1,65	3,94
RDC A03	1	1	0	2,44	7,31
RDC A07	1	1	0	1,61	4,84
RDC C03	1	0	0	2,44	4,88
RDC C04	1	1	0	1,95	5,85
RDC C05	1	0	0	1,95	3,90
RDC C06	1	0	0	1,73	3,45
RDC C09	1	0	0	1,84	3,68
RDC C20	1	0	0	1,84	3,68
RDC G03	1	0	0	2,44	4,88
PREMIER A03	1	1	0	2,44	7,31
PREMIER A07	1	1	407	1,61	9,40
PREMIER A08	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER A09	1	0	0	1,84	3,68
PREMIER A10	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER A11	1	0	0	1,95	3,90
PREMIER A12	1	0	0	1,61	3,23

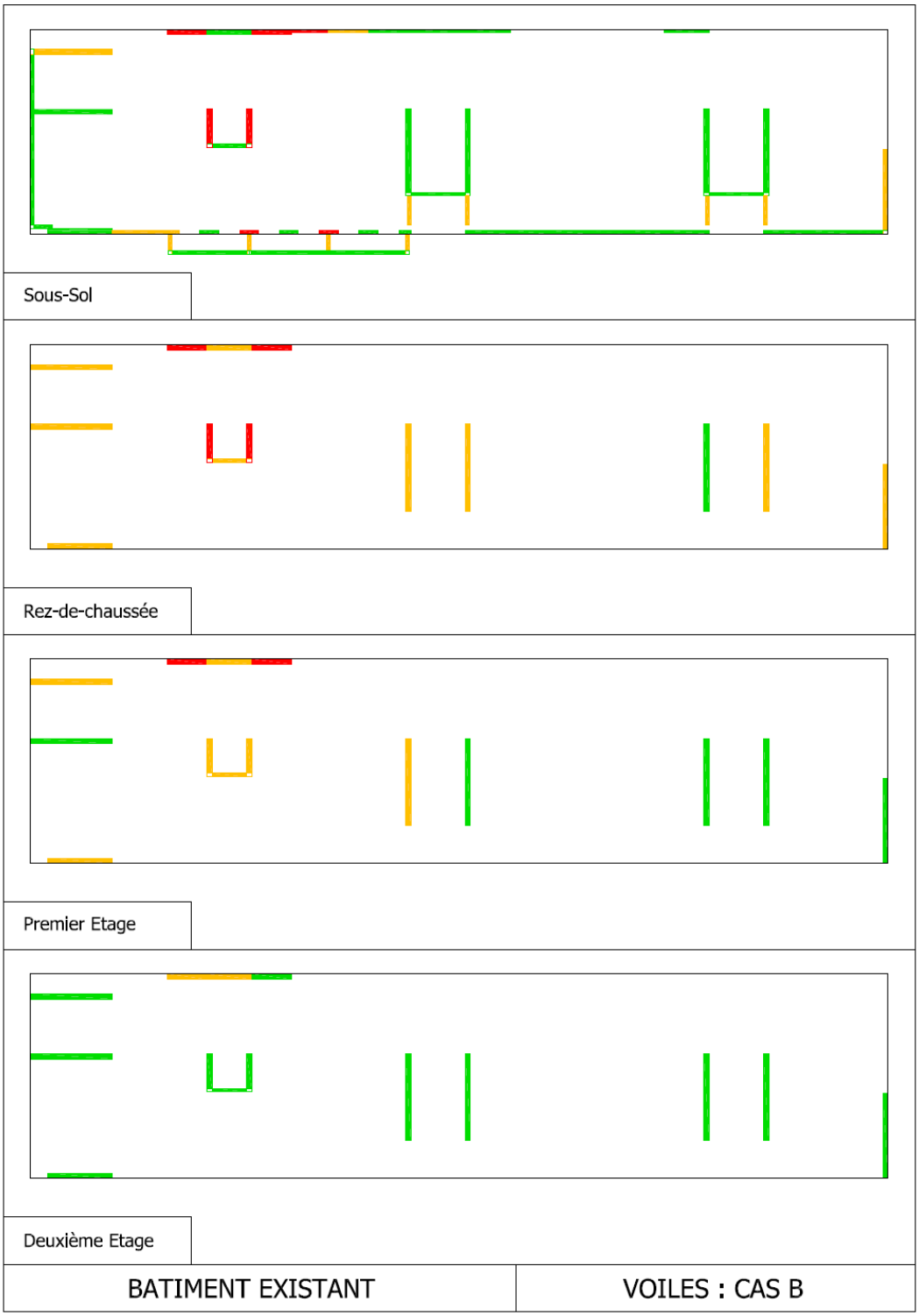
PREMIER C03	0	1	0	2,44	2,44
PREMIER C04	1	1	252	1,65	7,84
PREMIER C05	1	0	0	1,95	3,90
PREMIER C06	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER C08	1	0	0	1,73	3,45
PREMIER C09	1	0	0	1,84	3,68
PREMIER C10	1	0	0	2,36	4,73
PREMIER G03	1	0	0	2,44	4,88
DEUXIEME A03	1	0	0	2,44	4,88
DEUXIEME A07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME A08	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME A09	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME A10	1	1	0	2,36	7,09
DEUXIEME A11	1	0	0	1,95	3,90
DEUXIEME C04	1	0	0	1,65	3,30
DEUXIEME C05	1	0	0	1,95	3,90
DEUXIEME C06	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME C09	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME F10	1	1	0	2,3625	7,0875
				TOTAL	178 m

Il s’agit de couches de 300mm de largeur et 0,48mm d’épaisseur.

Renforcement Voiles

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement



Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 89. Renfort vertical à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 20 en X RDC D05	3	150	0,48	3,5	21
Voile 20 en X RDC D05	4	150	0,48	3,5	28
Voile 30 en X PREMIER C02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X PREMIER G02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X RDC B02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X RDC C02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X RDC G02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X SS C02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en X RDC G02	1	150	0,48	3,5	7
				TOTAL	98 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 90. Renfort horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X PREMIER D05	1	2	3	0	150	0,48	13	2,6	21
Voile 20 en X RDC D05	1	0	4	0	150	0,48	67	2,6	21
Voile 20 en X SS A08	1	1	3	0	150	0,48	67	2,3	16
Voile 20 en X SS G03	1	2	3	0	150	0,48	13	3,25	26
Voile 20 en Y SS 10H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 04H	2	3	0	0	150	0,48	175	1,2	7
Voile 20 en Y SS 06H	2	3	0	0	150	0,48	175	1,2	7
Voile 20 en Y SS 08H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 10G	1	1	3	0	150	0,48	67	2,3	16
Voile 20 en Y SS 10H	2	3	0	0	150	0,48	175	1,2	7
Voile 20 en Y SS 11G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14
Voile 20 en Y SS 17G	1	1	2	0	150	0,48	175	2,3	12
Voile 20 en Y SS 18G	1	2	2	0	150	0,48	67	2,3	14

Voile 30 en X DEUXIEME A04	1	4	0	0	150	0,48	200	2,3	9
Voile 30 en X DEUXIEME A05	1	7	0	0	150	0,48	25	2,6	18
Voile 30 en X PREMIER A05	1	0	7	0	150	0,48	25	2,6	36
Voile 30 en X RDC A05	1	6	2	0	150	0,48	0	2,6	26
Voile 30 en X SS A06	1	6	2	0	150	0,48	0	2,3	23
Voile 30 en Y PREMIER 05D	1	7	0	0	150	0,48	25	2,1	15
								TOT	298 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à la flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 91. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X SS A07	6	0	0	300	0,48	70	3,5	42
Voile 30 en X PREMIER A04	1	6	0	300	0,48	33	3,5	91
Voile 30 en X PREMIER A06	1	6	0	300	0,48	33	3,5	91
Voile 30 en X RDC A04	Pas possible						3,5	-
Voile 30 en X RDC A06	Pas possible						3,5	-
Voile 30 en X SS A04	Pas possible						3,5	-
Voile 30 en X SS A06	3	0	0	300	0,48	700	3,5	21
Voile 20 en X SS G06	2	0	0	300	0,48	500	3,5	14
Voile 20 en X SS G08	1	0	0	300	0,48	-	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 06D	0	3	3	300	0,48	60	3,5	105
Voile 30 en Y SS 05D	0	3	3	300	0,48	60	3,5	105
Voile 30 en Y SS 06D	0	3	3	300	0,48	60	3,5	105
Voile 30 en Y RDC 05D	Pas possible						3,5	-
							TOT	581 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement TFC est symétrique dans les deux faces des voiles.

Annexe 8 Analyse structurelle : Bâtiment existant en zone 5

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 92 à 100 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 1.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 1.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux

Tableau 92. Poteaux défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	1 / 44	1 / 44	1 / 44	1 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	12 / 44	16 / 44	1 / 44	5 / 44
PREMIER ETAGE	8 / 44	11 / 44	2 / 44	3 / 44
DEUXIEME ETAGE	11 / 44	15 / 44	6 / 44	10 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2
Nombre TOTAL	**34 / 178**	**45 / 178**	**12 / 178**	**21 / 178**

Tableau 93. Poteaux défaillants face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	1 / 44	1 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	2 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2
TOTAL	**1 / 178**	**3 / 178**

Tableau 94. Récapitulatif des poteaux défaillants :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	1 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	16 / 44
PREMIER ETAGE	12 / 44
DEUXIEME ETAGE	17 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2
Nombre TOTAL	**48 / 178**
Pourcentage TOTAL	**27 %**

Poutres

Tableau 95. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	20 / 71	21 / 71	10 / 71	10 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	57 / 94	63 / 94	40 / 94	34 / 94
PREMIER ETAGE	58 / 94	64 / 94	42 / 94	41 / 94
DEUXIEME ETAGE	42 / 94	48 / 94	23 / 94	30 / 94
TROISIEME ETAGE	1 / 3	3 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**178 / 356**	**198 / 356**	**115 / 356**	**115 / 356**

Tableau 96. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 71	2 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	3 / 94	4 / 94
PREMIER ETAGE	4 / 94	4 / 94
DEUXIEME ETAGE	1 / 94	4 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**8 / 356**	**14 / 356**

Tableau 97. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	26 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	69 / 94
PREMIER ETAGE	73 / 94
DEUXIEME ETAGE	53 / 94
TROISIEME ETAGE	2 / 3
Nombre TOTAL	**223 / 356**
Pourcentage TOTAL	**63 %**

Voiles

Tableau 98. Voiles défaillants face à la flexion :

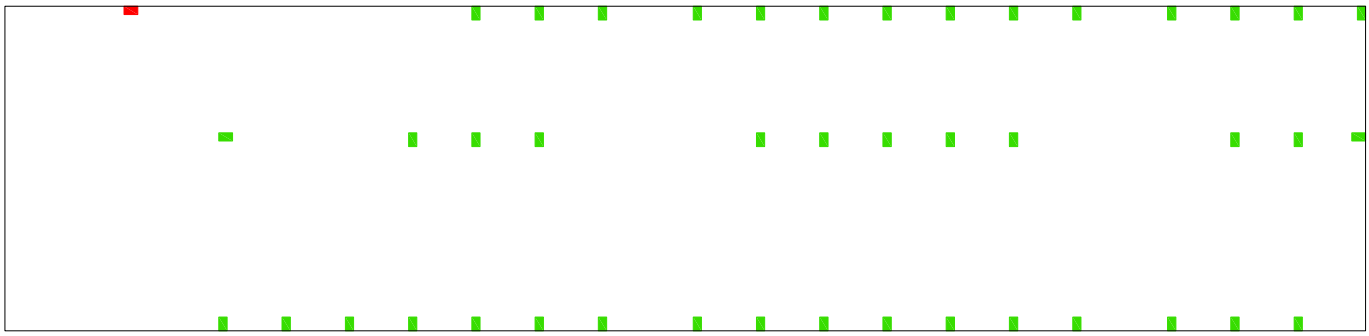
	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	27 / 53	31 / 53	24 / 53	28 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	14 / 14	14 / 14	13 / 14	13 / 14
PREMIER ETAGE	8 / 14	8 / 14	8 / 14	7 / 14
DEUXIEME ETAGE	2 / 14	2 / 14	1 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**52 / 98**	**56 / 98**	**46 / 98**	**48 / 98**

Tableau 99. Voiles défaillants face au cisaillement :

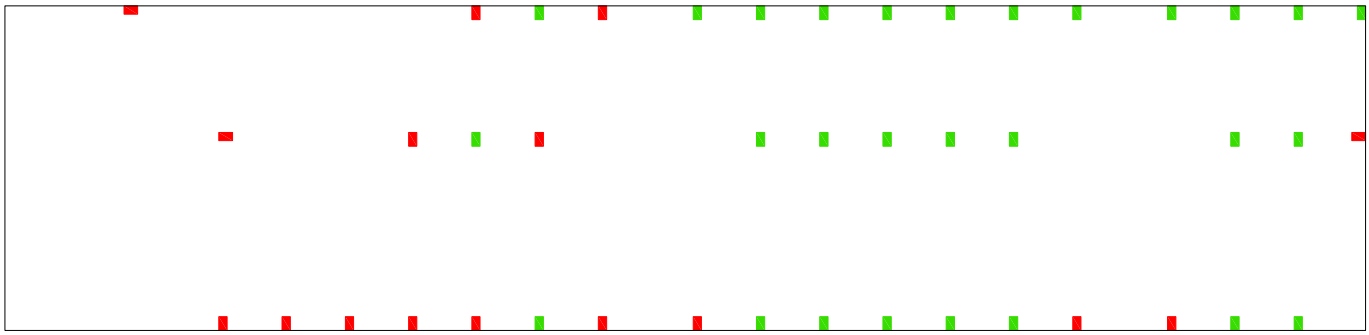
	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	14 / 53	9 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 14	0 / 14
PREMIER ETAGE	5 / 14	6 / 14
DEUXIEME ETAGE	5 / 14	7 / 14
TROISIEME ETAGE	1 / 3	0 / 3
TOTAL	**25 / 98**	**22 / 98**

Tableau 100. Récapitulatif des voiles défaillants :

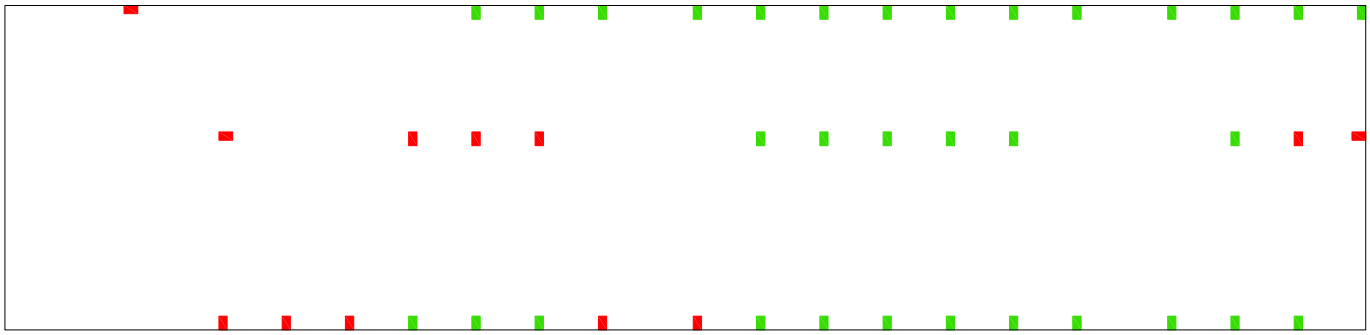
	Récapitulatif
SOUS-SOL	45 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	14 / 14
PREMIER ETAGE	14 / 14
DEUXIEME ETAGE	11 / 14
TROISIEME ETAGE	1 / 3
Nombre TOTAL	**85 / 98**
Pourcentage TOTAL	**87 %**



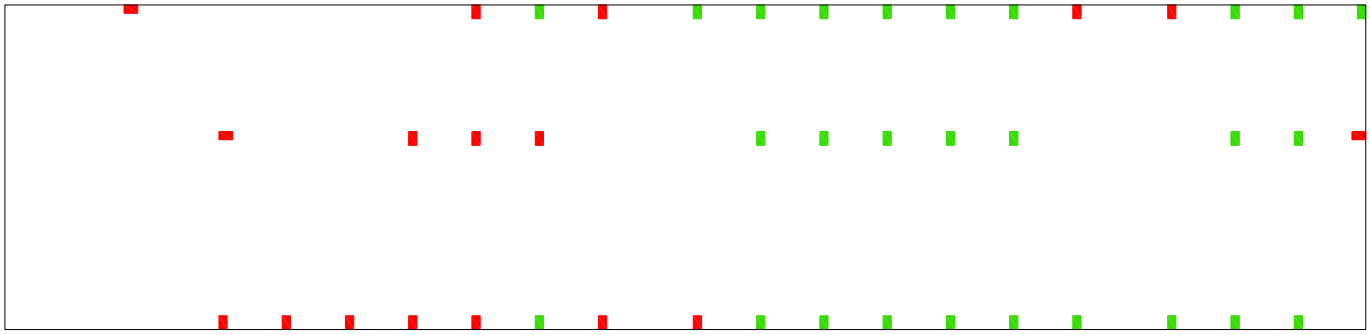
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



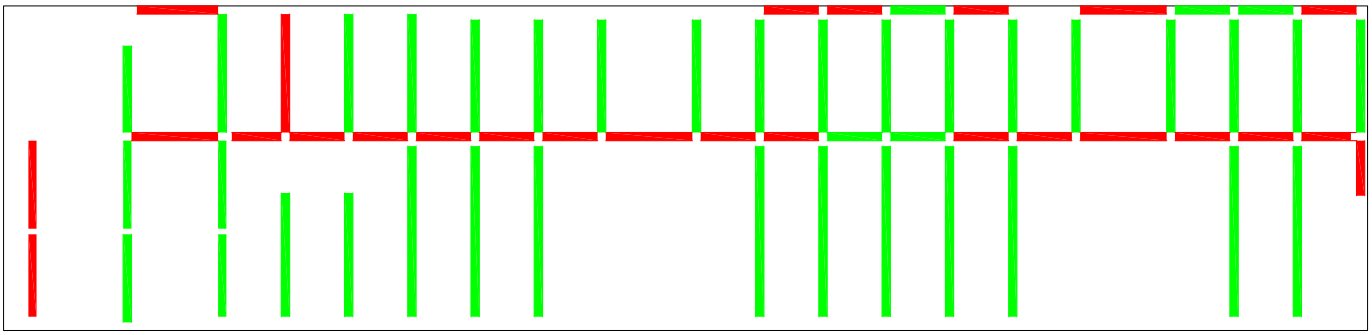
Premier Etage



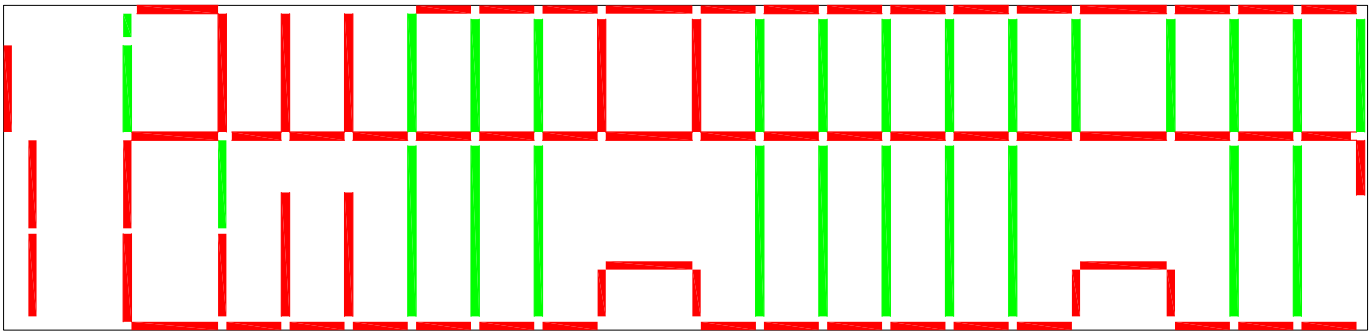
Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT

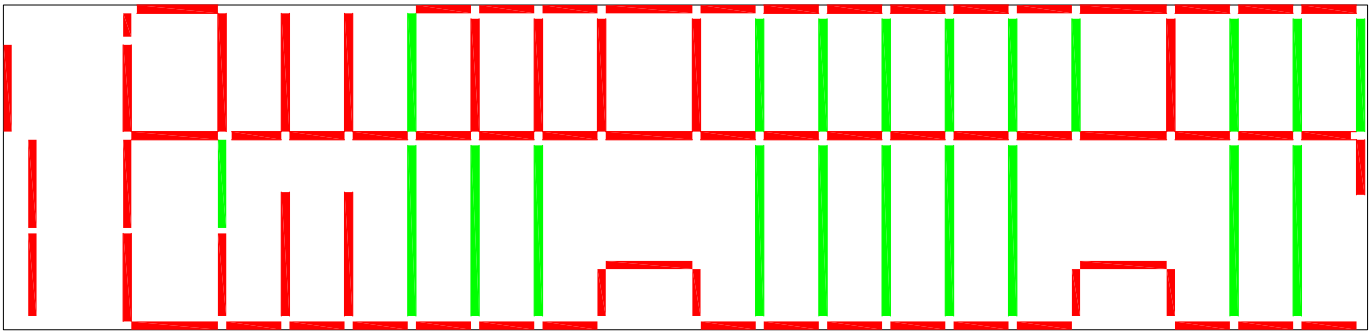
POTEAUX : CAS A



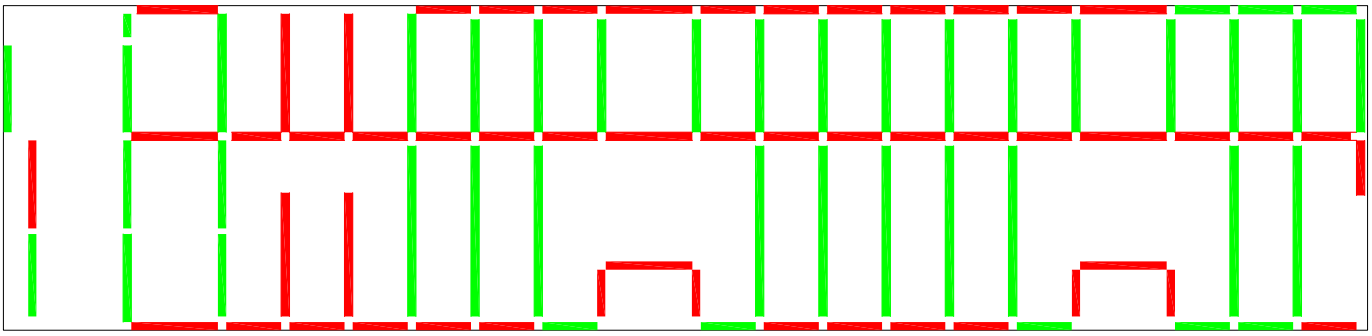
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



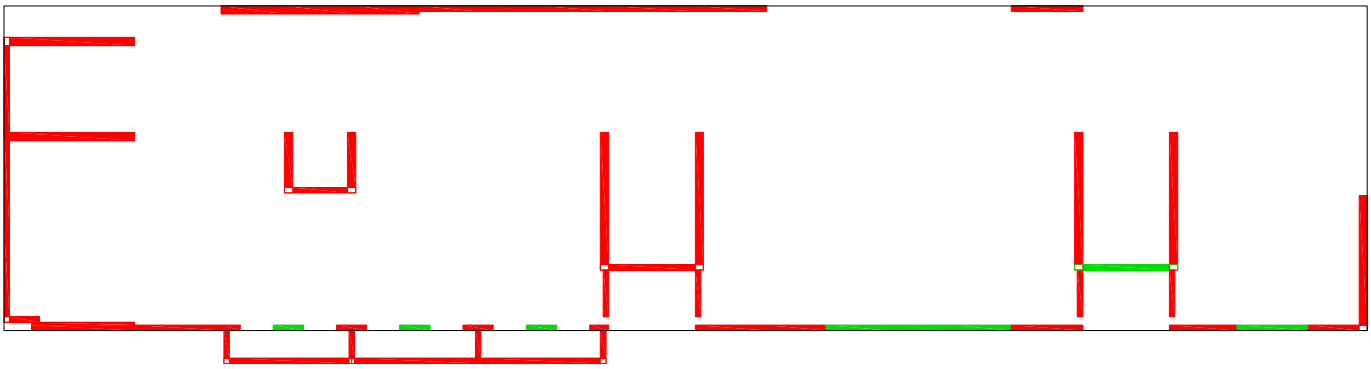
Premier Etage



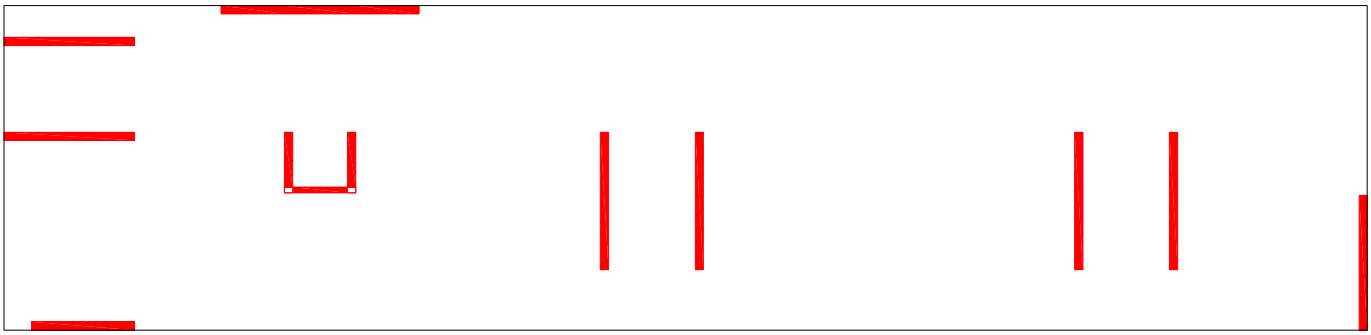
Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT

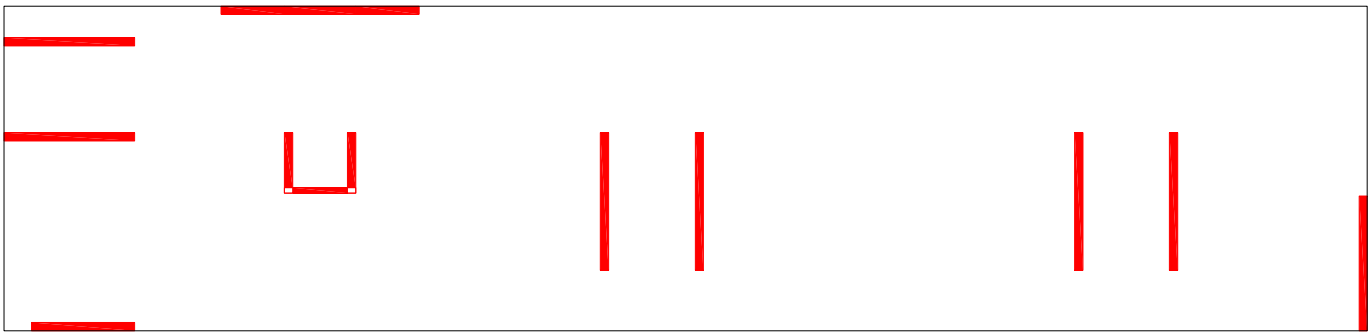
POUTRES : CAS A



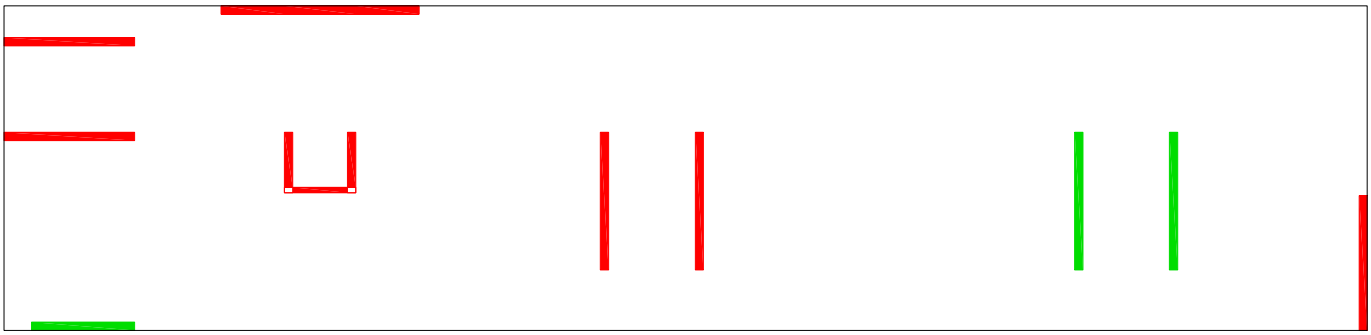
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

BATIMENT EXISTANT

VOILES : CAS A

Annexe 9 Renforcement par raidisseurs en façade en zone 5

Renforcement principal

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 101 à 109 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 1.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 1.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux

Tableau 101. Poteaux défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	0 / 44	1 / 44	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 44	5 / 44	0 / 44	1 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	6 / 44	0 / 44	1 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	4 / 44	0 / 44	2 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2	0 / 2	2 / 2	0 / 2
Nombre TOTAL	**7 / 178**	**16 / 178**	**2 / 178**	**4 / 178**

Tableau 102. Poteaux défaillants face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2
TOTAL	**0 / 178**	**0 / 178**

Tableau 103. Récapitulatif des poteaux défaillants :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	1 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 44
PREMIER ETAGE	6 / 44
DEUXIEME ETAGE	4 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2
Nombre TOTAL	**18 / 178**
Pourcentage TOTAL	**10 %**

Poutres

Tableau 104. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	0 / 71	3 / 71	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 94	28 / 94	2 / 94	10 / 94
PREMIER ETAGE	17 / 94	41 / 94	10 / 94	28 / 94
DEUXIEME ETAGE	19 / 94	42 / 94	7 / 94	31 / 94
TROISIEME ETAGE	1 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**42/ 356**	**114 / 356**	**19 / 356**	**69 / 356**

Tableau 105. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	5 / 94
PREMIER ETAGE	1 / 94	2 / 94
DEUXIEME ETAGE	0 / 94	4 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**1 / 356**	**11 / 356**

Tableau 106. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	3 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	33 / 94
PREMIER ETAGE	43 / 94
DEUXIEME ETAGE	46 / 94
TROISIEME ETAGE	1 / 3
Nombre TOTAL	**126 / 356**
Pourcentage TOTAL	**35 %**

Voiles

Tableau 107. Voiles défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	1 / 53	21 / 53	0 / 53	15 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	1 / 14	9 / 14	0 / 14	7 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	1 / 14	0 / 14	1 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	1 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**2 / 98**	**32 / 98**	**0 / 98**	**23 / 98**

Tableau 108. Voiles défaillants face au cisaillement :

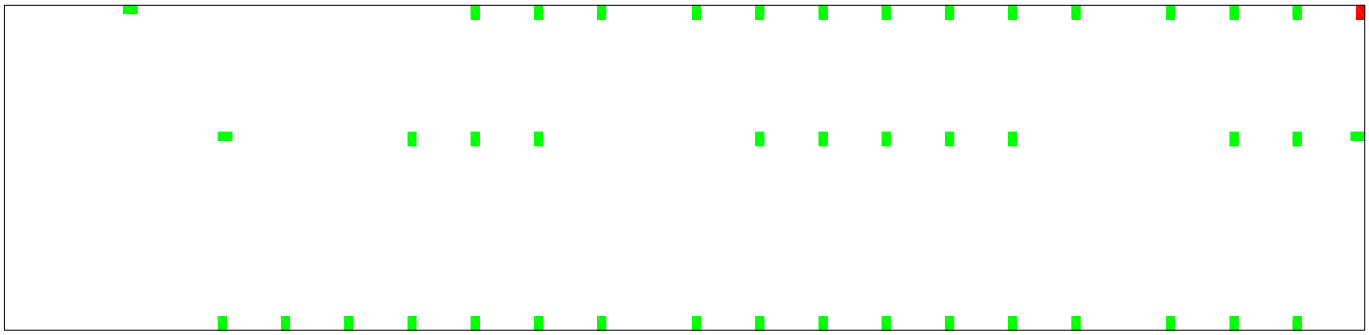
	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	11 / 53	5 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	8 / 14	1 / 14
PREMIER ETAGE	4 / 14	9 / 14
DEUXIEME ETAGE	1 / 14	5 / 14
TROISIEME ETAGE	2 / 3	2 / 3
TOTAL	**26 / 98**	**22 / 98**

Tableau 109. Récapitulatif des voiles défaillants :

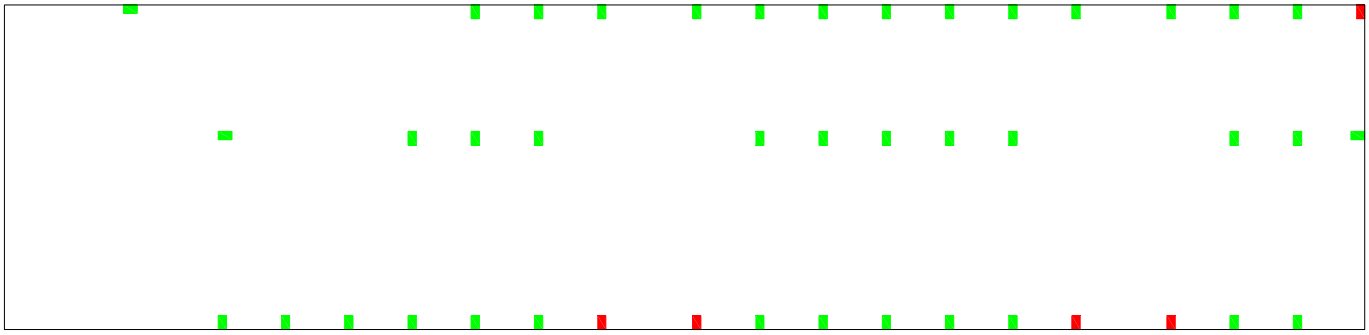
	Récapitulatif
SOUS-SOL	27 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	12 / 14
PREMIER ETAGE	10 / 14
DEUXIEME ETAGE	7 / 14
TROISIEME ETAGE	2 / 3
Nombre TOTAL	**58 / 98**
Pourcentage TOTAL	**59 %**

Raidisseurs

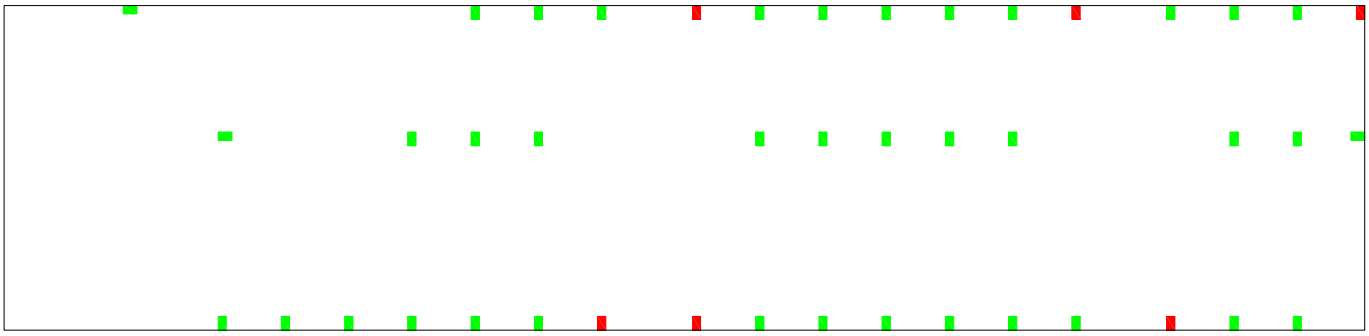
Les efforts dans les raidisseurs ont aussi été vérifiés. On a vérifié la résistance face à la traction, à la compression et le non flambement de ceux-ci. Du fait d'avoir choisi des sections à forte inertie pour attirer les efforts de la structure et soulager les voiles, la résistance de ces raidisseurs est bien supérieure aux sollicitations qu'ils reçoivent et ils sont largement justifiés pour les combinaisons sismiques étudiées.



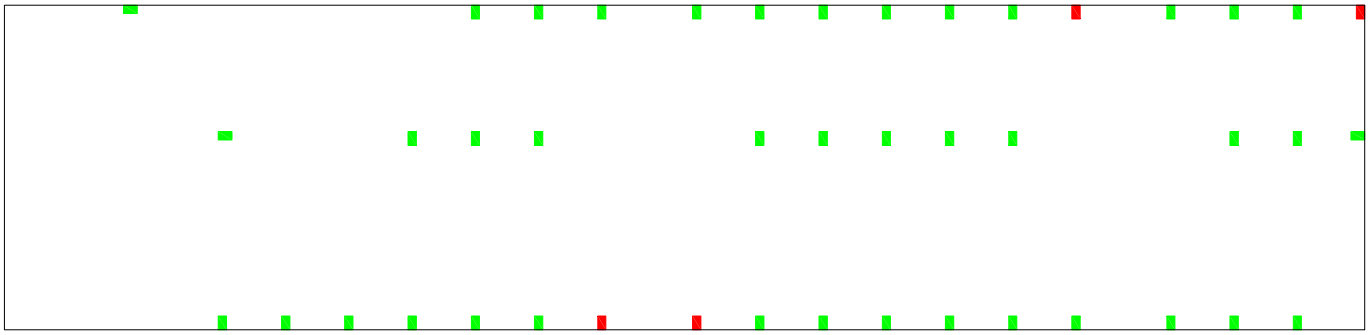
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



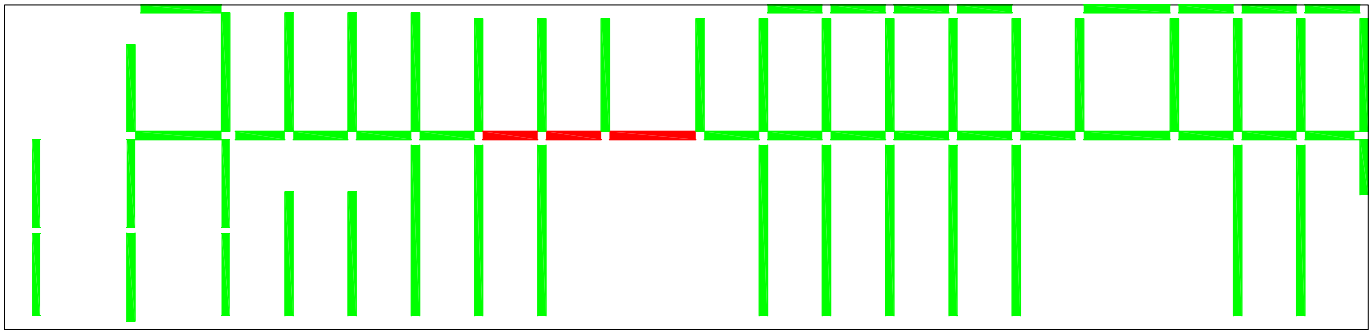
Premier Etage



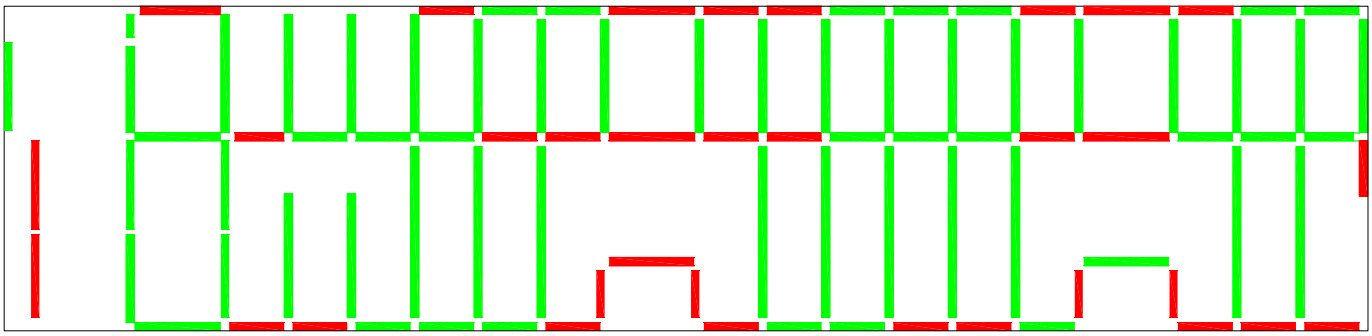
Deuxième Etage

RAIDISSEURS METALLIQUES EXTERNES

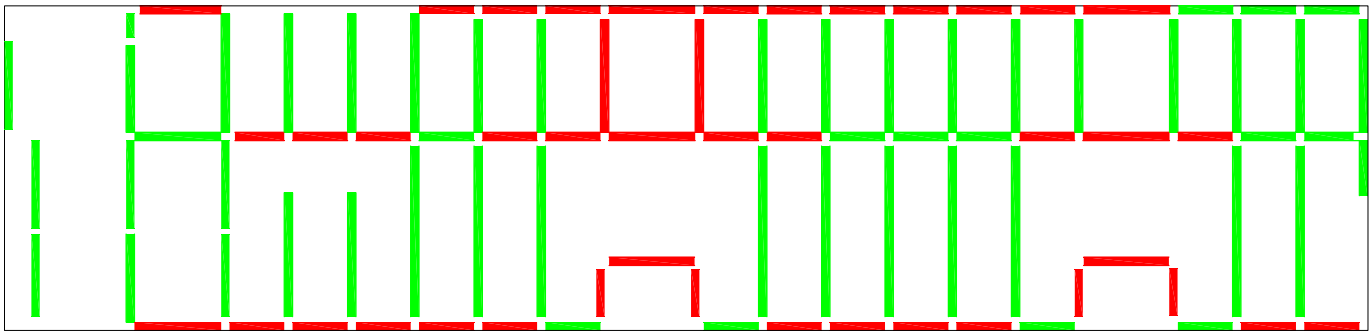
POTEAUX : CAS A



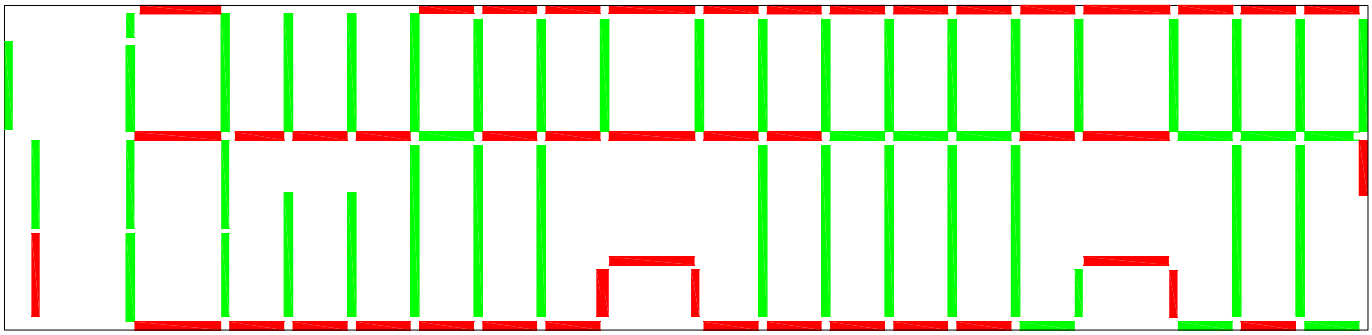
Sous-Sol



Rez-de-chaussée

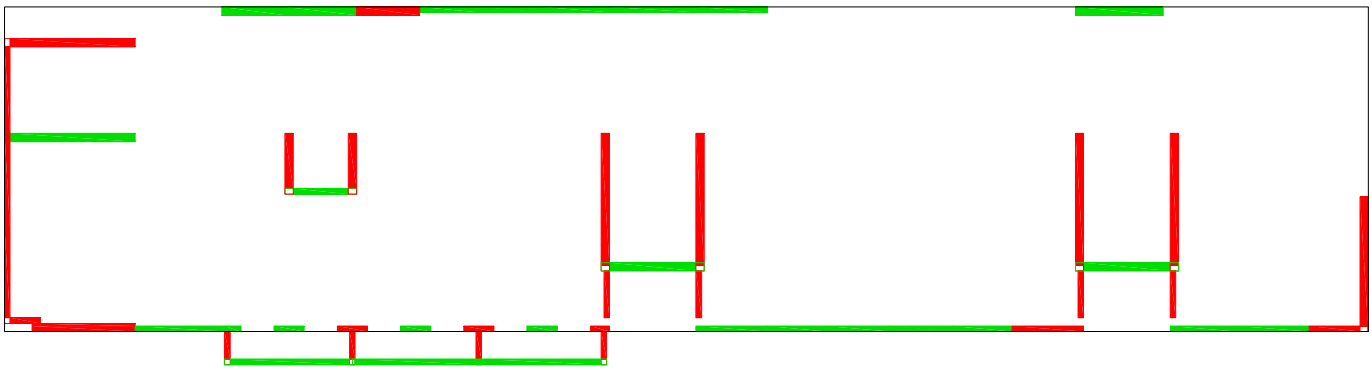


Premier Etage

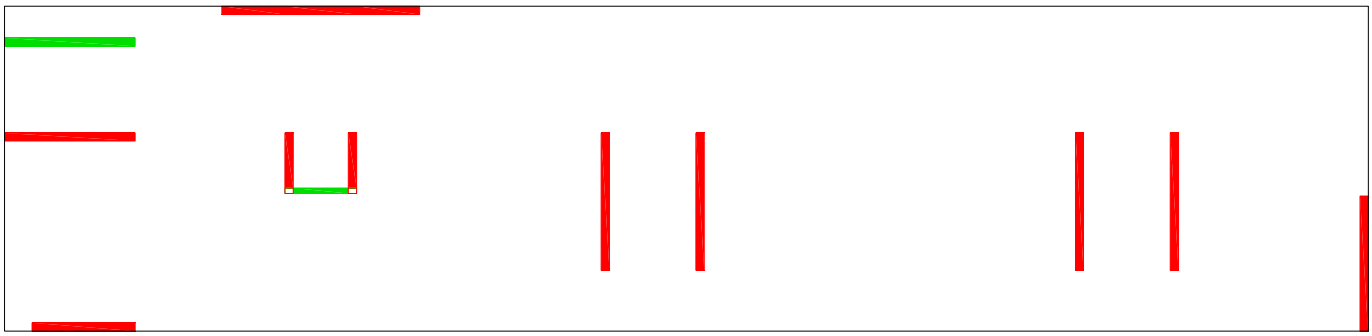


Deuxième Etage

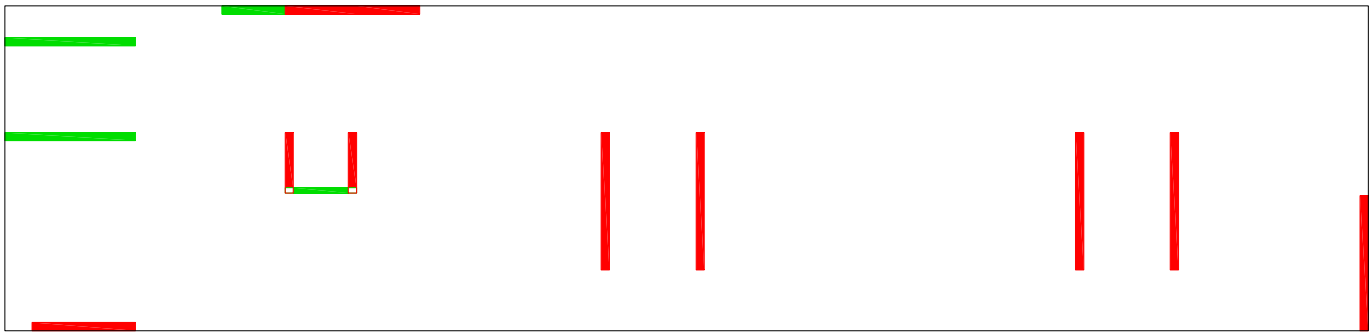
RAIDISSEURS METALLIQUES EXTERNES | POUTRES : CAS A



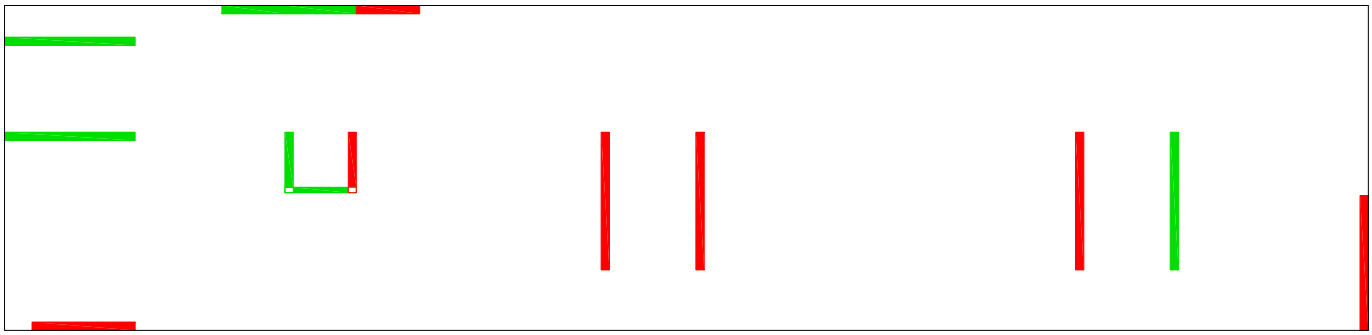
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

RAIDISSEURS METALLIQUES EXTERNES

VOILES : CAS A

Renforcement complémentaire-Poutres

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants à au tranchant

Renforcement à a flexion et au tranchant

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Voici le détail des renforts dimensionnés pour les différentes poutres :

Tableau 110. Renforcement des poutres en X :

POUTRES en X	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur de TFC nécessaire (bandes 300mm)
SS C08	1	0	0	1,73	3,45
SS C09	1	0	0	1,84	3,68
SSC10	1	0	0	2,36	4,73
RDC A03	1	0	0	2,44	4,88
RDC A07	1	0	0	1,61	3,23
RDC A10	1	0	0	2,36	4,73
RDC A11	1	0	0	1,95	3,90
RDC A12	1	0	0	1,61	3,23
RDC A16	1	0	0	1,95	3,90
RDC A17	1	1	0	2,36	7,09
RDC A18	1	1	0	1,84	5,51
RDC C04	1	0	0	1,65	3,30
RDC C08	1	1	0	1,73	5,18
RDC C09	1	1	456	1,84	11,33
REC C10	1	1	0	2,36	7,09
RDC C11	1	0	109	1,95	5,38
RDC C12	1	1	0	1,61	4,84

RDC C16	1	1	138	1,95	7,72
RDC C17	1	1	0	2,36	7,09
RDC F10	1	1	53	2,36	7,96
RDC G04	1	1	0	1,65	4,95
RDC G05	1	0	0	1,95	3,90
RDC G09	1	1	0	1,84	5,51
RDC G11	1	1	0	1,95	5,85
RDC G14	1	1	0	2,01	6,04
RDC G15	1	1	0	1,88	5,64
RDC G18	1	1	0	1,84	5,51
RDC G19	1	1	0	1,73	5,18
RDC G20	1	1	0	1,84	5,51
PREMIER A03	1	1	0	2,44	7,31
PREMIER A07	2	2	793	1,61	18,55
PREMIER A08	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER A09	1	1	0	1,84	5,51
PREMIER A10	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER A11	1	1	0	1,95	5,85
PREMIER A12	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER A13	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER A14	2	1	0	1,73	8,63
PREMIER A15	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER A16	1	0	0	1,95	3,90
PREMIER A17	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER C04	1	1	0	1,65	4,95
PREMIER C05	1	0	0	1,95	3,90
PREMIER C06	1	0	0	1,73	3,45
PREMIER C08	1	0	0	1,73	3,45
PREMIER C09	1	1	528	1,84	12,25
PREMIER C10	1	0	0	2,36	4,73
PREMIER C11	1	1	0	1,95	5,85
PREMIER C12	1	0	0	1,61	3,23
PREMIER C16	1	1	71	1,95	6,81
PREMIER C17	1	1	0	2,36	7,09

PREMIER C18	1	0	0	1,84	3,68
PREMIER F10	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER F17	1	0	0	2,36	4,73
PREMIER G03	1	1	0	2,44	7,31
PREMIER G04	PAS POSSIBLE				
PREMIER G05	1	1	0	1,95	5,85
PREMIER G06	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G07	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER G08	1	1	62	1,73	5,92
PREMIER G12	PAS POSSIBLE				
PREMIER G13	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G14	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G15	PAS POSSIBLE				
PREMIER G19	PAS POSSIBLE				
PREMIER G20	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME A03	1	0	0	2,44	4,88
DEUXIEME A07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME A08	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME A09	1	1	0	1,84	5,51
DEUXIEME A10	2	1	0	2,36	11,81
DEUXIEME A11	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME A12	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME A13	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME A14	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME A15	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME A16	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME A17	2	2	0	2,36	14,18
DEUXIEME A18	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME A19	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME A20	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME C03	1	0	0	2,44	4,88
DEUXIEME C04	1	1	0	1,65	4,95
DEUXIEME C05	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME C06	1	0	0	1,73	3,45

DEUXIEME C08	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME C09	1	1	154	1,84	7,48
DEUXIEME C10	1	1	0	2,36	7,09
DEUXIEME C11	1	0	0	1,95	3,90
DEUXIEME C12	1	0	0	1,61	3,23
DEUXIEME C16	1	0	0	1,95	3,90
DEUXIEME C17	1	0	0	2,36	4,73
DEUXIEME F10	2	2	0	2,36	14,18
DEUXIEME F17	2	2	0	2,36	14,18
DEUXIEME G03	1	1	0	2,44	7,31
DEUXIEME G04	2	2	0	1,65	9,90
DEUXIEME G05	2	2	0	1,95	11,70
DEUXIEME G06	2	2	0	1,73	10,35
DEUXIEME G07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME G08	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME G09	1	1	0	1,84	5,51
DEUXIEME G11	1	0	0	1,95	3,90
DEUXIEME G12	1	0	0	1,61	3,23
DEUXIEME G13	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME G14	1	1	0	1,73	5,18
DEUXIEME G15	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME G19	1	0	0	1,73	3,45
TROISIEME A05	1	1	366	1,95	10,81
				TOTAL	615 m

Tableau 111. Renforcement des poutres en Y :

POUTRES en Y	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur de TFC néccessaire (bandes 300mm)
RDC 02E	2	1	0	2,70	13,50
RDC 02G	1	0	0	2,88	5,76
PREMIER 10A	1	1	0	3,45	10,35
PREMIER 10G	1	0	541	1,72	9,90
PREMIER 11A	1	0	0	3,45	6,90
PREMIER 11G	1	0	618	1,75	11,01
DEUXIEME 02G	1	0	0	2,88	5,76
DEUXIEME 21G	1	0	0	1,75	3,50
SS 04E	0	0	105	2,70	1,97
RDC 10G	0	0	105	1,72	1,25
RDC 11G	0	0	105	1,72	1,25
RDC 17G	0	0	105	1,72	1,25
RDC 18G	0	0	105	1,72	1,25
PREMIER 17G	0	0	105	1,72	1,25
PREMIER 18G	0	0	105	1,72	1,25
DEUXIEME 10G	0	0	105	1,72	1,25
DEUXIEME 11G	0	0	105	1,72	1,25
DEUXIEME 18G	0	0	105	1,72	1,25
				TOTAL	80 m

Quatre poutres en X ne peuvent cependant pas être renforcées à l’aide de TFC. Leur section de béton armé devra être augmentée.

Renforcement complémentaire-Voiles

Les éléments à renforcer de façon complémentaire sont présentés dans le tableau suivant :

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement

Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 112. Renforcement vertical à l'effort tranchant.

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre de bandes	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 30 en Y RDC 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 17D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 18D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 21F	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y SS 21F	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y DEUXIEME 10D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y DEUXIEME 11D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y DEUXIEME 17D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y DEUXIEME 18D	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y DEUXIEME 21F	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y PREMIER 10D	8	150	0,48	3,5	56
Voile 30 en Y PREMIER 11D	8	150	0,48	3,5	56
Voile 30 en Y PREMIER 17D	8	150	0,48	3,5	56
Voile 30 en Y PREMIER 18D	4	150	0,48	3,5	28
Voile 30 en Y PREMIER 21F	8	150	0,48	3,5	56
Voile 30 en Y SS 21F	8	150	0,48	3,5	56
				TOTAL	399 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 113. Renforcement horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en Y SS 06H	2	1	4	0	150	0,48	13	1,2	22
Voile 20 en Y SS 08H	2	5	0	0	150	0,48	13	1,2	12
Voile 20 en Y SS 01E	1	2	3	0	150	0,48	13	3,45	28
Voile 20 en Y SS 01G	1	4	1	0	150	0,48	13	3,45	21
Voile 20 en Y SS 04H	2	5	0	0	150	0,48	13	1,2	12
Voile 30 en X SS A06	1	1	4	0	150	0,48	113	2,3	21
Voile 30 en X PREMIER A05	1	0	5	0	150	0,48	113	2,6	26
Voile 30 en X PREMIER A06	1	5	3	0	150	0,48	0	2,3	25
Voile 30 en X RDC A04	1	1	4	0	150	0,48	113	2,3	21
Voile 30 en X RDC A05	1	0	4	0	150	0,48	200	2,6	21
Voile 30 en X RDC A06	1	0	5	0	150	0,48	113	2,3	23
Voile 30 en Y PREMIER 05D	1	4	0	0	150	0,48	200	2,1	8
Voile 30 en Y PREMIER 06D	1	4	0	0	150	0,48	200	2,1	8
Voile 30 en X DEUXIEME A06	1	8	0	0	150	0,48	0	2,3	18
Voile 30 en Y DEUXIEME 06D	1	4	0	0	150	0,48	200	2,1	8
Voile 30 en Y TROISIEME 05D	1	5	0	0	150	0,48	113	2,1	11
Voile 30 en Y TROISIEME 06D	1	5	0	0	150	0,48	113	2,1	11
								TOT	295 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à a flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 114. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1 couch	Nbre 2 couch	Nbre 3 couch	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X SS G01	0	4	0	300	0,48	33	3,5	56
Voile 20 en X SS G06	Pas possible							-
Voile 20 en X SS G08	Pas possible							-
Voile 20 en X SS G10	2	0	0	300	0,48	90	3,5	14
Voile 20 en X SS G16	1	0	0	300	0,48	-	3,5	7
Voile 20 en X SS G20	6	0	0	300	0,48	130	3,5	42
Voile 20 en Y SS 01C	0	6	0	300	0,48	330	3,5	84

Voile 20 en Y SS 04H	0	4	0	300	0,48	0	3,5	56
Voile 20 en Y SS 10G	Pas possible							-
Voile 20 en Y SS 10H	Pas possible							-
Voile 20 en Y SS 11G	Pas possible							-
Voile 20 en Y SS 17G	Pas possible							-
Voile 20 en Y SS 18G	Pas possible							-
Voile 30 en X DEUXIEME G02	3	0	0	0	0	1425	3,5	21
Voile 30 en X PREMIER G02	0	10	0	0	0	83	3,5	140
Voile 30 en X RDC C02	0	3	8	0	0	145	3,5	210
Voile 30 en X RDC G02	Pas possible							-
Voile 30 en X SS B02	0	14	0	0	0	42	3,5	196
Voile 30 en X SS G02	Pas possible							-
Voile 30 en Y RDC 05D	2	0	0	0	0	1500	3,5	14
Voile 30 en Y RDC 06D	6	1	0	0	0	0	3,5	56
Voile 30 en Y RDC 10D	Pas possible							-
Voile 30 en Y RDC 11D	Pas possible							-
Voile 30 en Y RDC 17D	Pas possible							-
Voile 30 en Y RDC 18D	Pas possible							-
Voile 30 en Y RDC 21F	Pas possible							-
Voile 30 en Y SS 05D	0	7	0	0	0	0	3,5	98
Voile 30 en Y SS 06D	0	4	3	0	0	0	3,5	119
Voile 30 en Y SS 10D	Pas possible							-
Voile 30 en Y SS 11D	Pas possible							-
Voile 30 en Y SS 17D	Pas possible							-
Voile 30 en Y SS 18D	Pas possible							-
							TOT	1 113 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement est symétrique dans les deux faces des voiles.

Dix-huit voiles ne peuvent être renforcés à l'aide de bandes de fibres de carbone : il est nécessaire d'augmenter sa section de béton armé.

Le renforcement en flexion de ces voiles représente une quantité de fibres de carbone très importante.

Renforcement complémentaire-Poteaux

Renforcement à la flexion

Nous avons 18 poteaux qui cassent à la flexion. Pour leur renforcement, on ne considère pas l'augmentation de la résistance du béton par l'effet du confinement apporté par le renforcement TFC puisque celui-ci ne peut être pris en compte que lorsque le poteau est soumis à une compression centrée (section entièrement comprimée sur toutes ses fibres). Ce n'est pas adapté pour une étude sismique où le poteau est comprimé et tendu alternativement.

On place le renforcement dans les quatre faces des poteaux : 2 bandes de 150mm dans les côtés de 300mm des poteaux et 3 bandes de150mm dans les côtés de 500mm.

Les poteaux renforcés et la quantité de TFC nécessaire sont les suivants :

Tableau 115. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	LTFC (m)
Poteau SS A21	pas possible			-
Poteau RDC A21	pas possible			-
Poteau RDC G10	1	150	0,48	35
Poteau RDC G11	2	150	0,48	70
Poteau RDC G18	1	150	0,48	35
Poteau RDC G17	2	150	0,48	70
Poteau RDC G18	3	150	0,48	105
Poteau PREMIER A21	2	150	0,48	70
Poteau PREMIER G10	2	150	0,48	70
Poteau PREMIER G11	1	150	0,48	35
Poteau PREMIER G18	1	150	0,48	35
Poteau DEUXIEME A17	1	150	0,48	35
Poteau DEUXIEME A21	3	150	0,48	105
Poteau DEUXIEME G10	1	150	0,48	35
Poteau DEUXIEME G11	2	150	0,48	70
Poteau TROISIEME A05	3	150	0,48	105
Poteau TROISIEME A06	3	150	0,48	105
			TOTAL	980 m

Deux des dix-huit poteaux défaillants, deux ne peuvent être renforcés au TFC : le nombre de couches nécessaire est trop important. Il faudra augmenter leur section de béton armé.

Annexe 10 Renforcement par raidisseurs internes et externes en zone 5

Renforcement principal

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 116 à 124 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 1.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 1.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux

Tableau 116. Poteaux défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	0 / 44	3 / 44	0 / 44	1 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	2 / 44	0 / 44	1 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	1 / 44	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2	0 / 2	2 / 2	0 / 2
Nombre TOTAL	**2 / 178**	**5 / 178**	**2 / 178**	**2 / 178**

Tableau 117. Poteaux défaillants face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2
TOTAL	**0 / 178**	**0 / 178**

Tableau 118. Récapitulatif des poteaux défaillants :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	3 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	2 / 44
PREMIER ETAGE	1 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44
TROISIEME ETAGE	2 / 2
Nombre TOTAL	**8 / 178**
Pourcentage TOTAL	**4 %**

Poutres

Tableau 119. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	1 / 71	0 / 71	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	4 / 94	7 / 94	1 / 94	1 / 94
PREMIER ETAGE	11 / 94	16 / 94	6 / 94	7 / 94
DEUXIEME ETAGE	9 / 94	16 / 94	3 / 94	7 / 94
TROISIEME ETAGE	1 / 3	0 / 3	1 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**26 / 356**	**39 / 356**	**11 / 356**	**15 / 356**

Tableau 120. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	0 / 94	0 / 94
DEUXIEME ETAGE	0 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**0 / 356**	**0 / 356**

Tableau 121. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	1 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	9 / 94
PREMIER ETAGE	20 / 94
DEUXIEME ETAGE	17 / 94
TROISIEME ETAGE	1 / 3
Nombre TOTAL	**48 / 356**
Pourcentage TOTAL	**13 %**

Voiles

Tableau 122. Voiles défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	0 / 53	4 / 53	0 / 53	2 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	1 / 14	2 / 14	0 / 14	1 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**1 / 98**	**6 / 98**	**0 / 98**	**3 / 98**

Tableau 123. Voiles défaillants face au cisaillement :

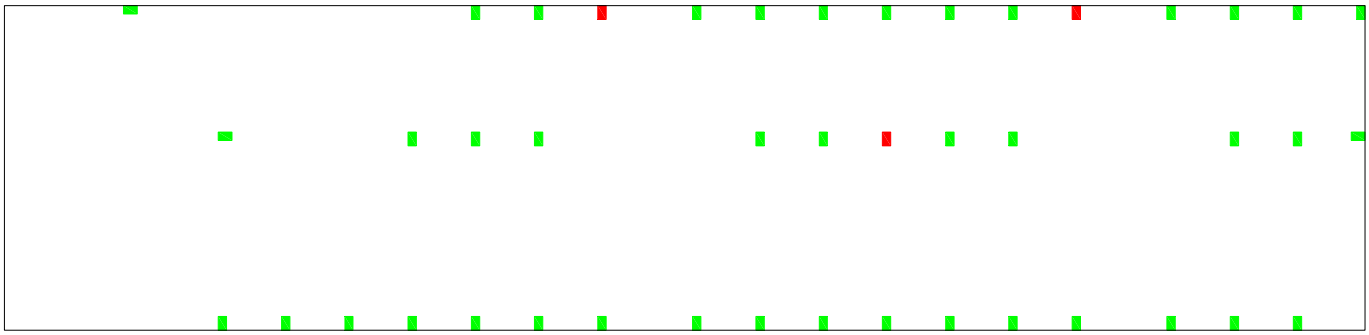
	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	4 / 53	10 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	4 / 14	4 / 14
PREMIER ETAGE	3 / 14	3 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	1 / 14
TROISIEME ETAGE	2 / 3	2 / 3
TOTAL	**13 / 98**	**20 / 98**

Tableau 124. Récapitulatif des voiles défaillants :

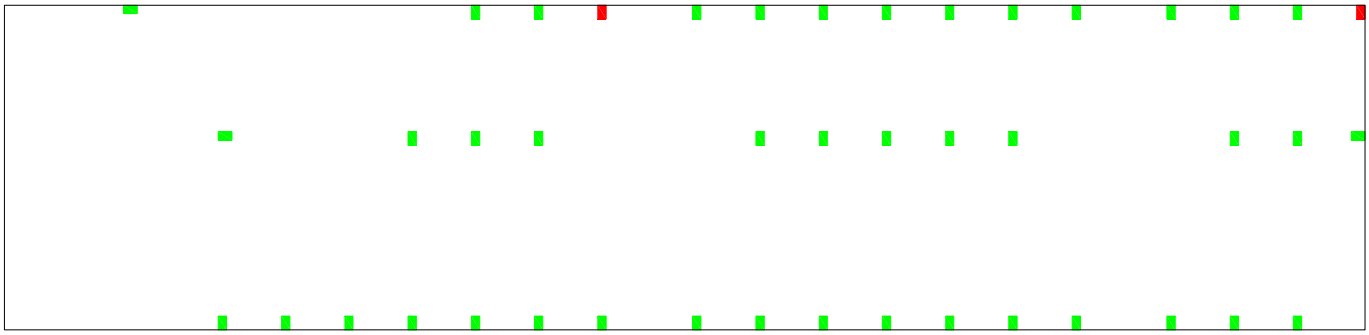
	Récapitulatif
SOUS-SOL	15 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	9 / 14
PREMIER ETAGE	5 / 14
DEUXIEME ETAGE	1 / 14
TROISIEME ETAGE	2 / 3
Nombre TOTAL	**32 / 98**
Pourcentage TOTAL	**33 %**

Raidisseurs

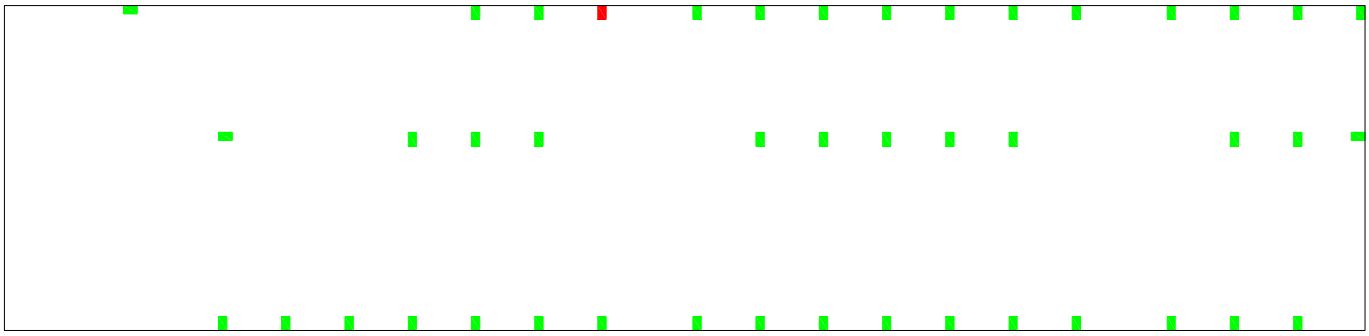
Les efforts dans les raidisseurs ont aussi été vérifiés. On a vérifié la résistance face à la traction, à la compression et le non flambement de ceux-ci. Du fait d'avoir choisi des sections à forte inertie pour attirer les efforts de la structure et soulager les voiles, la résistance de ces raidisseurs est bien supérieure aux sollicitations qu'ils reçoivent et ils sont largement justifiés pour les combinaisons sismiques étudiées.



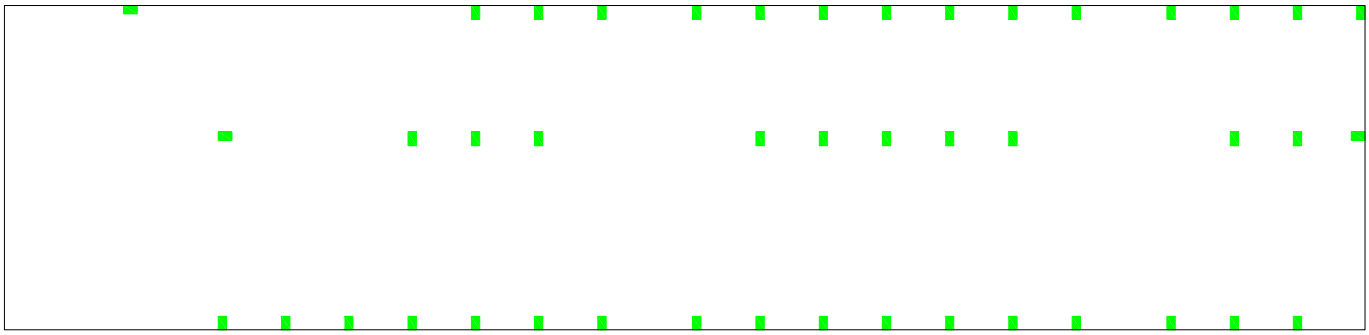
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



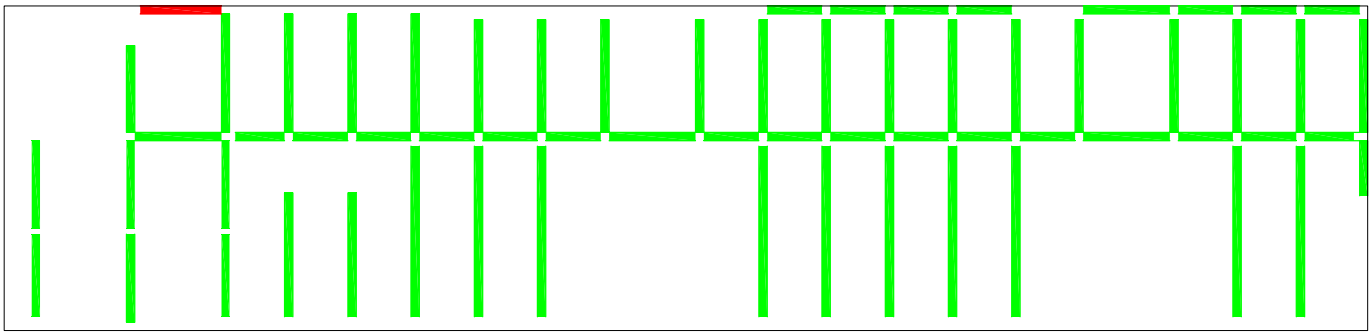
Premier Etage



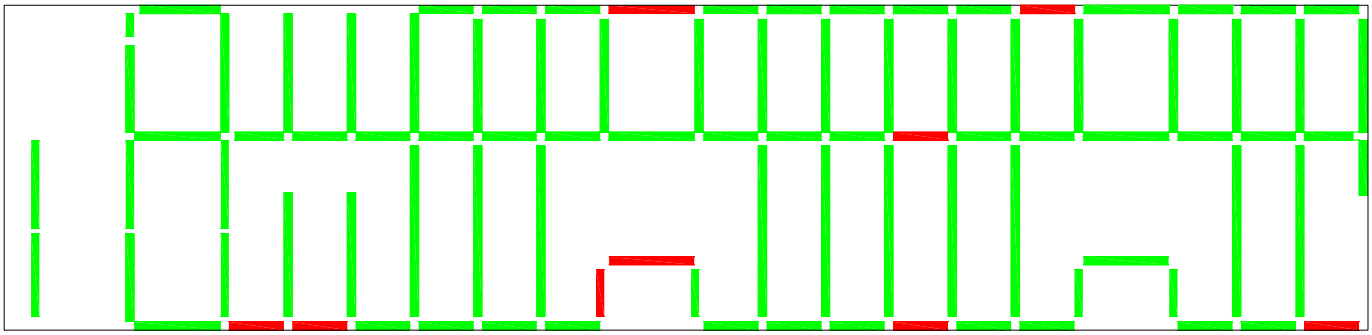
Deuxième Etage

RAIDISSEURS METALLIQUES

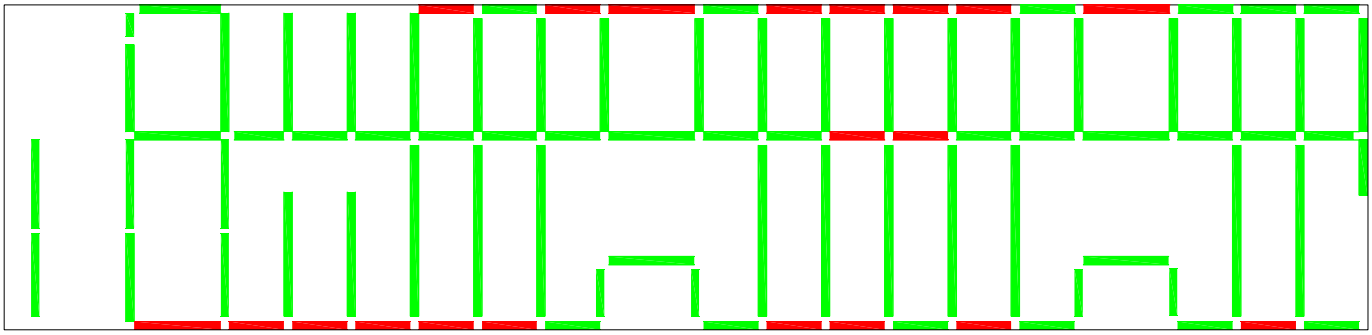
POTEAUX : CAS A



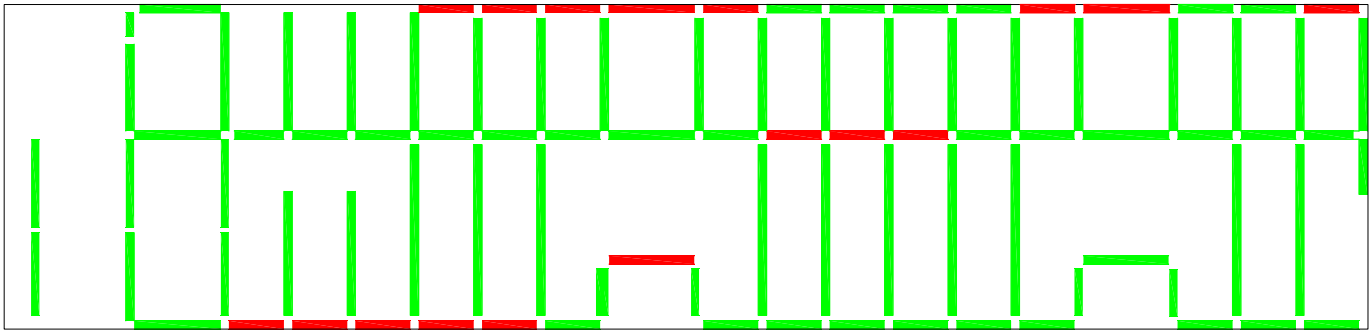
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



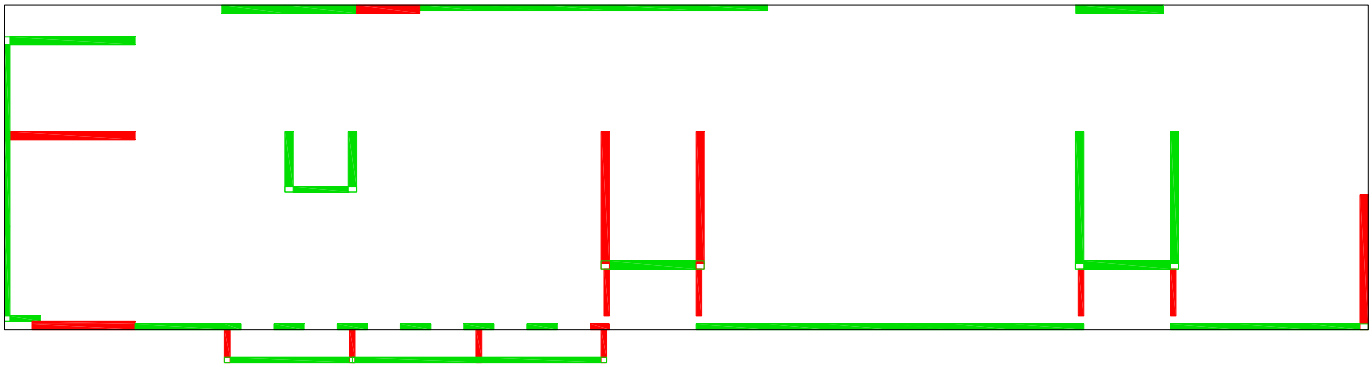
Premier Etage



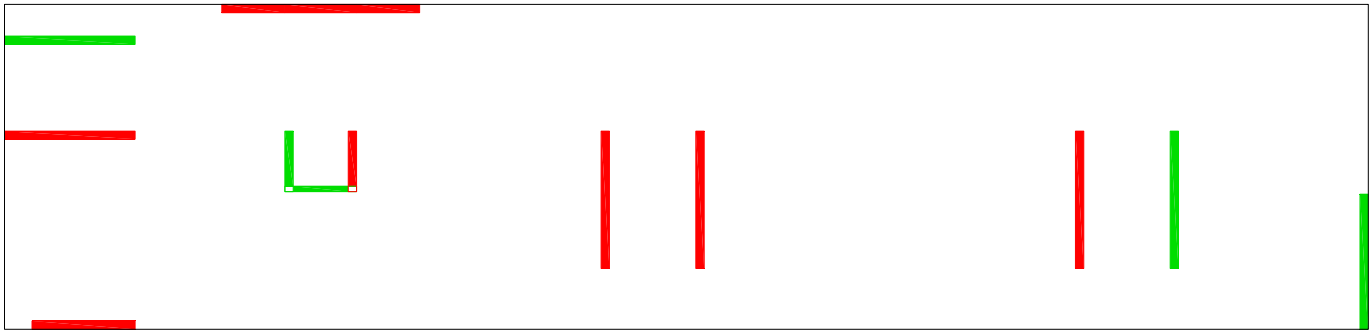
Deuxième Etage

RAIDISSEURS METALLIQUES

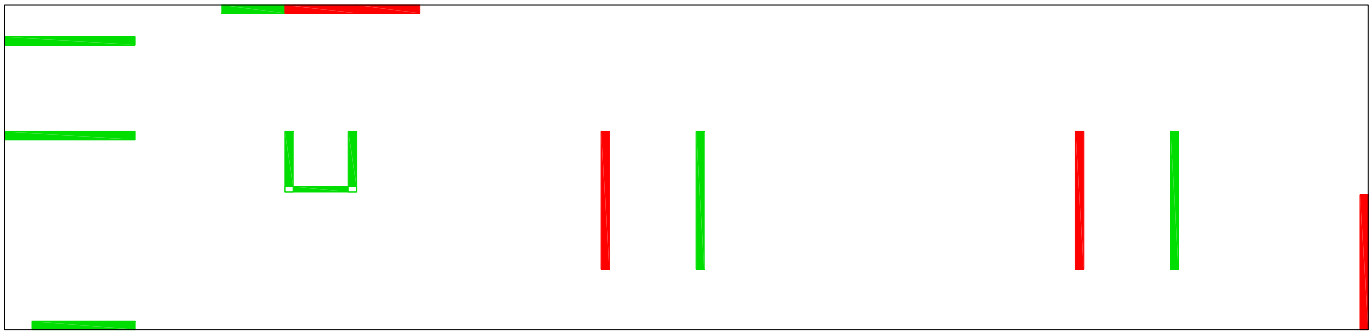
POUTRES : CAS A



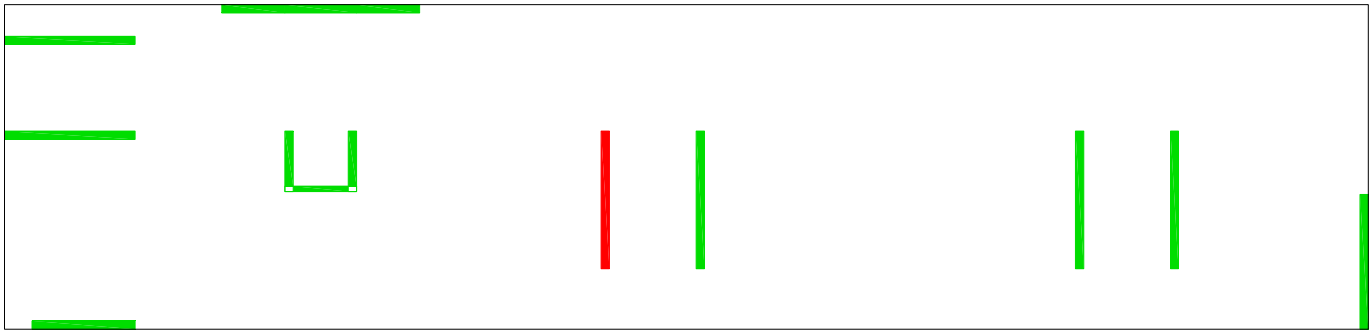
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

RAIDISSEURS METALLIQUES

VOILES : CAS A

Renforcement complémentaire-Poutres

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants à au tranchant

Renforcement à a flexion et au tranchant

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Voici le détail des renforts dimensionnés pour les différentes poutres :

Tableau 125. Renforcement des poutres en X :

POUTRES en X	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur de TFC néccessaire (bandes 300mm)
SS A03	0	1	0	2,44	2,44
RDC A10	1	1	0	2,36	7,09
RDC A16	1	0	0	1,95	3,90
RDC C14	1	1	0	1,73	5,18
RDC F10	0	1	0	2,36	2,36
RDC G04	0	1	0	1,65	1,65
RDC G05	1	0	0	1,95	3,90
RDC G14	1	1	0	1,73	5,18
RDC G20	1	1	0	1,84	5,51
PREMIER A07	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER A09	1	1	0	1,84	5,51
PREMIER A10	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER A12	0	1	0	1,61	1,61
PREMIER A13	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER A14	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER A15	1	1	0	1,61	4,84
PREMIER A17	1	1	0	2,36	7,09
PREMIER C13	1	1	0	1,73	5,18

PREMIER C14	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G03	0	1	0	2,44	2,44
PREMIER G04	3	1	570	1,65	18,08
PREMIER G05	1	1	0	1,95	5,85
PREMIER G06	1	0	0	1,73	3,45
PREMIER G07	1	0	0	1,61	3,23
PREMIER G08	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G12	3	1	739	1,61	19,56
PREMIER G13	1	1	0	1,73	5,18
PREMIER G15	Pas possible				-
PREMIER G19	2	1	226	1,73	11,33
DEUXIEME A07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME A08	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME A09	1	1	0	1,84	5,51
DEUXIEME A10	1	1	0	2,36	7,09
DEUXIEME A11	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME A12	0	1	0	1,61	1,61
DEUXIEME A16	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME A17	1	0	0	2,36	4,73
DEUXIEME A20	0	0	0	1,84	0,00
DEUXIEME C12	0	1	0	1,61	1,61
DEUXIEME C13	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME C14	1	0	0	1,73	3,45
DEUXIEME F10	1	1	0	2,36	7,09
DEUXIEME G04	1	1	0	1,65	4,95
DEUXIEME G05	1	1	0	1,95	5,85
DEUXIEME G06	2	1	0	1,725	8,63
DEUXIEME G07	1	1	0	1,61	4,84
DEUXIEME G08	1	0	0	1,725	3,45
TROISIEME A05	1	1	304	1,95	9,97
				TOTAL	**255 m**

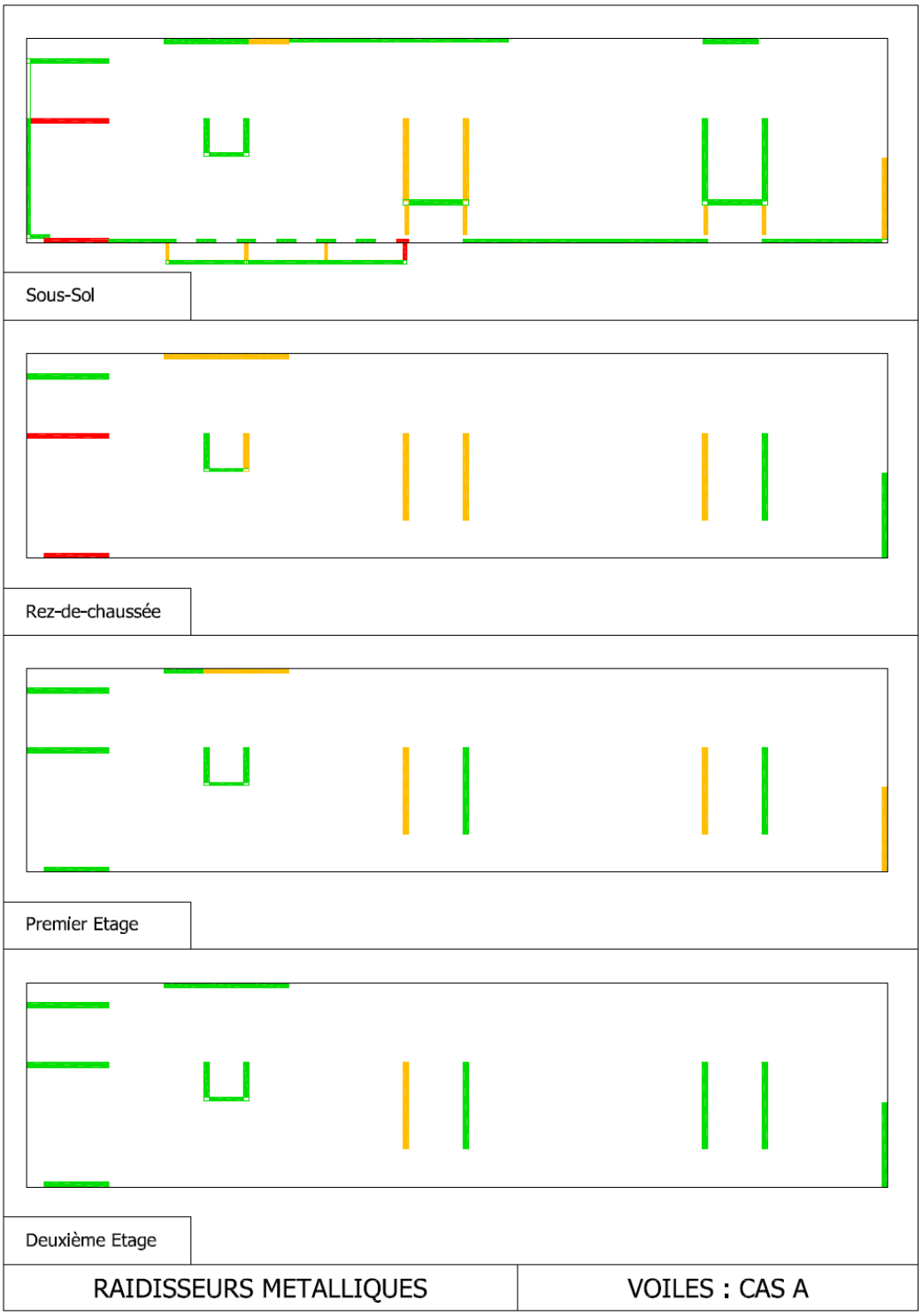
Une poutre ne peut cependant pas être renforcée à l'aide de TFC. Sa section de béton armé devra être augmentée.

Renforcement complémentaire-Voiles

Les éléments à renforcer de façon complémentaire sont présentés dans le tableau suivant :

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement



Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 126. Renforcement vertical à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nbre	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 20 en Y SS 10G	3	150	0,48	3,5	21
Voile 20 en Y SS 11G	2	150	0,48	3,5	14
Voile 20 en Y SS 17G	1	150	0,48	3,5	7
				TOTAL	42 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 127. Renforcement horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en Y SS 10G	1	0	5	0	150	0,48	13	2,3	23
Voile 20 en Y SS 10H	2	1	0	0	150	0,48	-	1,2	2
Voile 20 en Y SS 11G	1	0	4	0	150	0,48	67	2,3	18
Voile 20 en Y SS 04H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 06H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 08H	2	2	0	0	150	0,48	500	1,2	5
Voile 20 en Y SS 17G	1	3	2	0	150	0,48	13	2,3	16
Voile 20 en Y SS 18G	1	5	0	0	150	0,48	13	2,3	12
Voile 30 en X PREMIER A05	1	8	0	0	150	0,48	0	2,6	21
Voile 30 en X PREMIER A06	1	7	1	0	150	0,48	0	2,3	21
Voile 30 en X RDC A04	1	8	0	0	150	0,48	0	2,3	18
Voile 30 en X RDC A05	1	8	0	0	150	0,48	0	2,6	21
Voile 30 en X RDC A06	1	6	2	0	150	0,48	0	2,3	23
Voile 30 en X SS A06	1	7	1	0	150	0,48	0	2,3	21
Voile 30 en Y TROISIEME 05D	1	6	0	0	150	0,48	60	2,1	13
Voile 30 en Y TROISIEME 06D	1	6	0	0	150	0,48	60	2,1	13
								TOTAL	235 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à a flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 128. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1 couch	Nbre 2 couch	Nbre 3 couch	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X SS G10	1	0	0	300	0,48	-	3,5	7
Voile 20 en Y SS 10H	0	3	0	300	0,48	150	3,5	42
Voile 30 en X RDC G02	Pas possible						3,5	-
Voile 30 en X SS G02	0	0	12	300	0,48	14	3,5	252
Voile 30 en X SS C02	0	6	0	300	0,48	590	3,5	84
							TOTAL	385 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement est symétrique dans les deux faces des voiles.

Un voile ne peut être renforcé à l'aide de bandes de fibres de carbone : il est nécessaire d'augmenter sa section de béton armé.

Renforcement complémentaire-Poteaux

Renforcement à la flexion

Nous avons 18 poteaux qui cassent à la flexion. Pour leur renforcement, on ne considère pas l'augmentation de la résistance du béton par l'effet du confinement apporté par le renforcement TFC puisque celui-ci ne peut être pris en compte que lorsque le poteaux est soumis à une compression centrée (section entièrement comprimée sur toutes ses fibres). Ce n'est pas adapté pour une étude sismique ou le poteau est comprimé et tendu alternativement.

Le renforcement que l'on met en place a la même forme que celui des poutres renforcées à la flexion, seulement qu'il est placé dans les quatre faces des poteaux. On place deux bandes de 150mm dans les côtés de 300mm des poteaux et des bandes de 300mm dans les côtés de 500mm.

Les poteaux renforcés et la quantité de TFC nécessaire sont les suivants :

Tableau 129. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	LTFC (m)
Poteau TROISIEME A05	pas possible			-
Poteau TROISIEME A06	pas possible			-
Poteau SS A10	pas possible			-
Poteau SS A17	1	150	0,48	35
Poteau SS C14	1	150	0,48	35
Poteau RDC A10	pas possible			-
Poteau RDC A21	1	150	0,48	35
Poteau PREMIER A10	1	150	0,48	35
			TOTAL	140 m

Quatre des huit poteaux défaillants ne peuvent être renforcés au TFC : le nombre de couches nécessaire est trop important. Il faudra augmenter leur section de béton armé.

Annexe 11 Renforcement par isolation à la base en zone 5

Renforcement principal

On présente dans cette annexe les éléments défaillants par élément et par étage. On présente ces éléments dans les Tableaux 130 à 138 puis dans les plans qui suivent des éléments par étage.

Combinaisons considérées :

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **non effondrement** :

- 1.3 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.4 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Combinaisons pour le séisme de l'état limite de **limitation de dommages** :

- 1.5 : Séisme prépondérant en X : Ex + 0,3 Ey
- 1.6 : Séisme prépondérant en Y : 0,3 Ex + Ey

Code couleur

En rouge : éléments défaillants (flexion ou cisaillement)

En vert : éléments résistants

Poteaux

Tableau 130. Poteaux défaillants face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	3 / 44	7 / 44	5 / 44	9 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	2 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2	0 / 2	0 / 2
Nombre TOTAL	**2 / 178**	**7 / 178**	**5 / 178**	**0 / 178**

Tableau 131. Poteaux défaillants face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 44	0 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 44	0 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2	0 / 2
TOTAL	**0 / 178**	**0 / 178**

Tableau 132. Récapitulatif des poteaux défaillants :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	9 / 44
REZ-DE-CHAUSSEE	2 / 44
PREMIER ETAGE	0 / 44
DEUXIEME ETAGE	0 / 44
TROISIEME ETAGE	0 / 2
Nombre TOTAL	**11 / 178**
Pourcentage TOTAL	**%**

Poutres

Tableau 133. Poutres défaillantes face à la flexion :

	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	13 / 71	8 / 71	10 / 71	18 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 94	2 / 94	1 / 94	6 / 94
PREMIER ETAGE	5 / 94	1 / 94	1 / 94	3 / 94
DEUXIEME ETAGE	1 / 94	0 / 94	0 / 94	1 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**24 / 356**	**11 / 356**	**12 / 356**	**28 / 356**

Tableau 134. Poutres défaillantes face au cisaillement :

	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	0 / 71	0 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	0 / 94	0 / 94
PREMIER ETAGE	0 / 94	0 / 94
DEUXIEME ETAGE	0 / 94	0 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**0 / 356**	**0 / 356**

Tableau 135. Récapitulatif des poutres défaillantes :

	Récapitulatif
SOUS-SOL	21 / 71
REZ-DE-CHAUSSEE	8 / 94
PREMIER ETAGE	6 / 94
DEUXIEME ETAGE	1 / 94
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**36 / 356**
Pourcentage TOTAL	**10 %**

Voiles

Tableau 136. Voiles défaillants face à la flexion :

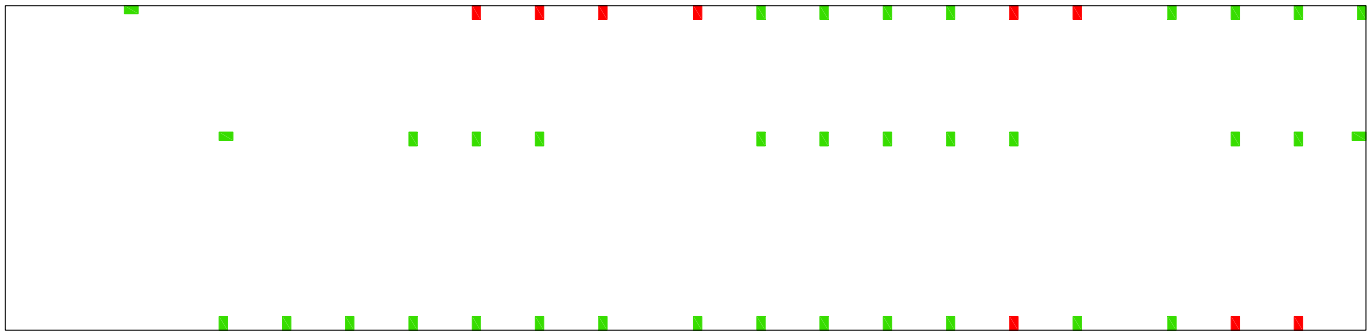
	COMB 1.3	COMB 1.4	COMB 1.5	COMB 1.6
SOUS-SOL	3 / 53	4 / 53	2 / 53	5 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	1 / 14	0 / 14	2 / 14	2 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3	0 / 3	0 / 3
Nombre TOTAL	**4 / 98**	**4 / 98**	**4 / 98**	**7 / 98**

Tableau 137. Voiles défaillants face au cisaillement :

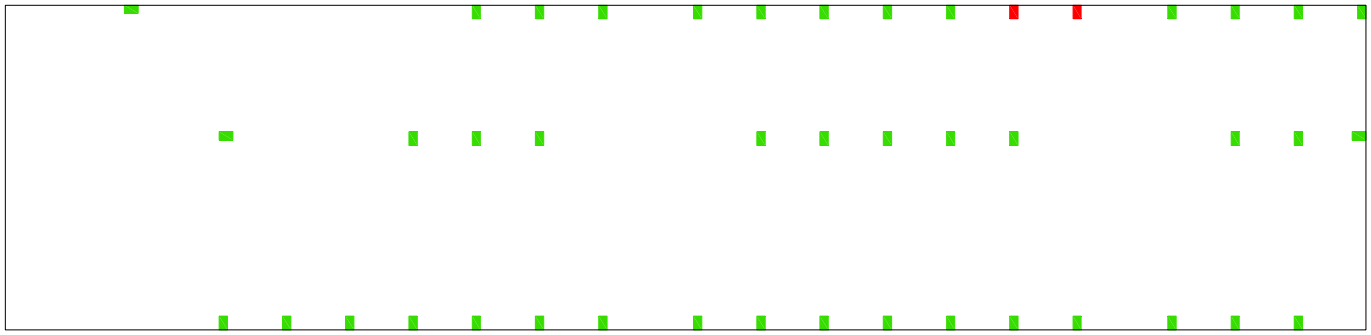
	COMB 1.3	COMB 1.4
SOUS-SOL	7 / 53	9 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	5 / 14	3 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3	0 / 3
TOTAL	**12 / 98**	**12 / 98**

Tableau 138. Récapitulatif des voiles défaillants :

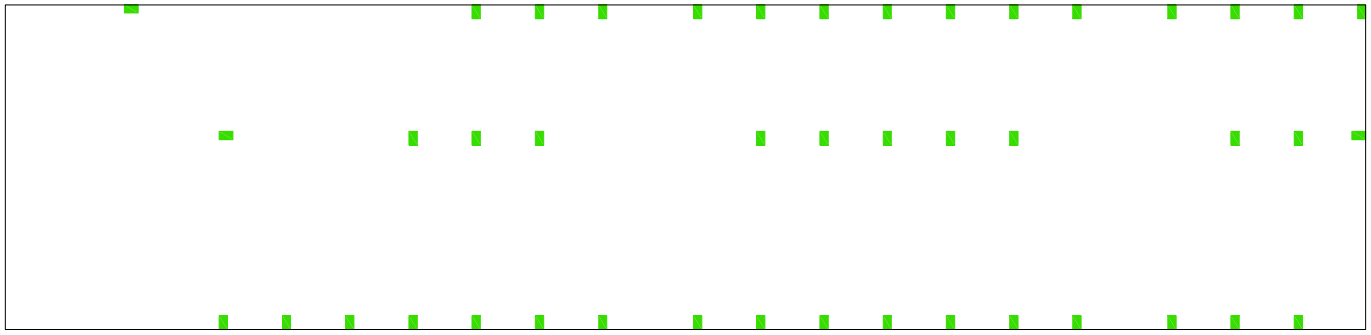
	Récapitulatif
SOUS-SOL	17 / 53
REZ-DE-CHAUSSEE	7 / 14
PREMIER ETAGE	0 / 14
DEUXIEME ETAGE	0 / 14
TROISIEME ETAGE	0 / 3
Nombre TOTAL	**24 / 98**
Pourcentage TOTAL	**24 %**



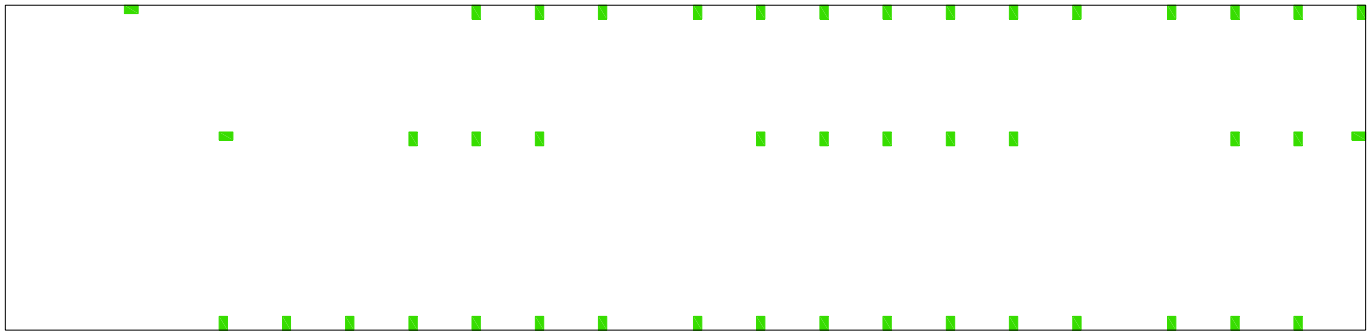
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



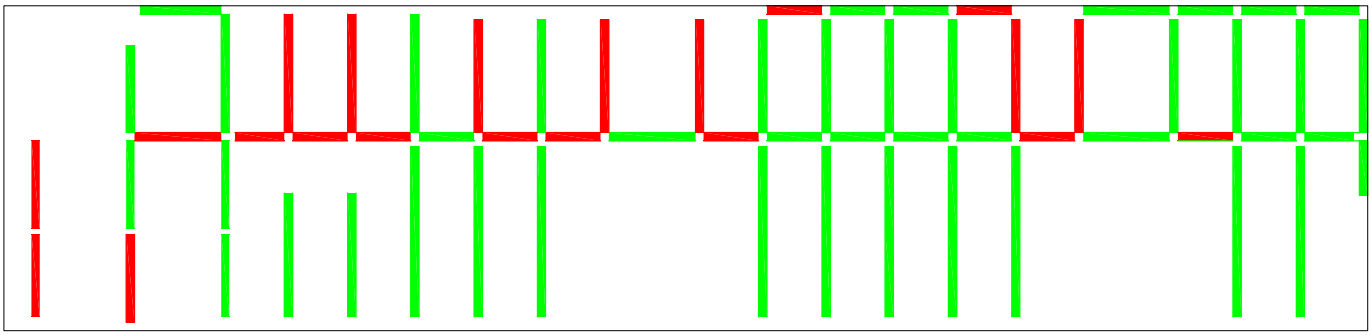
Premier Etage



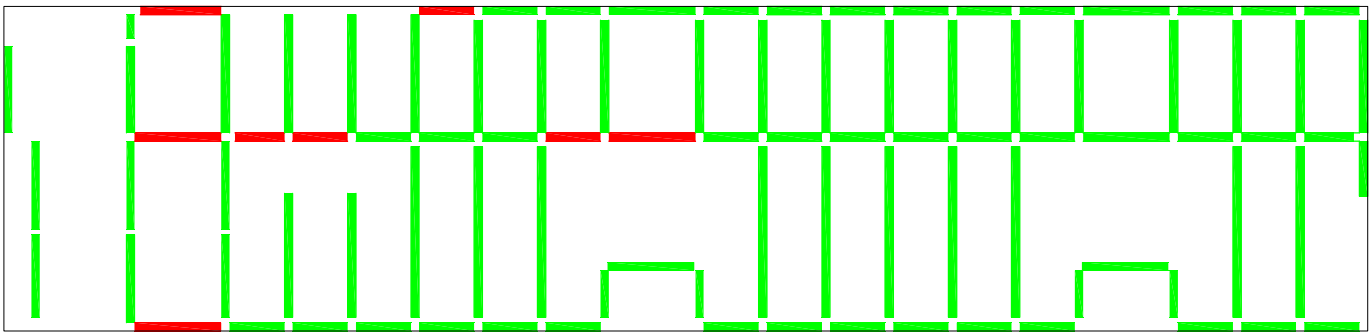
Deuxième Etage

BATIMENT ISOLE

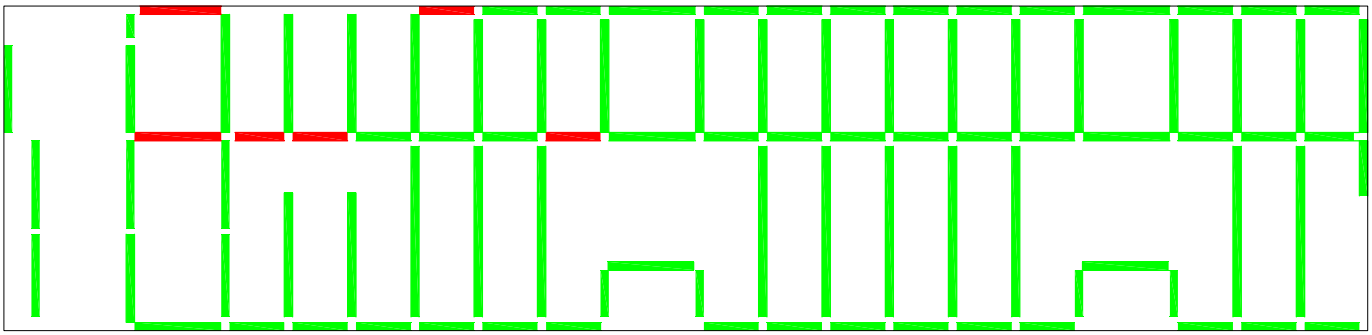
POTEAUX : CAS A



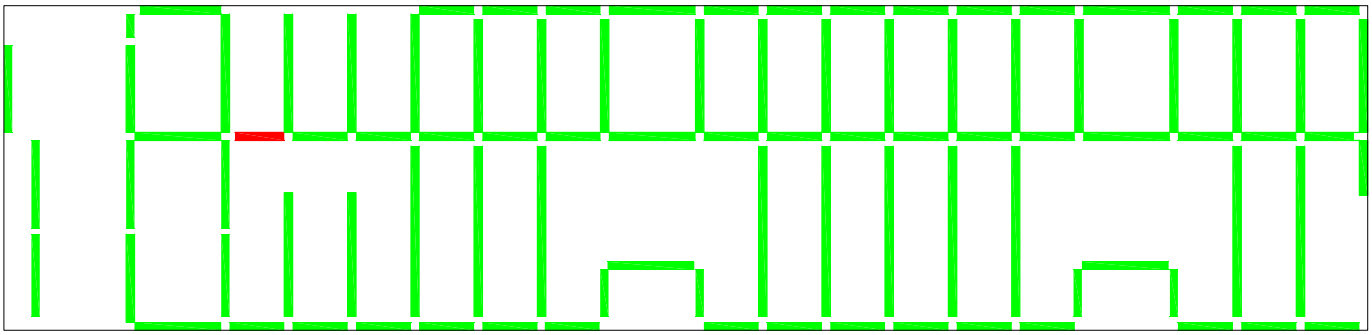
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



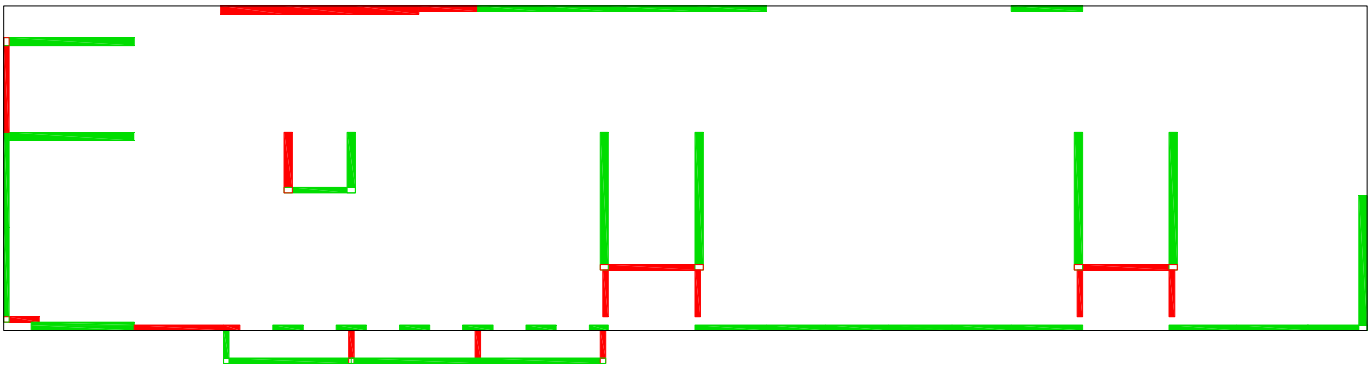
Premier Etage



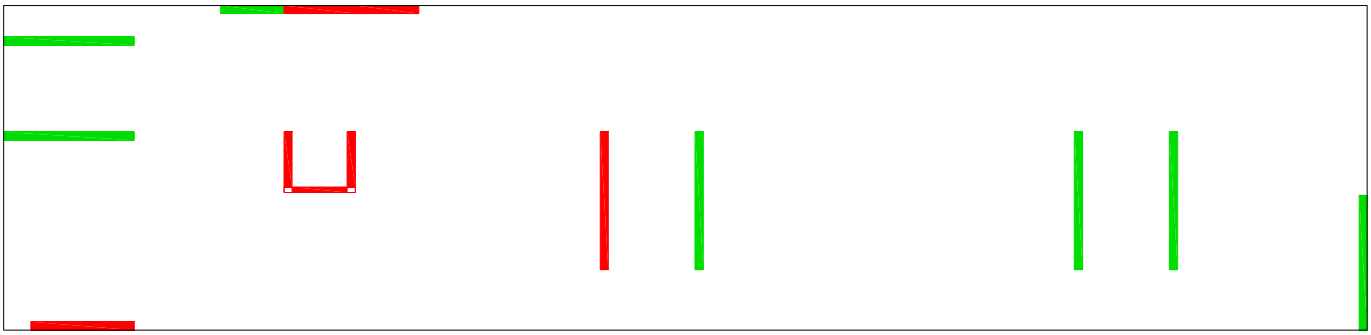
Deuxième Etage

BATIMENT ISOLE

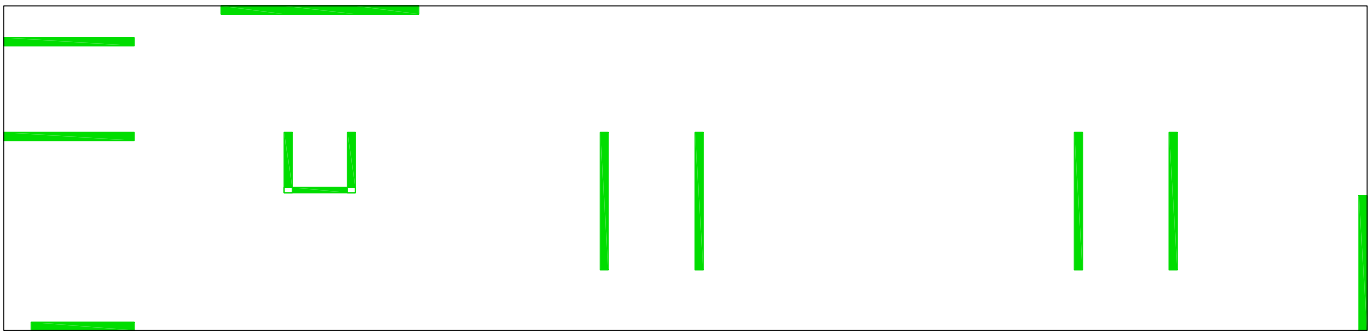
POUTRES : CAS A



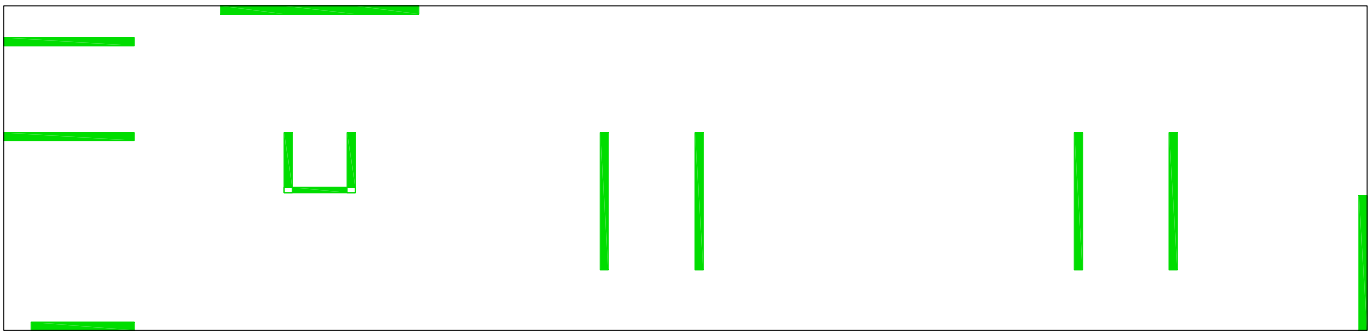
Sous-Sol



Rez-de-chaussée



Premier Etage



Deuxième Etage

BATIMENT ISOLE

VOILES : CAS A

Renforcement complémentaire-Poutres

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants à l'effort tranchant

Renforcement à la flexion et au tranchant

Pour reprendre les efforts de flexion positive trop importants, nous installons des bandes de TFC dans la face inférieure des poutres.

Lorsque la sollicitation à reprendre c'est la flexion négative, nous plaçons des bandes dans la partie supérieure des parois de la poutre.

Finalement, lorsque les armatures d'effort tranchant sont insuffisantes, nous rajoutons des bandes latérales de TFC.

Voici le détail des renforts dimensionnés pour les différentes poutres :

Tableau 139. Renforcement des poutres en X :

POUTRES en X	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur de TFC néccessaire (bandes 300mm)
SS A12	0	1	0	1,61	1,61
SS A15	1	0	0	1,61	3,23
SS C03	1	1	0	2,44	7,31
SS C04	2	1	27	1,65	8,56
SS C05	1	0	0	1,95	3,90
SS C06	1	0	0	1,73	3,45
SS C07	1	0	0	1,61	3,23
SS C08	1	0	0	1,73	3,45
SS C09	2	1	0	1,84	9,19
SS C11	1	0	0	1,95	3,90
SS C16	1	1	0	1,95	5,85
SS C18	1	0	0	1,84	3,68
RDC A03	1	0	0	2,44	4,88
RDC A07	1	0	0	1,61	3,23
RDC C03	1	0	0	2,44	4,88
RDC C04	1	2	22	1,65	6,85

RDC C05	2	0	0	1,95	7,80
RDC C09	1	0	0	1,84	3,68
RDC C10	1	0	0	2,36	4,73
RDC G03	1	0	0	2,44	4,88
PREMIER A03	1	0	0	2,44	4,88
PREMIER A07	1	0	0	1,61	3,23
PREMIER C03	1	0	0	2,44	4,88
PREMIER C04	1	2	54	1,65	7,22
PREMIER C05	1	0	0	1,95	3,90
PREMIER C09	1	0	0	1,84	3,68
DEUXIEME C04	1	1	0	1,65	4,95
				TOTAL	**131 m**

Tableau 140. Renforcement des poutres en Y :

POUTRES en Y	MOMENT NEGATIF	MOMENT POSITIF	TRANCHANT	RENFORT TFC	
	Nombre de couches latérales (haut)	Nombre de couches (bas)	Aire des bandes latérales (toute hauteur) (mm2/m)	Longueur poutre (m)	Longueur de TFC néccessaire (bandes 300mm)
SS 02E	1	0	0	2,70	5,40
SS 02G	1	0	0	2,48	4,95
SS 03G	Pas possible				-
SS 05A	Pas possible				-
SS 06A	Pas possible				-
SS 08A	1	0	0	3,45	6,90
SS 10A	0	2	0	3,45	6,90
SS 11A	0	1	0	3,45	3,45
SS 16A	1	3	0	3,45	17,25
SS 17A	3	4	0	3,45	34,50
				TOTAL	**79 m**

Trois poutres en Y ne peuvent être renforcées uniquement avec des couches de TFC. C’est dans la partie la plus proche à l’encastrement qu’elles posent problème. Il faut les renforcer localement par un autre moyen comme par exemple un accroissement de la section ou l’installation de lamelles.

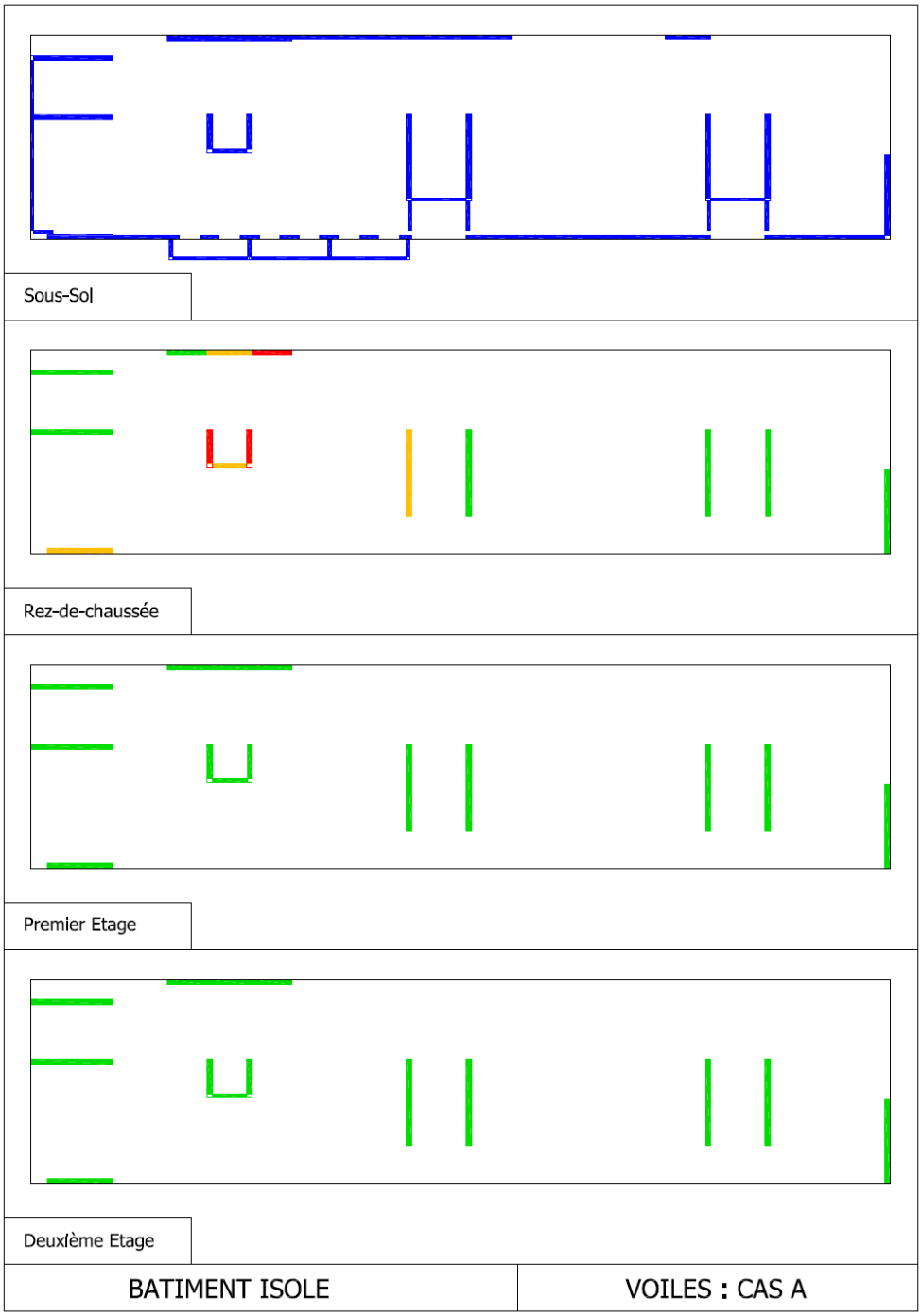
Renforcement complémentaire-Voiles

Les éléments à renforcer de façon complémentaire sont présentés dans le tableau suivant :

Eléments du sous-sol non étudiés

Eléments défaillants à la flexion

Eléments défaillants au cisaillement



Renforcement à l'effort tranchant

Tableau 141. Renforcement vertical à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT VERTICAL	Nombre	b (mm)	e (mm)	H Voile (m)	LTFC (m)
Voile 30 en X RDC G02	1	150	0,48	3,5	7
Voile 30 en Y RDC 10D	1	150	0,48	3,5	7
				TOTAL	14 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, les bandes de TFC verticales doivent être doublées d'un côté et de l'autre de la longueur du voile.

Tableau 142. Renforcement horizontal à l'effort tranchant :

RENFORCEMENT HORIZONTAL	Nbre lignes	Nbre 1c	Nbre 2c	Nbre 3c	b (mm)	e (mm)	s (mm)	L Voile (m)	L TFC (m)
Voile 20 en X RDC D05	1	3	2	0	150	0,48	13	2,6	18
Voile 30 en X RDC A05	1	3	2	0	150	0,48	113	2,6	18
Voile 30 en Y RDC 05D	1	6	2	0	150	0,48	0	3,75	38
Voile 30 en Y RDC 06D	1	6	0	0	150	0,48	60	2,1	13
								TOT	87 m

Seulement les voiles de faible longueur par rapport à la hauteur des étages (3,5m) ont besoin de bandes horizontales.

Renforcement à a flexion

La défaillance des voiles à la flexion est due principalement à la flexion par rapport à leur axe faible d'inertie. Le renforcement TFC à mettre en place est donc assez important pour compenser le faible bras de levier et occupe toute la longueur des voiles.

Tableau 143. Renforcement à la flexion :

RENFORCEMENT FLEXION	Nbre 1 couch	Nbre 2 couch	Nbre 3 couch	b (mm)	e (mm)	s (mm)	H Voile (m)	L TFC (m)
Voile 30 en X RDC A06	6	1	0	300	0,48	33	3,5	56
Voile 30 en Y RDC 05D	Pas possible						3,5	-
Voile 30 en Y RDC 06D	2	0	0	300	0,48	1500	3,5	14
							TOT	70 m

Du fait de l'alternance des charges sismiques, le renforcement est symétrique dans les deux faces des voiles.

Un voile ne peut être renforcé à l'aide de bandes de fibres de carbone : il est nécessaire d'augmenter sa section de béton armé.

Annexe 12 Exemples d'application des différents renforcements

Dans les légendes des images utilisées dans cette annexe, on indique la référence depuis laquelle elles ont été obtenues.

Renforcement par rajout de voiles

Il s'agit d'une solution classique pour des bâtiments avec une forte irrégularité ou avec un manque de contreventement face au séisme.

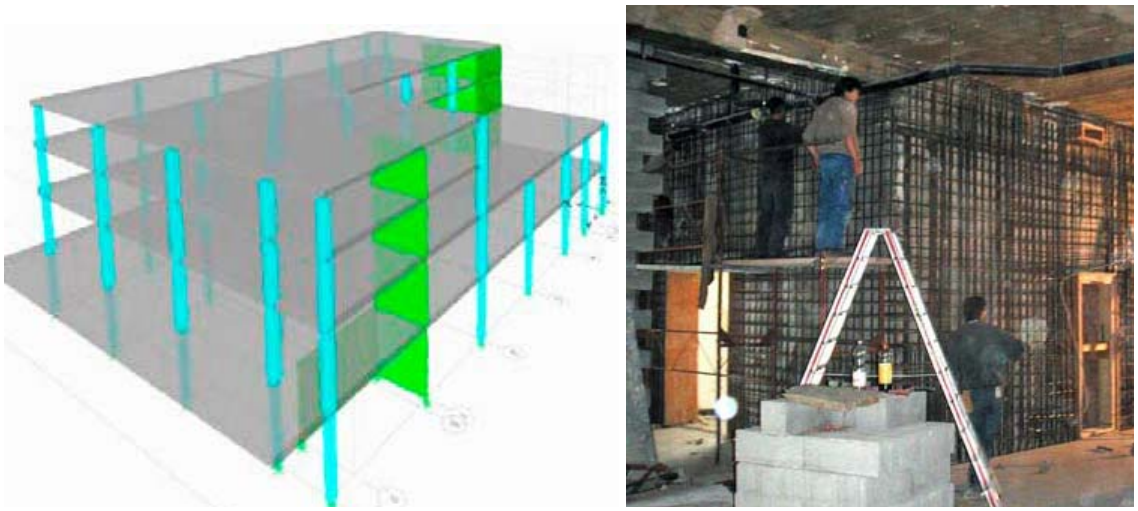


Figure 74. Rajout de voiles en béton armé sur toute la hauteur (Sion 2005) [Ref. 1]

Figure 75. Construction d'un nouveau voile en façade (Fribourg 2002) [Ref. 1]

Figure 76. Construction d'une paroi accolée au noyau central (Zurich 2006) [Ref. 1]

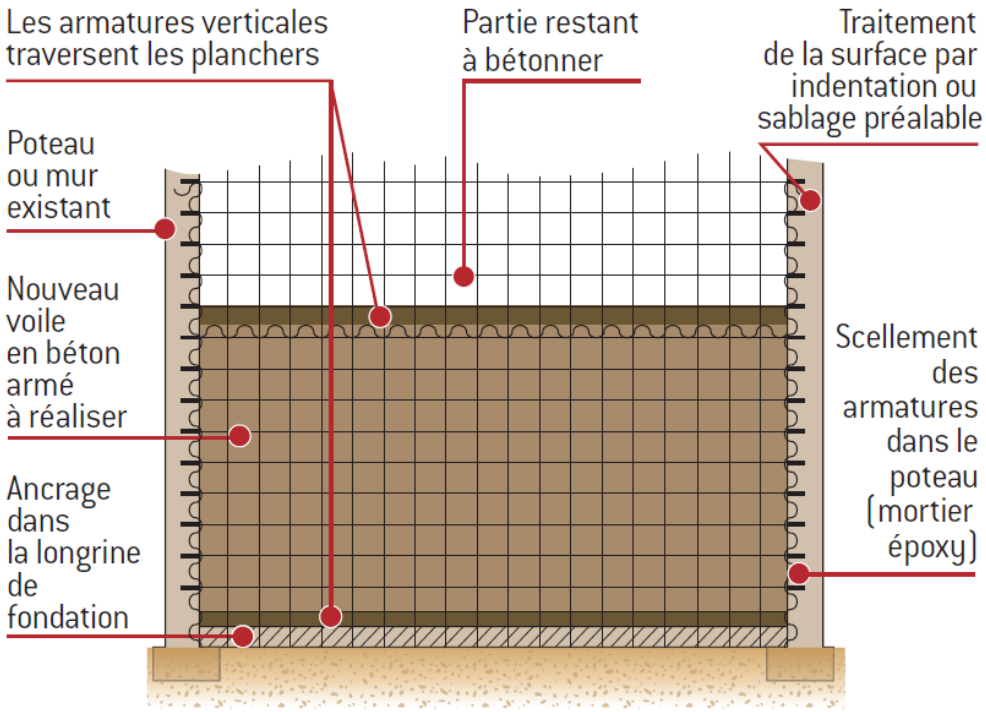


Figure 77. Schéma explicatif pour la création de nouveaux voiles [Ref. 2]

Renforcement par fibres de carbone

Renforcements possibles d'un bâtiment

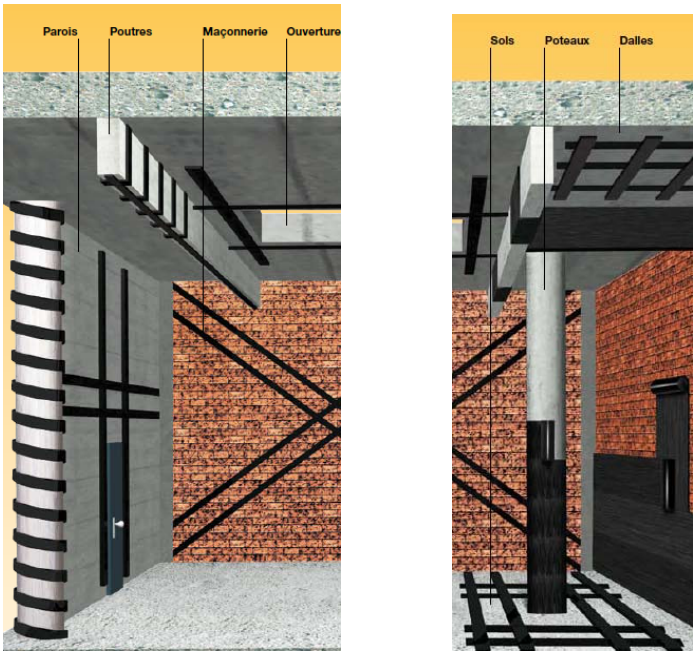


Figure 78. Schéma illustratif des renforcements TFC d'un bâtiment [Ref. 3]

Renforcement de poutres

Figure 79. Renforcement à la flexion de poutres [Ref. 3] et [Ref. 4]

Renforcement de poteaux

Figure 80. Renforcement de poteaux par spires de TFC [Ref. 3]

Renforcement de voiles

Figure 81. Renforcement local d'un noyau en béton armé (Berne 2006) [Ref. 1]

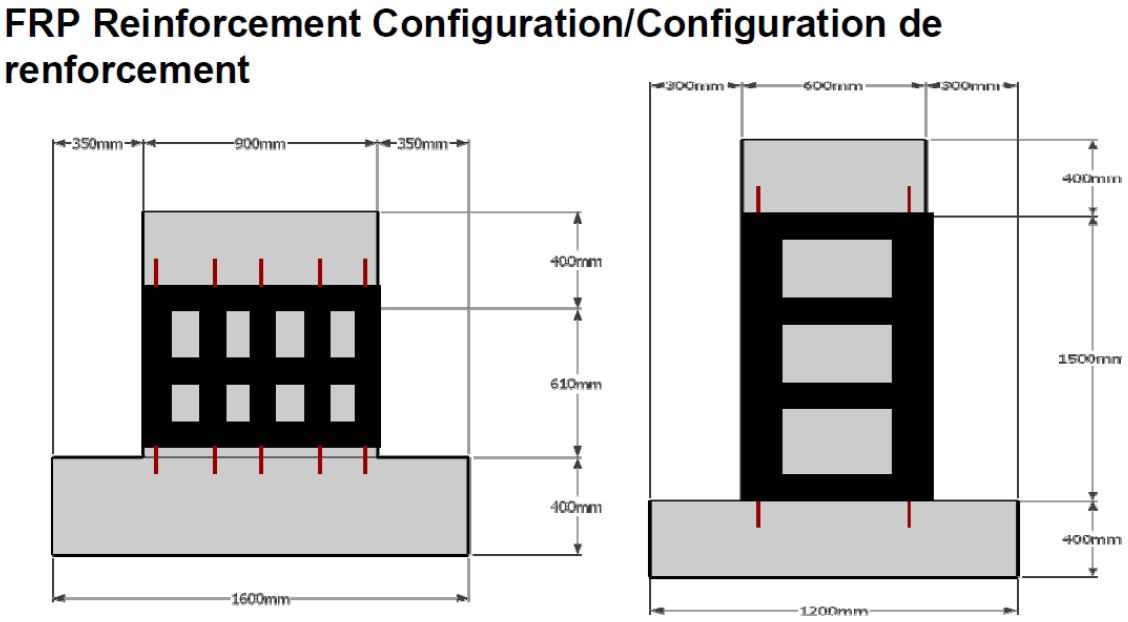


Figure 82. Schéma explicatif pour le renforcement des voiles [Ref. 5]

Renforcement par raidisseurs métalliques en façade

C’est une solution classique pour ce des bâtiments en béton armé de faible hauteur, que l’on trouve fréquemment dans le bâti. L’impact visuel de cette solution est assez important, ce qui demande une recherche soignée des contreventements mis en place.

Figure 83. Renforcement d’un bâtiment administratif [Ref. 6]

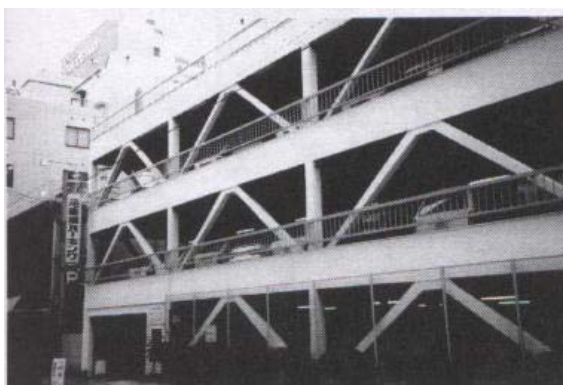


Figure 84. Exemples de contreventement en façade [Ref. 7]

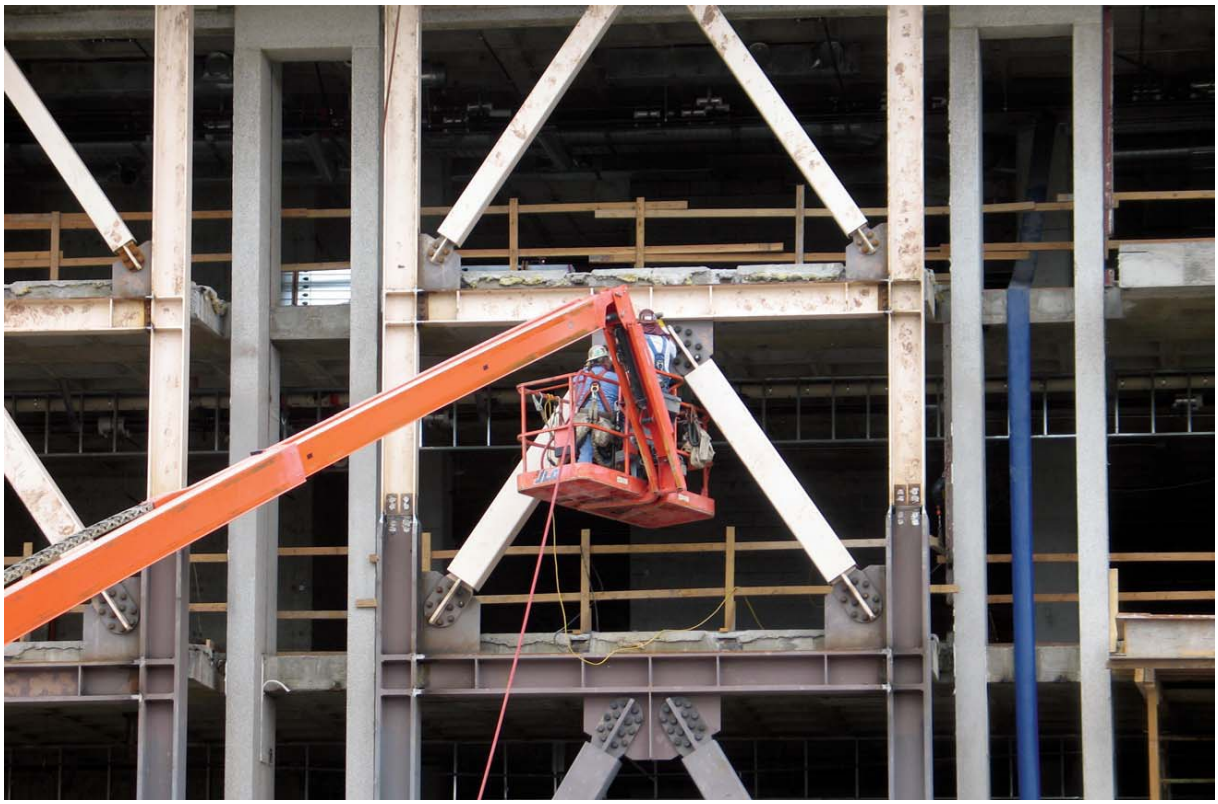


Figure 85. Exemples de contreventement en façade [Ref. 8]

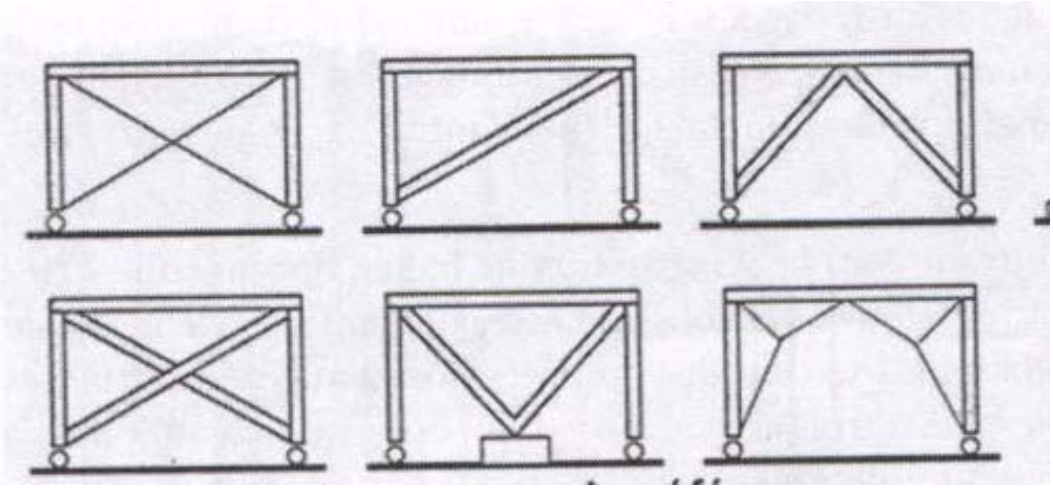


Figure 86. Disposition recommandée des bras métalliques ou cables [Ref. 7]

Renforcement par raidisseurs métalliques internes et externes

Il est nécessaire d'étudier soigneusement la distribution des renforcements internes pour éviter une dégradation de la qualité d'utilisation du bâtiment.

Figure 87. Renforcement d'un bâtiment scolaire [Ref. 6]

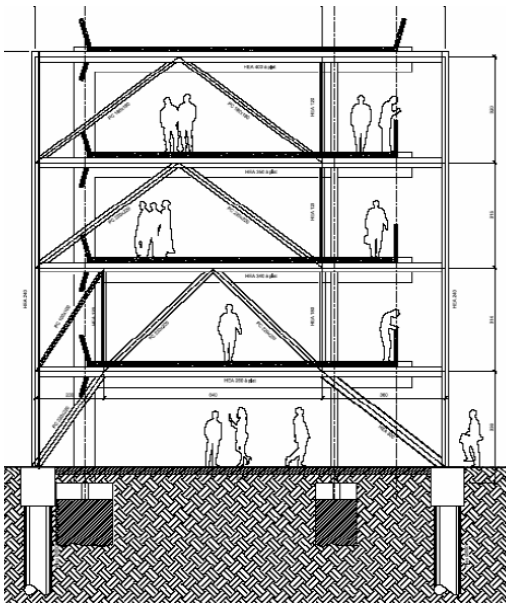


Figure 88. Schéma de la distribution possible des raidisseurs internes. [Ref. 6]

Figure 89. Raidisseurs internes pour le Studio de la Radio à Zurich (2004). [Ref. 1]

Figure 90. Raidisseurs internes pour un centre commercial (2005). [Ref. 1]

Bras métalliques avec amortissement

L'amortissement dans les bras métalliques permet de dissiper de l'énergie lors du séisme et donc de diminuer la durée et l'ampleur des vibrations dues au séisme.

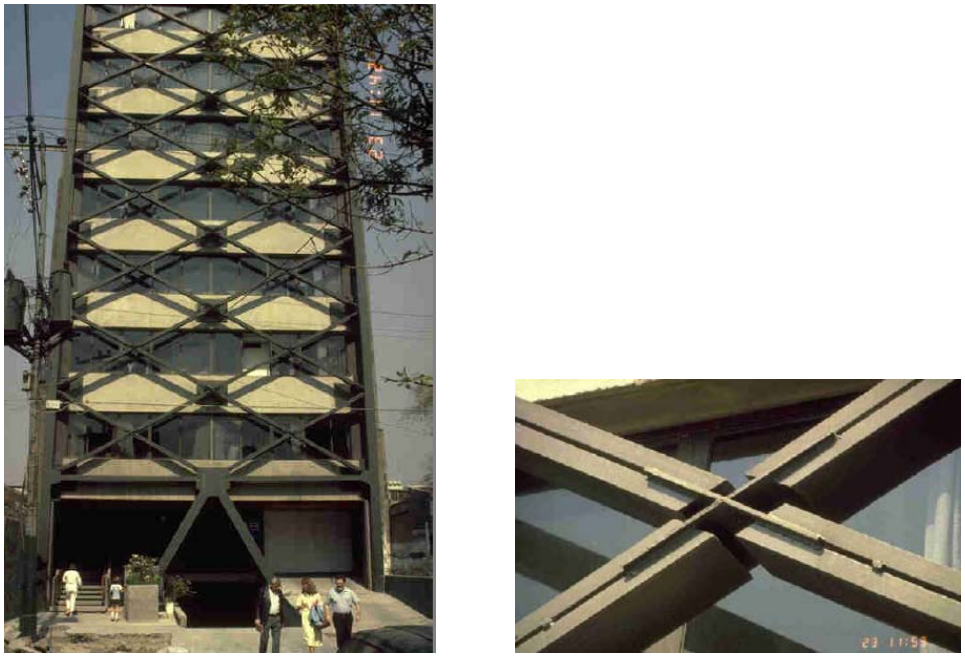


Figure 91. Renforcement par bras métalliques frottants [Ref. 6]

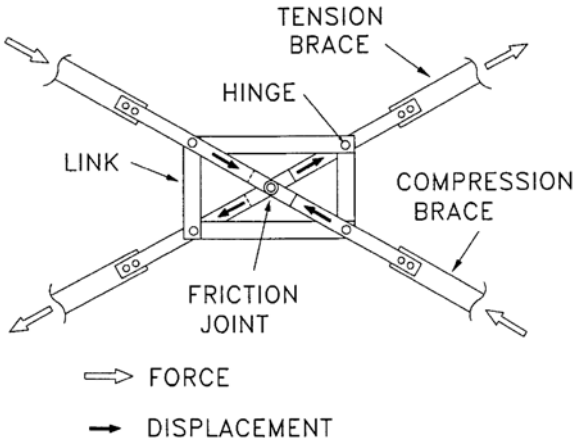


Figure 92. Détail du système d'amortissement par frottement [Ref. 9]

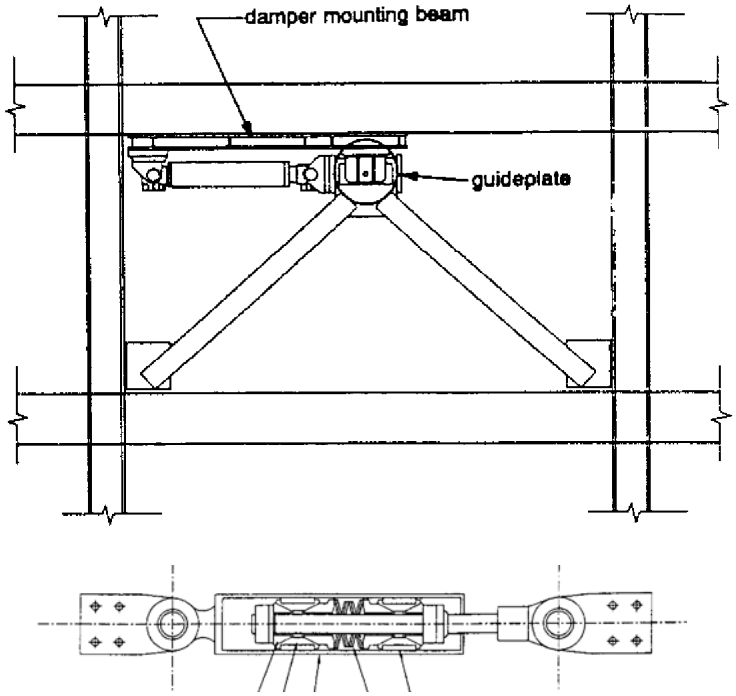


Figure 93. Bras métalliques avec amortissement visqueux [Ref. 9]

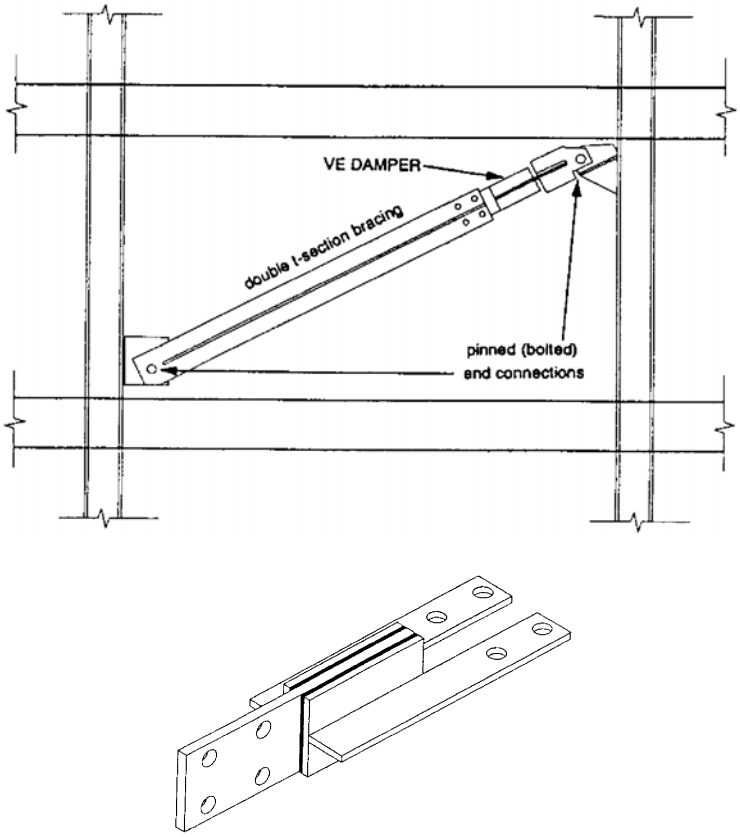


Figure 94. Bras métalliques avec amortissement visco-élastique [Ref. 9]

Isolation

Plusieurs bâtiments ont été renforcés au Japon par isolation à la base. En particulier, des bâtiments en béton armé de hauteur moyenne comme le bâtiment étudié.

Les renforcements peuvent être aussi-bien au niveau d'un des étages du bâtiment (sous-sol ou autre), comme c'est le cas pour le bâtiment de l'Université Nihon à Tokyo, ou bien sous les fondations existantes et reposant sur des nouvelles fondations, comme c'est le cas pour le bâtiment gouvernemental à Tokyo dans la deuxième image.

Figure 95. Renforcement par isolation au sous-sol (Tokyo-1999) [Ref. 10]

Figure 96. Renforcement par isolation sous fondations (Tokyo-2000) [Ref. 10]

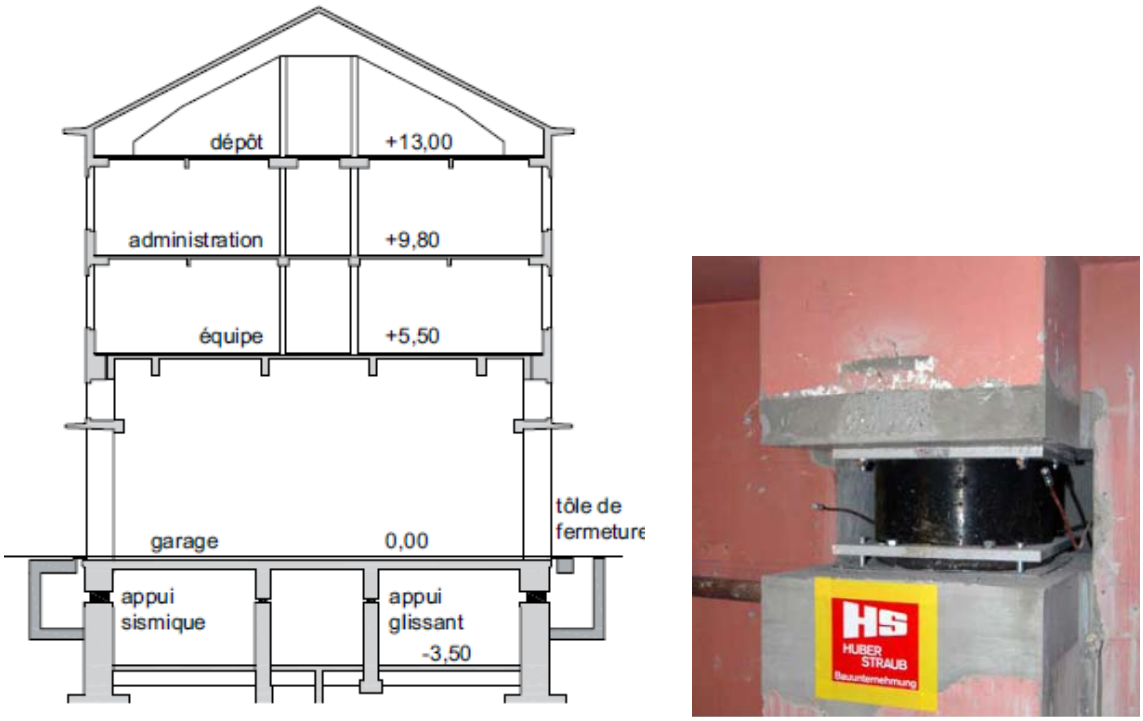


Figure 97. Renforcement par isolation au sous-sol d'une caserne [Ref. 1]

Detail de mise la en place de l'isolation

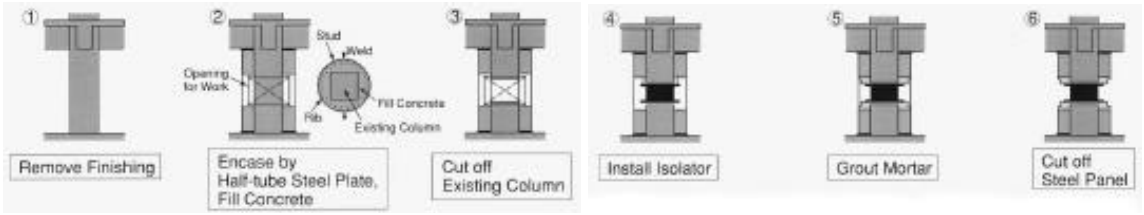


Figure 98. Isolation des poteaux au niveau d'un étage [Ref. 10]

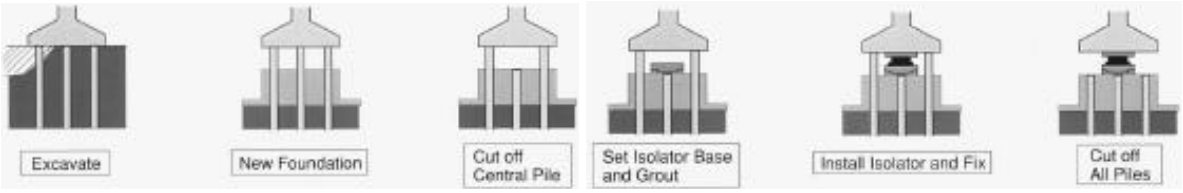


Figure 99. Isolation sous les fondations existantes [Ref. 10]

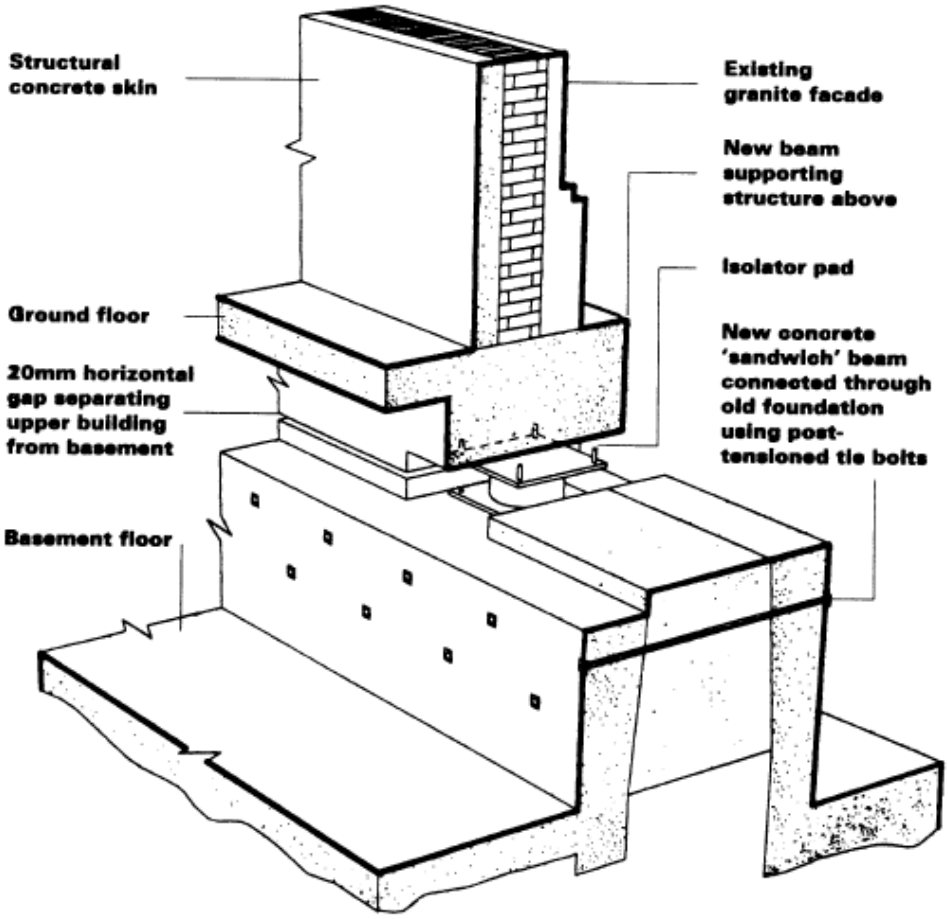


Figure 100. Isolation sous les fondations existantes [Ref. 11]

Figure 101. Isolation sous les fondations existantes (Passenada City Hall) [Ref. 12]