

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction

ESTIMATION DE L'INDICE DE VULNERABILITE SISMIQUE POUR LES PONTS

Par

DJEMAI Mohamed Chérif

Devant le jury composé de

N. BOURAHLA	Professeur, U. de Blida	Président
M. HADID	Maitre de conférences, E.N.S.T.P. Alger	Examineur
M. ABED	Professeur, U. de Blida	Examineur
M. BENZAIBI	Maitre de conférences, U. de Blida	Rapporteur

Blida, 2010

RESUME

La vulnérabilité sismique des ouvrages d'art est une priorité pour les gestionnaires. Aussi il convient de disposer d'un outil fiable permettant d'appréhender le sujet. A cet effet, une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des ponts a été mise en œuvre. Cette méthode se base sur le principe de l'indice de vulnérabilité. Cet indice est un estimateur de l'état du pont. Il se base sur un certain nombre de paramètres développés par Kubo et Katayama. Ces paramètres sont affectés d'un coefficient en fonction de leur classement. Cette classification a été mise en œuvre dans un programme Delphi permettant l'estimation de l'indice de vulnérabilité d'un pont. Une tentative d'ajout d'autres paramètres a été réalisée aussi. Plusieurs exemples de ponts sur les Wilaya d'Alger et de Tipaza ont été étudiés.

ABSTRACT

The seismic vulnerability of structures is a priority for the managers, so it is advisable to have a reliable tool allowing to deal with the matter. For that purpose, a method for assessing the vulnerability of bridges has been implemented, this method is based on the principle of the vulnerability index. This method is based on a certain number of parameters developed by Kubo and Katayama. However these parameters are affected by coefficients according to their classification, which was implemented in a Delphi program. The last allows the estimation of the vulnerability index of bridges. An attempt to add other parameters was also realized, several examples of bridges in Algiers and Tipaza were studied.

ملخص

يعتبر مدى مقاومة الجسور للزلازل من أولويات المسيرين، وللتطرق لهذا الموضوع من الضروري توفر أداة فعالة. في هذا الإطار قمنا بانجاز طريقة لتقدير مدى مقاومة الجسور للزلازل. هذه الطريقة تقوم على مبدأ "مؤشر الضعف". هذا المؤشر يقوم بتقدير حالة الجسر. يستند هذا المؤشر على معايير وضعت من قبل "كوبو" و "كاتاياما". وهي مرتبطة بمعاملات وفقا لأقسام معينة، أدخلت في برنامج دلفي يسمح بتقدير مؤشر الضعف الزلزالي للجسور. قمنا أيضا بإضافة معايير أخرى ودراسة عدة جسور موجودة في كل من ولاية الجزائر العاصمة و تيبازة.

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur Mahmoud Bensaïbi, promoteur, qui m'a soutenu tout au long de mon travail. Je le remercie très sincèrement pour l'encadrement scientifique apporté ainsi que pour le temps qu'il a consacré à ces multiples relectures et ces précieuses corrections.

Je remercie également messieurs les membres du jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance, ainsi que pour toute l'attention qu'ils portent et pour leurs nombreux conseils.

J'exprime ma plus profonde gratitude à ma famille, et notamment à mes parents pour m'avoir épaulé durant mes études. Sans leur aide, ce projet n'aurait pas pu aboutir. Je leur serai toujours redevable de tous les efforts qu'ils ont fournis à mon égard.

Je remercie aussi tous mes enseignants du primaire à la post graduation et particulièrement les enseignants du département de génie civil de l'université de Blida, qui ont participé d'une manière ou d'une autre à ma formation.

Mes remerciements particuliers vont également à Monsieur Mouloud Abdessemed et Monsieur Djamel Lagab pour leur contribution dans la mise en œuvre du projet, et pour l'aide qu'ils m'ont fournis.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes de la bibliothèque de l'université de Berkeley qui m'ont ouvert la porte de leur bibliothèque électronique pour télécharger les ouvrages nécessaires.

Enfin, Je n'oublie pas de remercier mes amis, mes collègues et tous ceux qui de près ou de loin, m'ont aidé et encouragé pendant ces années.

M.C.Djemai

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure1.1: Les composants d'un pont.	18
Figure1.2: Appareils d'appui en caoutchouc fretté.	19
Figure1.3: Appareils d'appui à pot.	20
Figure1.4 : Appareils d'appui métallique.	20
Figure1.5: Rouleau à faces aplaties.	21
Figure1.6 : Joint de chaussée.	22
Figure1.7 : L'étanchéité.	24
Figure1.8 : Pont en bois.	25
Figure1.9 : Les ponts en maçonnerie.	26
Figure1.10 : Pont à poutre.	30
Figure1.11 : Représentation schématique d'un arc à tablier supérieur.	31
Figure1.12 : Pont en arc (Trellins).	32
Figure1.13 : Pont en portique fermé.	32
Figure1.14 : Pont en cadre ouvert.	33
Figure1.15 : Élévation schématique d'un pont suspendu.	34
Figure1.16 : Pont suspendu. (Pont d'Akashi Kaikyo, Japon 1998).	34
Figure1.17: Schéma de principe d'un pont à haubans.	35
Figure1.18: Pont à haubans. (Pont de Normandie).	35
Figure1.19: Pont Bow-string.	36
Figure1.20: Pont à béquille.	37
Figure1.21: Pont à béquille double et simple.	37
Figure1.22: Pont levant.	38
Figure1.23 : pont levis.	38
Figure1.24: pont basculant.	39
Figure1.25: Pont tournant.	40
Figure1.26: Pont biais.	41
Figure1.27: Pont biais.	41
Figure1.28: Pont droit.	42
Figure1.29: Pont courbe.	42

Figure1.30 : Principe de la méthode de construction en encorbellement.	44
Figure1.31 : Ponts construits en encorbellement.	44
Figure1.32: Un cintre autolanceur.	48
Figure 2.1: Parties constituantes d'un système sol-pont.	54
Figure 2.2: Echappement longitudinal (Kobé,1995)	55
Figure 2.3: Echappement dû à une courbure importante (San Fernando,1971)	55
Figure 2.4: Exemple de butées latérales.	56
Figure 2.5: Rupture par effort tranchant.	56
Figure 2.6 : Endommagement des culées (Costa Rica 1990).	56
Figure 2.7 : Exemple de liquéfaction (Costa Rica, 1990).	57
Figure 2.8 : Liquéfaction du sol.	57
Figure 2.9 : Algorithme de classification des ponts selon le NYDOT.	63
Figure 3.1 : Organigramme de l'analyse de la vulnérabilité des ponts selon la méthode de « K. Kubo et T. Katayama ».	70
Figure 3.2 : Largeur du support du pont.	75
Figure 3.3 : section transversal du tablier du pont.	81
Figure 3.4 : Pont droit a une seule travée.	81
Figure 3.5 : Pont à deux travées séparées par piles colonnes.	82
Figure 3.6 : Pont à deux travées séparées par pile en fût massif.	82
Figure 3.7 : Le rayon et l'angle de courbure horizontale d'un tablier.	83
Figure 3.8 : Pont à tablier légèrement courbé.	83
Figure 3.9 : Pont à tablier moyennement courbé.	84
Figure 3.10 : Pont à tablier fortement courbé.	84
Figure 4.1 : Organigramme de calcul.	93
Figure 4.2 : Présentation de la page des paramètres d'identification.	95
Figure 4.3 : Présentation de la page des paramètres de calcul.	96
Figure 4.4 : Présentation de la page de rapport d'expertise.	96
Figure 4.5: Pont Krim Belkacem (Alger centre).	98
Figure 4.6 : Pont Mohamed V (Alger centre).	99
Figure 4.7 : Pont de la Gare Ferroviaire (Alger centre).	100
Figure 4.8 : Pont Krim Belkacem (Alger centre).	101
Figure 4.9 : Pont Siège de Parlement (Alger centre).	102
Figure 4.10 : carte du réseau routier de la wilaya de Tipaza.	104
Figure 4.11 : Pont de Bouyaghsane (Hadjout - Tipaza).	104

Figure 4.12 : Pont de Hachem (Sidi Amar - Tipaza).	105
Figure 4.13 : Pont de Harbil (Damous - Tipaza).	106
Figure 4.14 : Pont Ikhouba (Messalmoun - Tipaza).	107
Figure 4.15 : Pont Meurad (Hadjout - Tipaza).	108
Figure 4.16 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya de Tipaza par la méthode de «Kubo-Katayama ».	109
Figure 4.17 : Présentation de page d'accueil du programme VIPB.	111
Figure 4.18 : Présentation de la page des paramètres de calcul.	111
Figure 4.19 : Organigramme des composants du logiciel VIP.	112
Figure 4.20 : Pont Boukadir (Menaceur – Tipaza).	113
Figure 4.21 : Pont Mazafran (Douaouda– Tipaza).	117
Figure 4.22 : Pont Damous (Damous – Tipaza).	120
Figure 4.23 : Pont Piste Agricole (Fouka– Tipaza).	123
Figure 4.24: Pont Mazoum (Gouraya – Tipaza).	126
Figure 4.25 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya de Tipaza par la méthode modifiée.	128
Tableau 2.1 : Classement de la vulnérabilité sismique selon le NYDOT.	62
Tableau 3.1 : Tableau des paramètres de la méthode avec leurs coefficients de pondérations.	71
Tableau 3.2 : Tableaux des classes d'endommagement en fonction de "lv".	78
Tableau 3.3 : Transformation du MSK en MMI en fonction du PGA.	79
Tableau 3.4 : Nouvelles bornes d'intensité sismique en MMI.	79
Tableau 3.5 : Périodes fondamentales des modèles du paramètre typologie de la pile.	85
Tableau 3.6 : Périodes fondamentales des modèles du paramètre courbure du pont.	85
Tableau 3.7 : Déplacements extrêmes du 1er modèle pour le paramètre typologie de la pile.	85
Tableau 3.8 : Déplacements extrêmes du 2eme modèle pour le paramètre typologie de la pile.	86
Tableau 3.9 : Déplacements extrêmes du 3eme modèle pour le paramètre typologie de la pile.	86
Tableau 3.10 : Déplacements extrêmes du 1er modèle pour le paramètre courbure du pont.	86

Tableau 3.11 : Déplacements extrêmes du 2eme modèle pour le paramètre courbure du pont.	87
Tableau 3.12 : Déplacements extrêmes du 3eme modèle pour le paramètre courbure du pont.	87
Tableau 3.13 : Déplacements extrêmes du 4eme modèle pour le paramètre courbure du pont.	87
Tableau 3.14 : Déplacements moyens des modèles pour le paramètre typologie de la pile.	88
Tableau 3.15 : Déplacements moyens des modèles pour le paramètre courbure du pont.	88
Tableau 3.16 : Déplacements moyens pour chaque paramètre.	88
Tableau 3.17 : Coefficients des modèles pour le paramètre typologie de la pile.	88
Tableau 3.18 : Coefficients des modèles pour le paramètre courbure du pont.	88
Tableau 3.19 : Coefficients de pondération des nouveaux paramètres.	89
Tableau 3.20 : Tableaux des nouvelles classes d'endommagement en fonction de "Iv".	89
Tableau 4.1 : Résultats de l'application de l'exemple 01 (Alger centre).	99
Tableau 4.2 : Résultats de l'application de l'exemple 02 (Alger centre).	100
Tableau 4.3 : Résultats de l'application de l'exemple 03 (Alger centre).	101
Tableau 4.4 : Résultats de l'application de l'exemple 04 (Alger centre).	102
Tableau 4.5: Résultats de l'application de l'exemple 05 (Alger centre).	103
Tableau 4.6: Résultats de l'application de l'exemple 01 (W.Tipaza).	105
Tableau 4.7: Résultats de l'application de l'exemple 02 (W.Tipaza).	106
Tableau 4.8: Résultats de l'application de l'exemple 03 (W.Tipaza).	107
Tableau 4.9: Résultats de l'application de l'exemple 04 (W.Tipaza).	108
Tableau 4.10: Résultats de l'application de l'exemple 05 (W.Tipaza).	109
Tableau 4.11 : Résultats de l'application de l'exemple 01.	116
Tableau 4.12 : Résultats de l'application de l'exemple 02.	119
Tableau 4.13 : Résultats de l'application de l'exemple 03.	122
Tableau 4.14 : Résultats de l'application de l'exemple 04.	126
Tableau 4.15 : Résultats de l'application de l'exemple 05.	128

TABLES DES MATIERES

RESUME	2
REMERCIEMENT	3
TABLE DE MATIERES	4
LISTE DES ILLUSTRATION, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	5
INTRODUCTION	9
1. GENERALITE SUR LES PONTS	
1.1.Introduction	11
1.2. Les ouvrages d'art	11
1.3. Qu'est qu'un pont ?	12
1.4. Historique des ponts	12
1.5. Les composants d'un pont	17
1.6. Les types des ponts	24
1.7.Conclusion	48
2. VULNERABILITE SISMIQUE DES PONTS	
2.1. Introduction	51
2.2. Notions de base	52
2.3. Vulnérabilité sismique	53
2.4. Vulnérabilité sismique des ponts	53
2.5. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique	58
2.6. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts	58
2.7. Conclusion	67
3. METHODE DE « KUBO – KATAYAMA »	
3.1. Introduction	69
3.2. Méthode de «Kubo-Katayama »	69
3.3. Méthode Modifiée	78
3.4. Conclusion	91
4. PROGRAMMATION ET APPLICATION	
4.1. Introduction	92
4.2. Présentation de l'environnement Delphi	92
4.3. Méthode de «Kubo-Katayama »	92
4.4. Méthode Modifiée	110
4.5. Conclusion	129
CONCLUSION	130
ANNEXES	132
REFERENCES	148

INTRODUCTION

Les ouvrages d'art sont des moyens très importants dans l'infrastructure routière et ferroviaire, dont le coût, les délais de leurs constructions et leur réparation sont très élevés. Aussi leur rupture et mise hors service suite à des tremblements de terre occasionnent des pertes considérables.

Afin de prédire le niveau d'endommagement subi par les ponts durant et après des secousses sismiques, des études de la vulnérabilité sismique sont recommandés. Cette vulnérabilité peut être estimée par plusieurs méthodes.

Parmi ces méthodes, nous avons la méthode japonaise de « Kubo-Katayama ». Cette méthode détermine un coefficient appelé « indice de vulnérabilité » permettant d'estimer la vulnérabilité d'un pont selon une classification préétablie déterminée par retour d'expérience sismique.

En Algérie, une grande partie des ouvrages d'art sont situées en zone moyennement à fortement sismique. Près de 40% de ce patrimoine à plus de 50 ans d'âge, ce qui le rend vulnérable à l'action sismique.

Ce travail entre dans le cadre de la mise au point d'un outil fiable de diagnostique pour les ponts. Cet outil devrait permettre de classer les ponts existants en Algérie selon leur degré de vulnérabilité. Pour se faire nous avons mis en œuvre la méthode de « Kubo-Katayama ». Nous avons aussi apporté quelques modifications. Des exemples ont été traités aussi. Ceci a donné lieu à ce mémoire que nous avons décomposé en quatre chapitres.

Après une introduction sur le contexte de l'étude et l'organisation du mémoire, nous donnons dans le chapitre un, des généralités sur les ponts, leurs historiques, leurs composants ainsi que leurs types et mode de construction.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents dommages pouvant résulter de l'action sismique ainsi que les principales méthodes d'estimations de ces dommages.

Nous présentons dans le troisième chapitre la méthode étudiée à savoir la méthode de « Kubo – Katayama », ainsi que les modifications préconisées pour son emploi dans le contexte algérien.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la mise en œuvre numérique des deux versions de la méthode étudiée ainsi que les exemples traités par le programme développé sous Delphi et appelé VIPB (Vulnerability Index Program for Bridges).

Enfin, une conclusion générale permettant de faire la synthèse des résultats obtenus est donnée ainsi que quelques perspectives à ce travail.

Ce travail ne saurait être une finalité d'ailleurs les perspectives en sont une preuve. Il ne répond pas à toutes les questions mais tente d'ouvrir une porte sur un domaine complexe nécessitant des études plus approfondies.

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES PONTS

1.1. Introduction :

Les voies de communication qui assurent le transport des marchandises et des personnes, ont une importance cruciale pour la structure économique et sociale d'un pays. Parmi ces voies de communication nous avons les routes, les autoroutes et les chemins de fer qui nécessitent des ponts pour traverser des fleuves et des crevasses, de ce fait les ponts ont été une nécessité, et cela depuis les temps immémoriaux.

Au file des années, les ponts ont connu un développement remarquable grâce aux progrès réalisés dans les matériaux de construction (notamment le béton armé, le béton précontraint et les aciers), dans l'évolution des exigences et des moyens de calcul, ainsi que dans les méthodes de mise en œuvre qui ont permis la réalisation d'ouvrages exceptionnels par leurs portées, leurs hauteurs, et leurs designs.

Ceci a nécessité une connaissance de plus en plus approfondie de leurs conceptions vis-à-vis de différents paramètres tels que la circulation, le vent et le séisme afin d'assurer la longévité de ces ouvrages.

1.2. Les ouvrages d'art :

Un ouvrage d'art est une construction de grandes dimensions dont l'étude et la réalisation nécessitent des moyens exceptionnels faisant largement appel aux connaissances et au savoir-faire du génie civil. A titre d'exemple, on peut citer les types d'ouvrages tels que : ponts et tunnels, écluses, barrages, ascenseurs à bateaux et plans inclinés, murs de soutènement de grande hauteur, sculptures, nécessitant une étude de stabilité. A l'opposé : tours, canaux, aéroports, ne sont pas considérés comme des ouvrages d'art.

La construction d'un ouvrage d'art est envisagée sur décision du pouvoir politique, pour des raisons économiques ou dans le but de fluidifier le trafic (routier le plus souvent). Les directions et services gestionnaires des infrastructures routières ou hydrauliques jouent un rôle de charnière dans la conception et le suivi de l'exécution de l'ouvrage : toujours à la demande, elle étudie en effet la conception générale des projets (calculs, plans, métrés, estimations, clauses de cahiers des charges) ou examine les projets élaborés par d'autres directions [1].

1.3. Qu'est qu'un pont ?

Le terme pont est communément utilisé pour qualifier une structure reliant deux points séparés par une dépression ou par un obstacle, que ceux-ci soient naturels (cours d'eau, vallée, bras de mer) ou créés par l'homme (route, chemin de fer, canal, rivière). Plus généralement, il désigne un point de passage ou de transmission (de matière, d'énergie, d'information) entre deux zones.

Selon sa forme, un ouvrage d'art peut porter un nom particulier :

- ponceau : petit pont d'une seule travée, de l'ordre de 5-8 m ;
- aqueduc : canal souterrain ou aérien destiné à transporter de l'eau ;
- buse : aqueduc souterrain de forme circulaire pour le passage d'un ruisseau sous un remblai ; il porte aussi le nom de dalot quand il est en maçonnerie ;
- viaduc : ouvrage de grande longueur constitué de plusieurs travées et situé à hauteur élevée par rapport à la brèche ;
- passerelle : pont léger livrant passage à de faibles charges, piétons, cyclistes,... [1].

Comme il peut porter aussi un nom selon leur destination par exemple pont-route, pont autoroute, pont-rail et pont canal.

1.4. Historique des ponts :

Afin de comprendre la conception des ponts, nous allons voir leur évolution au cours du temps.

1.4.1. Les premiers ponts :

Les premiers ponts se limitent probablement à un arbre, à des rondins placés en travers d'un cours d'eau, ou à des lianes ou des cordes tendues au travers d'une vallée étroite. De telles structures sont toujours utilisées. Le principe du pont à suspension est extrêmement ancien ; il permet de franchir des distances considérables avec une remarquable économie de moyens. Une corde unique tendue en travers d'une gorge en représente la forme la plus essentielle. On peut l'améliorer en y ajoutant des cordes supplémentaires, un tablier, des côtés pour former des mains courantes. Au VIII^{ème} siècle, en Chine, sont construits des ponts sur ce modèle avec des chaînes en fer.

Lorsque la morphologie du terrain rend difficile la création d'un pont suspendu, on édifie des ponts à travée unique ou multiple. Le pont à piles intermédiaires, amélioré en déposant des rondins pour relier les pierres, est le prototype du pont à travées multiples. Des pieux en bois, enfoncés dans le fond d'une rivière, permettent de constituer les piles. Elles supportent le pont et assurent à la structure en rondins ou en poutres des appuis au milieu du cours d'eau. De tels ponts sur chevalets (support en charpente) sont encore très utilisés pour traverser les vallées ou les cours d'eau, à des endroits où ils ne gênent pas la circulation fluviale. L'utilisation de piliers en pierre comme supports intermédiaires marque un progrès supplémentaire dans la construction des ponts à poutres en bois. Des bateaux sont parfois utilisés au lieu de piles fixes.

1.4.2. En antiquité :

Les ponts à poutres de bois semblent être le type de pont le plus couramment utilisé dans l'Antiquité, bien qu'un pont à arches en briques a été construit vers 1800 av. J.C. à Babylone, ainsi que d'autres formes de ponts, comme les ponts à suspension simple et les ponts à encorbellement, en Inde, en Chine et au Tibet [2].

Les Romains construisent de nombreux ponts sur chevalets en bois, dont l'un est décrit dans les Commentaires de « Jules César ». Ces ponts en bois atteignent 30 m de portée. Dès le II^e siècle av. J.C., ils construisent des ouvrages en maçonnerie dans les rivières, grâce à un ciment appelé pouzzolane (mélange de chaux, de sable, de poudre de roche volcanique de Pozzuoli et d'eau) et à la construction d'enclos provisoires appelés batardeaux. Ils bâtissent des arcs à claveaux, semi-circulaires, pour lesquels la poussée s'exerce principalement vers le bas. Après la construction des piles, ils posent un arc en bois sur lequel ils disposent les pierres taillées suivant un dessin adéquat, sans recourir au mortier [2].

Les ponts romains encore existants sont constitués d'une ou plusieurs arches semi-circulaires en pierre. À titre d'exemple, on peut citer le pont de « Martorell », près de « Barcelone », en Espagne, édifié vers 219 av. J.C., et le Pont « di Augusto » de Rimini, en Italie, datant du I^{er} siècle av. J.C. Le pont du Gard, à Nîmes, dont trois rangées d'arches atteignent 49 m de haut au-dessus de la rivière (le Gardon), enjambe une distance de 275 m. Parmi les grands aqueducs romains, c'est probablement le mieux conservé, malgré l'absence totale de mortier. Construit au I^{er} siècle av. J.C. il fait partie d'un aqueduc d'une longueur d'environ 50 km, destiné à l'époque à acheminer à Nîmes l'eau provenant d'une source située près d'Uzès [2].

1.4.3. Au Moyen Âge :

Au Moyen Âge, en Occident, l'arc brisé, plus facile à construire, car ne requérant pas une aussi grande précision dans la pose et l'ajustement des claveaux, prend le pas sur l'arc en plein cintre. Le pont d'An Ji, comportant une travée unique de 37 m avec un arc surbaissé, est construit en 605 en Chine, à Zhao Xian.

La réalisation de ponts en bois prend également de l'essor. Des charpentes inclinées permettent de raidir le tablier ; on construit aussi des travées en arcs réticulés dont la portée peut atteindre 60 m. Le pont Charles, qui enjambe la Vltava à Prague, est le plus long pont médiéval (516 m). Il

présente un mélange de styles particulier dû aux différentes reconstructions et rénovations dont il a fait l'objet : piles médiévales, arcs romains, tour du XII^e siècle (vestige du précédent pont) rénovée en style Renaissance, et tours hautes datant des XIV^{ème} et XV^{ème} siècles [2].

La construction du Vieux Pont de Londres est achevée en 1209 ; il est détruit en 1831. Ses piles et ses arcs sont trop irréguliers ; le fleuve, sous le pont, ne disposant que de la moitié de la largeur de son lit en amont, rend le courant si fort qu'il creuse un bassin en aval. Le tablier de ce pont supporte des maisons, qui sont détruites en 1763. On remplace alors deux des arches centrales par une seule, permettant ainsi la navigation. Il existe d'autres exemples célèbres de ponts supportant des maisons, tels que le Pont « Vecchio » à Florence (premier exemple occidental de pont à arc surbaissé), ou encore le « Rialto » à Venise [2].

1.4.4. A la Renaissance :

Durant la Renaissance, la forme des ponts est influencée par les études scientifiques des structures et des forces en jeu. Andrea Palladio décrit différents types de ponts à treillis en bois : cette armature exploite la rigidité du triangle, indéformable, équilibre les forces de compression et de traction, tout en nécessitant moins de matériau que les poutres ou les arcs. C'est au Japon, en Chine, mais aussi en Suisse, que sont construits des ponts en charpente, dont certains sont toujours utilisés. Le « Kapellbrücke », pont en bois construit au début du XIV^{ème} siècle à Lucerne, en Suisse, ravagé en grande partie par un incendie en 1993 et reconstruit à l'identique, comporte des poutres posées sur des pieux serrés, étayés et inclinés. Il est recouverte d'une toiture, et cette idée sera reprise et déclinée au XIX^{ème} siècle aux États-Unis [2].

En 1502, « Léonard de Vinci » conçoit le projet d'un pont qui doit être construit à Istanbul : un pont en arc en maçonnerie d'une seule travée de 240 m. Des projets moins ambitieux sont menés à terme au cours de ce siècle, tels que le pont Notre-Dame (1512) , qui sera détruit et remplacé en 1853 , et le Pont Neuf (1578-1604) à Paris, le Rialto (1588-1591) à Venise, le pont Santa

Trinità (1566-1569) à Florence, œuvre de l'architecte Bartolomeo Ammannati, dont la forme des arcs est très particulière ; on les dit « en anse de panier » [2].

C'est au XVIII^{ème} siècle que la construction des ponts en maçonnerie évolue le plus. Les piles sont plus légères, les voûtes plus nombreuses et les ponts plus bas, comme le Pont de la Concorde à Paris construit entre 1787 et 1792. A la fin du siècle apparaissent les premiers ponts en fonte [2].

Dès le XIX^{ème} siècle, l'invention du chemin de fer a entraîné un développement sans précédent des transports. Les ponts se multiplient. Les ponts métalliques apparaissent, comme le Viaduc de Garabit de Gustave Eiffel, et les ponts suspendus [2].

Le XX^{ème} est le siècle du béton. L'apparition du béton armé puis du béton précontraint rend les ingénieurs de plus en plus audacieux. Le plus spectaculaire est certainement le Pont de Normandie. Conçu par les services techniques de l'Équipement (le SETRA) et la DDE de Seine-Maritime, c'est l'un des plus longs ponts à haubans du monde : 856m de portée centrale et 2km200 de longueur. Ses deux pylônes font 214 mètres [2].

1.4.5. Aujourd'hui:

Les grands ouvrages sont systématiquement étudiés avec l'aide des architectes spécialisé et des ingénieurs en génie civil et en travaux publics, aussi bien du point de vue esthétique qu'environnemental, et structural [2].

La recherche et le développement en matière et en technique de construction des ponts jouent un rôle très important dans l'évolution des ponts, ses derniers se tournent maintenant vers des tabliers de béton renforcés de matériaux composites (fibres de verre et carbone), et vers des ponts mixtes construisent d'alliance entre le béton et l'acier ou le béton et le bois. Avec une étude de conception contenue une analyse des comportements différentiels des matériaux utilisés dans la construction de ces ouvrages.

Des ponts qui battront tous les records sont en cours de construction au Japon, en chine et au Danemark. Aujourd'hui, c'est au Japon que l'on retrouverait le pont à câbles le plus long. Le pont Akashi-Kaiko, terminé en

1998, relie les îles Honshu et Shikoku et laisse place à des travées de près de 2 000 mètres. Constitué de deux étages, l'un pour les voitures et l'autre pour le trafic ferroviaire, ses pylônes flexibles de 333 mètres (dont près de 300 au-dessus du niveau de l'eau) et ses câbles d'un diamètre de 110 centimètres supportent une tension de 120 000 tonnes. Sa construction a coûté des milliards de dollars.

1.5. Les composants d'un pont :

Quelle que soit leur application : pont-route, pont-rail, pont-canal, passerelles piétons et viaducs ou autres comprennent essentiellement des éléments porteurs et des supports (des appuis) comme il est représenté dans la figure 01. Les éléments porteurs transmettent aux supports les efforts provenant des charges qui agissent sur l'ouvrage, tandis que les supports transmettent ces efforts au sol par l'intermédiaire des fondations [3].

On distingue les éléments porteurs principaux (poutres principales, arcs, pylônes et haubans...) des autres éléments (entretoises, longrines, pièces de pont, bracons) qui servent à répartir les charges entre les éléments porteurs principaux. Cet ensemble s'appelle l'ossature.

Le tablier est la partie sensiblement horizontale du pont située sous la voie portée et destinée à supporter les surcharges dues à la circulation et les transmettre à l'ossature. L'ensemble comprenant les éléments porteurs et le tablier constitue la superstructure [4].

Les supports forment l'infrastructure. Parmi les supports, on distingue :

- Les culées : sont les éléments d'appui extrême, qui s'accroche à la rive.
- Les piles : sont les éléments d'appui intermédiaires, soutiennent le tablier entre les culées, si la longueur du tablier les nécessite [3].

Comme pour les bâtiments les fondations sont des éléments de structure qui ont pour objet de transmettre au sol les efforts apportés par l'ossature, donc elles constituent la partie essentielle de l'ouvrage.

Il existe plusieurs types des fondations:

- Fondations superficielles qui regroupent les semelles isolées, les semelles filantes et le radier général
- Fondations profondes qui sont les pieux, les puits et les barrettes.
- Entre les deux extrêmes, fondations superficielles et fondations profondes, on trouve les fondations semi-profondes dont la base se trouve au-dessus de la profondeur critique, mais pour lesquelles le frottement latéral ne peut être négligé : il s'agit des puits et pieux courts ou des barrettes de faible profondeur et de la plupart des caissons.

La travée est la partie du tablier située entre deux supports, qui correspond aussi à la portée. Dans le cas de pont en arc, on parle d'arches et non de travées.

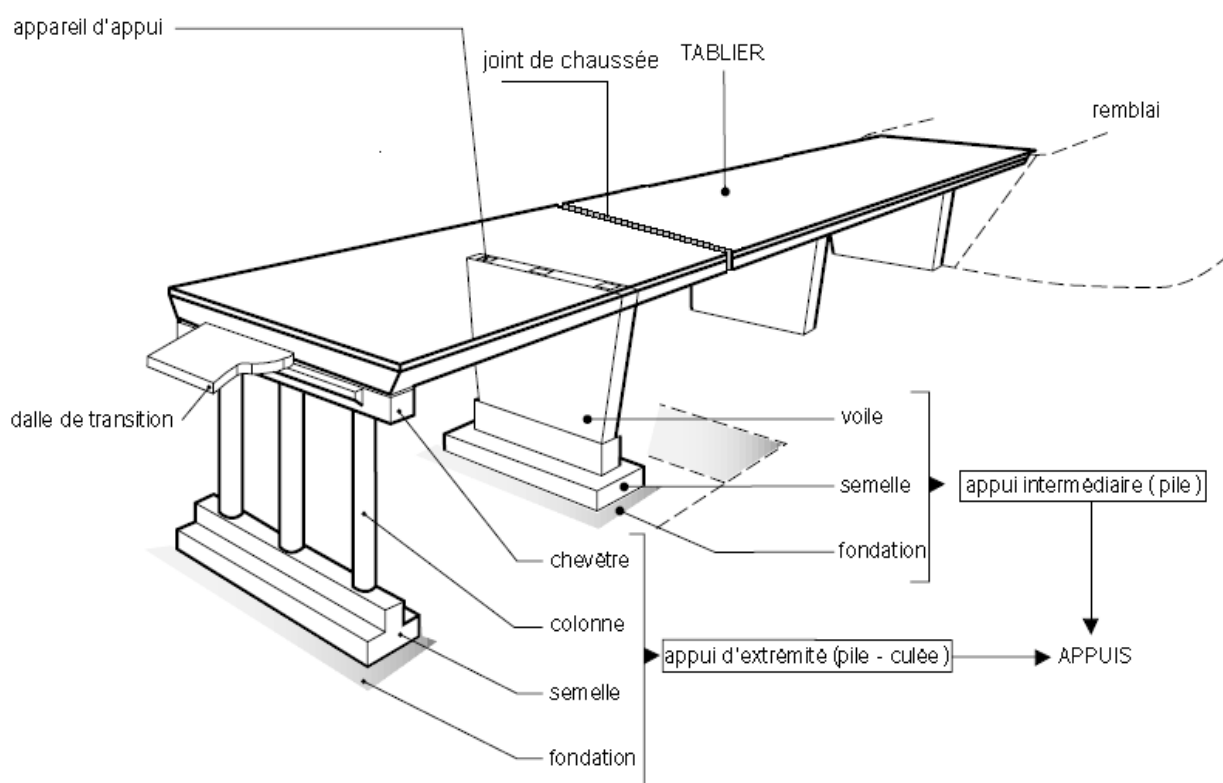


Figure1.1: Les composants d'un pont [3].

De plus on trouve dans les ponts d'autres éléments comme : les appareils d'appuis, les joints de chaussée, l'étanchéité, ...

Les appareils d'appuis :

Un appareil d'appui est un organe de liaison entre une structure (le tablier) et son support (une culée ou une pile), qui permet de transmettre les descentes de charges et d'absorber les déplacements, les efforts horizontaux et les rotations. Ils ne doivent pas être considérés comme des équipements car ce sont des organes faisant partie intégrante de la structure [5].

Il existe différents types d'appareils d'appui, desquels on cite:

- Les appareils d'appui en caoutchouc fretté : Un appareil d'appui en élastomère fretté indiqué dans la figure ci-dessous est un bloc d'élastomère vulcanisé renforcé intérieurement par une ou plusieurs frettes en acier, collées chimiquement (adhérisation) pendant la vulcanisation. L'élastomère est un matériau macromoléculaire qui reprend approximativement sa forme et ses dimensions initiales après avoir subi une importante déformation sous l'effet d'une faible variation de contrainte [5].

Ce premier type est divisé en trois sous modèles : appareils d'appui en élastomère fretté non adhésivé par vulcanisation, en élastomère fretté adhésivé par vulcanisation, et appareils d'appui en élastomère fretté avec plan de glissement inox [5].



Figure1.2: Appareils d'appui en caoutchouc fretté.

- Les appareils d'appui à pot : Les premiers appareils d'appui à pot sont apparus au début des années 60, car dès leurs premiers usages, ces appareils d'appui à pot ont été très largement employés et ils constituent le type d'appareil d'appui le plus utilisé après les appareils d'appui en élastomère fretté. Cette place importante est due à leur principe qui permet une forte

descente de charge pour un encombrement réduit, notamment en épaisseur. Un autre avantage est leur simplicité de conception qui permet de rationaliser la fabrication [6].

Le principe d'un appareil d'appui à pot est d'avoir un coussin cylindrique d'élastomère enfermé dans un pot et qui reçoit la charge par l'intermédiaire d'un piston formant couvercle du pot. L'élastomère ne peut se déformer qu'à volume constant ce qui lui permet de transmettre des charges élevées et d'autoriser les rotations imposées par la structure [6].

Ce type d'appareil est représenté dans la figure suivante.



Figure1.3: Appareils d'appui à pot [7].

- Les appareils d'appui métalliques : les photos suivantes indiquent quelques types d'appareils d'appuis métalliques qui sont constitués soit en plomb, en zinc ou en acier, et ils existent selon différents formes soit à plaques métalliques, à balanciers a contact linéaire, à balanciers a rotule axiale ou a rouleaux [7].



(a) Rotule



(b) Rotule sur plan de déplacement à rouleaux

Figure1.4 : Appareils d'appui métallique [7].



Figure1.5: Rouleau à faces aplaties [7].

Il existe aussi d'autres configurations des appareils d'appui telles que les sections rétrécies de béton, les bielles, etc.

Les joints de chaussée :

Un exemple de joint de chaussée est montré sur la Figure1.6. Ces joints raccordent deux dalles ou portions de revêtement routier susceptibles de subir des déplacements relatifs, lesdits joints étant agencés chacun de façon à obturer supérieurement une fente. Cette dernière s'étend entre les tranches terminales au regard de deux dalles, en vue d'assurer la continuité du roulement au droit de la fente. Étant constitués chacun par deux armatures rigides raccordées entre elles par une bande flexible en matériau élastomère ou analogue adhéree sur elles qui un profil en élastomère qui empêche la pénétration des corps étrangers, ces deux armatures reposant respectivement sur deux banquettes épaulées évidées dans les deux dalles de part et d'autre de la fente. Elle concerne plus particulièrement le cas où la largeur de la fente est relativement importante, à savoir en moyenne de l'ordre de 50 à 500 mm.

La bande flexible est constituée par un corps en élastomère présentant en section droite la forme d'un V ou U renversé à ailes épaisses, et armé par une plaque rigide noyée dans ce corps, et coiffant la fente. Ainsi que chaque

armature se termine du côté de la fente par un talon inférieur horizontal, sur lequel repose l'aile correspondante du corps en élastomère.

Dans la pratique, on considère que le niveau de ladite zone médiane du joint ne doit pas dépasser de plus de 2 mm le niveau moyen des faces supérieures des deux dalles pour que le roulement rapide d'un véhicule sur le joint ne se traduise pas par des secousses désagréables dudit véhicule. Or, dans la pratique, lorsqu' il fait très chaud et que la largeur de la fente est minime, il arrive que la dénivelée considérée atteigne, ou même dépasse, 5mm.

A cet effet, les joints de chaussée selon l'invention sont caractérisés en ce que la face inférieure de la plaque rigide armant leur bande flexible est concave et délimitée latéralement par deux plans légèrement inclinés sur l'horizontale et en ce que les talons de leurs armatures présentent des surfaces supérieures parallèles à ces plans [8].

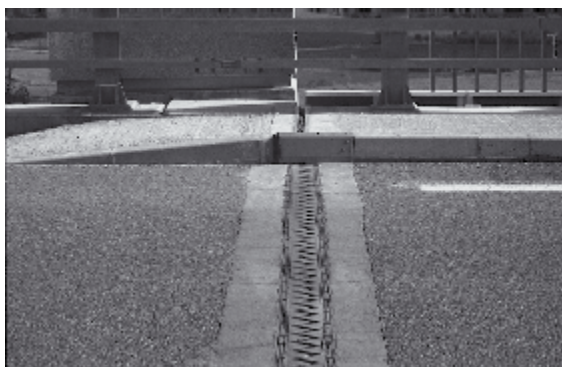


Figure1.6 : Joint de chaussée [9].

Le choix d'un type de joint de chaussée fait appel à une classification basée sur l'intensité du trafic et le souffle, on distingue :

- Les joints lourds pour les chaussées supportant un trafic journalier supérieur à 3000 véhicules.
- Les joints semi lourds pour un trafic entre 1000 et 3000 véhicules.
- Les joints légers pour un trafic inférieur à 1000 véhicules.

Tout en satisfaisant un certain nombre d'autres exigences non moins essentielles :

- Confort et esthétique : Souple, il assure la continuité de la surface de roulement quelle que soit l'importance de l'hiatus (espace entre les deux lèvres d'un joint de chaussée). Absence de bruits de vibrations.
- Résistance : Le choix des matériaux constitutifs (nature et qualité), est garant de bon comportement sous une circulation sans cesse croissante.
- Étanchéité : En assurant la continuité de l'étanchéité, il participe activement à la protection de l'ouvrage avec une bonne évacuation des eaux.
- Fiabilité : La pureté de sa conception et la simplicité de ses principes de fonctionnement lui confèrent son efficacité à long terme.

Le calcul du joint se base principalement sur les deux combinaisons suivantes :

- 1- Déplacement dû aux variations linéaires (déplacement, fluage, retrait, température) plus le déplacement dû au freinage.
- 2- Déplacement dû aux variations linaires plus déplacement dû au séisme et déplacement horizontaux dus à la variation du tablier.

L'étanchéité :

L'étanchéité des ponts a pour objet d'empêcher la pénétration des produits agressifs comme l'eau, les produits de combustion des véhicules, au-dessous de la face supérieure de la structure, elle est placée immédiatement sous la couche de roulement [10].

Les travaux d'étanchéité des ponts routes représentent environ 2% du coût total d'un ouvrage et sont donc d'un poids relativement faible par rapport aux autres éléments de la structure. Cependant les conséquences d'un mauvais choix du type d'étanchéité, des défauts d'application, d'usage de matériaux inadéquats, etc. peuvent compromettre la pérennité des ouvrages.

Le coût des réparations et de leurs conséquences dépasse alors largement le coût de l'investissement initial aussi bien du fait des travaux (démolition du revêtement, de l'étanchéité, réparation du support) que des conséquences de l'interruption de la circulation, totale le plus souvent. L'étanchéité (voir Figure1.7) constitue un élément primordial de la stabilité et de la durabilité de la structure [10].



Figure1.7 : L'étanchéité.

1.6. Les types des ponts:

Les ponts peuvent être classés suivant différents critères :

- Le matériau utilisé (ponts en bois, en maçonnerie, en acier, en béton, en béton précontraint...),
- La nature de la voie portée et leur destination (ponts-routes, ponts-rails, pont-canal, pont-aqueduc ...),
- La structure (ponts à poutres, ponts-dalles, ponts en arc, ponts-cadres, ponts à câbles, ponts bow-strings, ponts à béquilles,...).
- La mobilité de tablier (ponts fixes, ponts mobiles (pont levis, pont basculant, pont tournant, pont levant ...)).
- La forme (ponts droits, ponts biais, ponts courbes, ...),
- Leur mode d'exécution (ponts réalisés par encorbellement, par poussage, sur cintre, par rotation, par ripage, ...) [1].

Dans ce que suit on va développer les différents types des ponts selon les classifications citées ci-dessus.

1.6.1. classification selon le matériau de construction utilisé :

La variation des matériaux de construction donne lieu à certain types des ponts comme :

1.6.1.a. Pont en bois :

Les ponts en bois sont légers, faciles à monter et sa construction est rapide comme ils possèdent ainsi un fort potentiel de développement, en particulier les ponts pour piétons. Cependant, la pérennité de ces structures repose sur le choix de bonnes dispositions constructives protégeant le bois, ainsi que sur la qualité de leurs entretiens [11].



Figure1.8 : Pont en bois [11].

1.6.1.b. Pont en maçonnerie :

Les ponts en maçonnerie ou ponts à voûtes sont les premiers ponts durables réalisés. Le matériau de construction est la pierre. La voûte est constituée de pierres rayonnantes, comprimées sous la charge des véhicules empruntant le pont. Les efforts se répartissent sur les piles et sur les culées à chaque extrémité [12].

La pierre est un matériau facilement disponible et durable, pour la construction. Tout le poids du pont était supporté par la pierre centrale de l'arc du pont (la clé de voûte). Plus le pont était lourd, plus sa structure était forte [12].



Figure1.9 : Les ponts en maçonnerie [2].

1.6.1.c. Pont en acier :

L'acier est un alliage de fer et de carbone. Il a pour avantage de pouvoir résister à des efforts de traction importants, c'est pourquoi, dans les ponts suspendus, il est utilisé pour les câbles porteurs et les haubans, les voussoirs, l'ancrage ainsi que pour d'autres parties de la structure soumis à ces efforts [13].

Les fers laminés et profilés deviennent une production industrielle importante et peu chère. Ils simplifient la construction des ponts et permettent le passage lourd des convois ferroviaires. L'esthétique des ouvrages est toutefois particulière et la nuisance sonore forte.

1.6.1.d. Pont en béton armé:

Le béton est le matériau utilisé systématiquement pour la réalisation des fondations et des appuis de tous les ponts modernes. Il est aussi très largement appliqué pour l'exécution des tabliers, soit sous la forme de béton armé, soit sous la forme de béton précontraint. Tous les types de béton peuvent être envisagés dans le cadre de la construction d'un ouvrage d'art, pour les

ouvrages moyens et importants, les conditions et les règles de formulation, de préparation, de transport et de mise en place sont prise en compte et bien étudiées par les ingénieurs [3].

1.6.1.e. Pont en béton précontraint :

Pour renforcer le béton, (surtout en traction), on peut y ajouter des renforts actifs : ceux-ci sont des torons en acier : le câble est préalablement tendu, puis on coule la pièce en béton, puis on relâche les câbles pendant la prise : ceux-ci étant élastiques compriment l'ensemble et le renforce. Ce nouveau matériau qui s'appel béton précontrainte à donner une nouvelle évolution a la construction des ponts [14].

Les ponts à poutres préfabriquées en béton précontraint sont souvent très économiques, pour des portées allant jusqu'à une trentaine de mètres en précontrainte par pré-tension, et pour des portées comprises entre 30 et 50 m en précontrainte par post-tension. Ils sont d'autant plus intéressants que le nombre de poutres à réaliser est plus grand car des moyens de mise en place adaptés sont justifiés [4].

1.6.1.f. Pont mixte :

Depuis près de 50 ans, de nombreux ponts mixtes acier-béton ont été construits. Le bon comportement dans le temps de ces ouvrages a mis en évidence qu'une association intelligente des deux matériaux peut conduire à des structures porteuses durables, économiques et qui remplissent pleinement les exigences posées par les maîtres de l'ouvrage [15].

Au cours des dernières années, des développements successifs concernant aussi bien les matériaux que les méthodes d'analyse des structures ont eu lieu. Ces nouvelles connaissances ont abouti à une évolution de la conception et de la réalisation d'ouvrages mixtes caractérisés par plusieurs innovations marquantes dans ce domaine [15].

Le succès du pont mixte tient au bon rendement fonctionnel et structurel obtenu par l'association des deux matériaux acier et béton, et l'addition de leurs caractéristiques et propriétés intrinsèques.

On exploitera :

- la résistance à la compression du béton pour constituer la dalle;
- la résistance en flexion de l'acier pour former la poutre.

La dalle en béton se conjugue avec les trois formes de poutraison (sous chaussée) : poutres à âme pleine (bipoutres et multi poutres), poutres en caisson, poutres en treillis.

En l'état actuel des conceptions, la limite haute de portée économique pour un ouvrage mixte en multi travées continues est estimée à 120 m en âme pleine et un peu plus en caisson. Cette limite peut paraître basse et pourtant elle contient l'essentiel du marché. Il semble toutefois possible de repousser cette limite en développant des conceptions fondées sur une combinaison de poutre en treillis et de dalle en béton à haute performance [16].

1.6.2. Classification selon la nature de la voie portée et leur destination :

La nature de la voie portée et la destination des ponts, partagent ces derniers en :

1.6.2.a. Pont-route :

Ce type de pont est très reconnu, c'est un pont sur lequel passe une route.

1.6.2.b. Pont-rail :

Ce genre de pont a été construits à cause de l'évolution du chemin de fer. Sur ce type de pont passe un rail [16].

1.6.2.c. Pont-canal :

Un pont-canal est un pont qui permet à un cours d'eau navigable, généralement un canal, de franchir un obstacle en creux, une vallée ou un vallon le plus

souvent. Un autre usage du pont-canal est l'accès par l'amont à un ascenseur à bateaux. Un pont-canal permet le passage de la navigation au dessus d'une rivière (cas le plus fréquent), d'une route, d'une voie ferrée ou divers autres obstacles [17].

1.6.2.d. Pont-aqueduc :

L'acheminement de l'eau au plus près de son utilisation, que ce soit vers les villes, ou pour l'irrigation des cultures a toujours été une préoccupation de toutes les civilisations, de toutes les époques. La géographie du terrain ne se prêtant pas forcément à la seule édification de chenaux, il a souvent été nécessaire d'édifier des ouvrages pour faire passer les conduites et les canaux par dessus des obstacles, vallées ou rivières. Les aqueducs romains en sont un exemple spectaculaire. Donc on peut dire que l'aqueduc est un pont supportant un canal ou une conduite d'eau [17].

1.6.3. Classification selon la structure :

On peut également classer les ponts selon leur structure et leur fonctionnement mécanique en :

1.6.3.a. Ponts à poutres :

Sous le terme de ponts à poutres, on regroupe tous les ouvrages dont la structure porteuse reprend les charges essentiellement par son aptitude à résister directement à la flexion, les réactions d'appui étant verticales ou quasi verticales (Figure1.10) [4].



Figure1.10 : Pont à poutre [4].

Le tablier est, généralement, une structure linéaire dont les travées peuvent être indépendantes, continues ou exceptionnellement posséder des parties en console. Cette structure linéaire est réalisée à l'aide de poutres principales, parallèles à l'axe du pont, éventuellement reliées transversalement par des pièces de pont et des entretoises. Elles portent ou intègrent la couverture recevant directement la charge d'exploitation.

On peut diviser ce type de pont selon la section des poutres en : pont à poutres à section rectangulaire, section à talon et à section variable [4].

1.6.3.b. Ponts-dalles :

Les ponts-dalles peuvent être classés dans la catégorie des ponts à poutres car les réactions d'appui sont principalement verticales et le modèle de calcul des efforts longitudinaux est celui d'une poutre. Cependant, la dalle peut être :

a- **Pleine**: en général d'épaisseur constante, avec ou sans encorbellements latéraux;

b- **Elégie**: la présence d'évidements longitudinaux dans la masse de béton permet un gain de poids propre; (une dalle coulée avec des réservations permettant de diminuer son poids c'est comme la dalle alvéolaire en bâtiment).

c- **Nervurée** : elle peut être simplement nervurée (une seule nervure avec encorbellements latéraux), ou multi nervurée avec un hourdis intermédiaire entre les nervures.

Selon les portées, l'épaisseur de la dalle peut être constante ou variable dans le sens longitudinal [4].

1.6.3.c. Ponts en arc :

Un pont en arc est un pont en forme de voûte incurvée avec des butées à chaque extrémité, Il est utilisé lorsque la brèche à franchir est large et profonde. Le principe du pont en arc consiste à transférer une partie du poids du pont horizontalement contre les butées de l'un ou l'autre côté. Ce type de pont a été inventé par les Grecs antiques, qui l'ont construit en pierre. Plus tard, les Romains ajoutèrent du ciment à leurs constructions. Les Romains ne réalisèrent que des ponts en demi-cercles, mais des ponts plus longs, fins et elliptiques sont aussi possibles. Plusieurs de leurs ponts sont toujours debout de nos jours.

Pour ces ouvrages (Figure1.11), dont la structure porteuse fonctionne essentiellement en compression, les réactions d'appui sont inclinées; la composante horizontale de la réaction s'appelle la poussée. De telles structures ne sont envisageables que si elles peuvent prendre appui sur un rocher résistant. Sous cette condition, le domaine de portée des ponts en arc est très étendu (jusqu'à 500 m) [4].

Les arcs modernes sont généralement dotés d'articulations à leur naissance. On distingue les arcs à tablier supérieur (Figure1.12), pour lesquels le tablier est au-dessus de l'arc, les arcs à tablier intermédiaire ou inférieur lorsque le tablier est situé dans la hauteur ou au-dessous de l'arc [4].

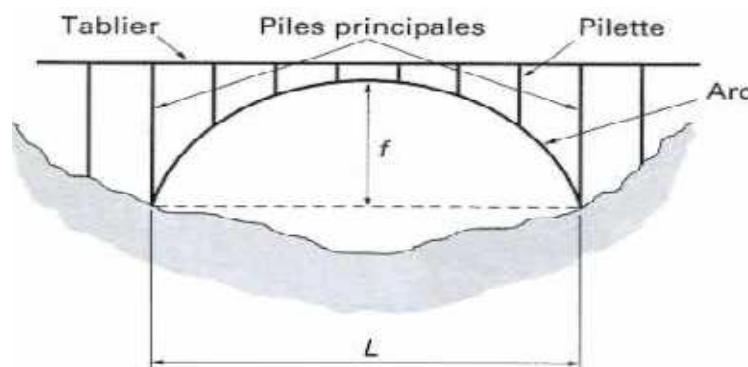


Figure1.11 : Représentation schématique d'un arc à tablier supérieur [4].

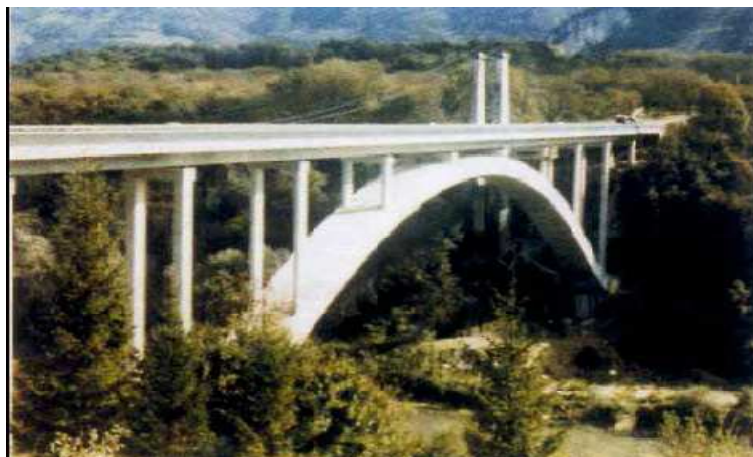


Figure1.12 : Pont en arc (Trellins) [4].

1.6.3.d. Ponts-cadres et portiques :

Une solution, qui convient bien dans le cas d'un remblai de faible hauteur, est celle du pont cadre en béton armé, complété par des murs en aile ou des murs en retour. Le cadre peut être fermé (Figure1.13), dans le cas d'un terrain médiocre notamment, ou ouvert (Figure1.14), en forme de portique. Le domaine d'emploi du cadre fermé couvre des ouvertures allant de 5 à 12 m environ. Les portiques simples sont couramment utilisés pour former des passages inférieurs, notamment sous les autoroutes, pour des ouvertures variant de 10 à 18 m. Cette solution est souvent plus économique qu'une simple dalle en travée indépendante, nécessitant des culées plus onéreuses que les piliers [4].



Figure1.13 : Pont en portique fermé.



Figure1.14 : Pont en cadre ouvert.

1.6.3.e. Ponts à câbles:

Entrent dans cette catégorie tous les ouvrages pour lesquels le tablier est supporté par des câbles. Ce sont des structures plus ou moins souples, adaptées au franchissement des grandes portées [4].

On distingue deux types d'ouvrages dont le fonctionnement mécanique diffère fondamentalement : les **ponts suspendus** et les **ponts à haubans**.

Les ponts suspendus :

Ce sont des ponts dont les éléments porteurs principaux sont des câbles auxquels les réactions du tablier sont transmises par des suspentes (Figure1.15). Ces câbles porteurs métalliques passent au sommet de pylônes et sont ancrés dans des culées de dimensions imposantes. Ces ouvrages sont le plus souvent à trois travées ; les travées latérales sont généralement des travées suspendues, quelquefois des travées indépendantes. (Le record actuel de portée est voisin de 1990 m) [4].

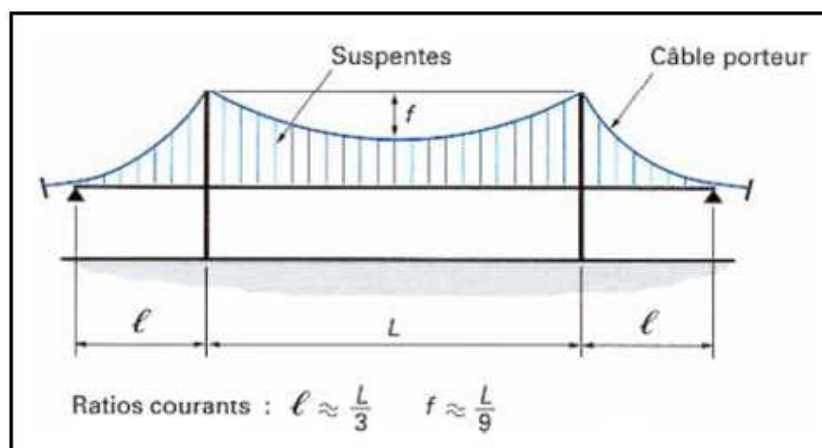


Figure1.15 : Élévation schématique d'un pont suspendu [4].



Figure1.16 : Pont suspendu. (Pont d'Akashi Kaikyo, Japon 1998).

Les ponts à haubans :

Ce sont des ponts dont les éléments porteurs principaux sont des poutres soutenues par des câbles obliques rectilignes appelés haubans (Figure1.17). Ces câbles sont placés, soit en une seule nappe dans l'axe du pont, soit en deux nappes latérales et sont disposés en harpe (haubans parallèles) ou en éventail (haubans convergents). Les réactions d'appui sont verticales et l'ouvrage fonctionne comme ceux de la catégorie des ponts à poutres soumis à la flexion composée du fait de la composante horizontale de la tension des haubans. Le domaine d'emploi des ponts à haubans tend actuellement à s'étendre en faisant reculer celui des ponts suspendus qui restent le seul type

de structure encore envisageable pour les très grandes portées. (Le record actuel de portée : 890 m) [4].

En remarque que les ponts à haubans ont de moins grandes portées que les ponts suspendus. Cela est dû au fait que les piliers où sont rattachés les haubans doivent être élevés : Plus le pont est grand, plus les piliers doivent être hauts et par conséquent, plus fragiles et vulnérables au vent et aux vibrations engendrées par la circulation [4].

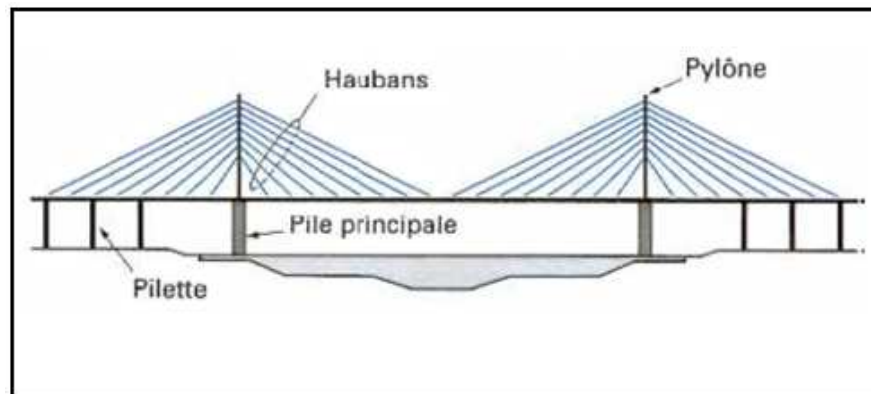


Figure1.17: Schéma de principe d'un pont à haubans [4].



Figure1.18: Pont à haubans. (Pont de Normandie) [3].

1.6.3.f. Ponts bow-strings :

La formule des ponts bow-string est connue depuis longtemps. Elle convient particulièrement au franchissement de voies navigables ou de vallées par une portée unique à partir de points d'appui de hauteurs identiques, Le

principe de l'arc tendu permet de traiter avec une grande légèreté le tablier qui fait office de membrure inférieure de ce type de pont, ce qui, pour les voies navigables, permet notamment de répondre aisément aux normes de gabarit fluvial.

Un pont bow-string est une catégorie de pont munie d'un tablier (tirant) et de poutres latérales (en arc au dessus du tablier) qui sont encastrés l'un dans l'autre aux extrémités. En travée, le tablier est tenu par des suspentes souvent à la verticale. (Figure1.19)

Dans le cas des ponts bow-strings, la poussée de l'arc est équilibrée par la traction du tirant horizontal et rend ainsi les réactions d'appui verticales. Ce cas particulier d'ouvrage, bien qu'apparaissant extérieurement comme un pont en arc, possède un tablier dont le fonctionnement mécanique est celui d'un pont à poutres [4].



Figure1.19: Pont Bow-string [4].

1.6.3.g. Les ponts à béquilles :

A l'origine, le pont à béquilles avait la forme d'un portique avec des piles-culées verticales encastrées au tablier. Ce concept permettait de réduire la hauteur des poutres principales et de mieux passer les contraintes de gabarit avec un tablier plus mince. Il en va de même des portiques ouverts qui sont des ponts à «béquilles verticales», d'usage courant sous un remblai de faible épaisseur [13].

Dans une forme moderne, les béquilles sont élancées, inclinées à 45° ou 50° et encastrées sur le tablier qu'elles divisent en trois travées. Les appuis, très en retrait, permettent ainsi, selon les cas, soit une forte prise d'appui sur les flancs d'une vallée en gorge, soit un élargissement de l'ouverture du pont sur une voie d'eau navigable. Là aussi, la combinaison des sollicitations de flexion et compression dans les béquilles et dans la travée centrale du tablier, la poussée sur les massifs d'appui suggèrent bien le fonctionnement en arc [13].

Pour certains franchissements encaissés, on peut également réaliser ces ponts à béquilles obliques. Lorsqu'ils sont bien conçus, ces ouvrages sont esthétiques et s'intègrent très harmonieusement dans le paysage, mais la complexité de leur coffrage renchérit notablement leur coût de construction (Figure1.20) [4].

Les ponts à béquilles (verticales ou obliques) peuvent être rattachés à la famille des arcs. L'association de béquilles doubles écartées ou simples en queue de billard avec une variation d'inertie du tablier (Figure1.21) offrent au concepteur une grande liberté d'expression architecturale [4].

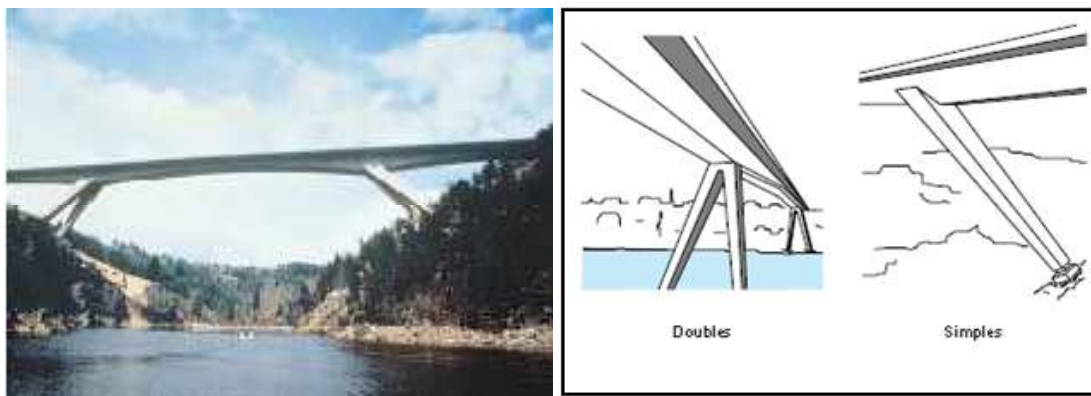


Figure1.20: Pont à béquille.
(Pont sur la Truyère) [3].

Figure1.21: Pont à béquille double et simple
[13].

1.6.4. La classification selon la mobilité de tablier :

Selon le critère mobilité de tablier on peut diviser les ponts en ponts mobiles et en ponts fixes, dont ces derniers sont les ponts avec un tablier fixe, contrairement aux ponts mobiles qui ses varient comme suit :

1.6.4.a. Pont levant :

C'est un pont mobile dont le tablier subit une translation verticale, pour permettre le passage d'un navire de grande hauteur par exemple (Voir Figure1.22) [17].



Figure1.22: Pont levant [17].

1.6.4.b. Pont levis ou pont basculant :

Un **pont levis** est un pont dont le tablier peut être relevé par rotation autour d'un axe horizontal situé à une extrémité, pour des raisons défensives le pont étant l'unique accès à un château fort, au-dessus d'une douve ; lorsqu'il est relevé, il constitue de plus une barrière supplémentaire devant la herse qui protège l'entrée du fort (Figure1.23), ou pratiques pour permettre le passage d'un navire de grande hauteur par exemple. Dans ce dernier cas, on parle de **pont basculant** (Figure1.24) [17].



Figure1.23 : pont levis.

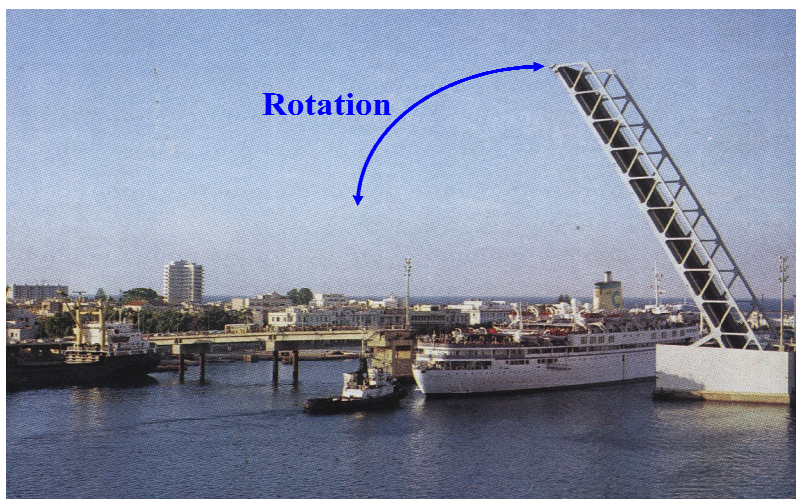


Figure1.24: pont basculant.

1.6.4.c. Pont tournant :

Un pont tournant est un pont dont le tablier est monté sur un pivot, ce qui permet de faire tourner le tablier horizontalement pour le présenter dans l'axe de la voie d'eau qu'il franchit : ainsi, un navire peut circuler dans le passage dégagé par la rotation du tablier (Figure1.25) [17].

Les avantages de ce type de pont sur diverses autres solutions pour donner accès à la fois au transport fluvial et routier sont :

- Comme il ne nécessite pas de contre poids comme un pont-basculant, sa construction est plus simple et légère ;
- Si le chenal est assez large, on peut faire passer les navires dans les deux directions lors de son ouverture et il sert à les séparer l'un de l'autre ce qui ajoute à la sécurité du trafic ;
- Lors de la construction, l'île artificielle créée pour l'axe de rotation peut servir à la fabrication du pont sans nuire aux passages des navires [17].

Contrairement les inconvénients de ce type de pont sont :

- Le pilier central peut être un danger à la navigation en cas de mauvaises conditions atmosphériques ;
- Ce pilier réduit la largeur du chenal et, selon la largeur de celui-ci, peut limiter la circulation à une seule direction.

- Lorsqu'il est ouvert, le pont doit être capable de maintenir sa structure en porte-à-faux mais lorsqu'il est fermé, le poids des automobiles nécessite des supports sous la travée. On a donc des forces de compression et de tension qui peuvent s'exercer alternativement au même point du pont.
- Un choc en bordure des rives, par un navire à la dérive par exemple, peut lui faire effectuer un début de rotation ce qui va devenir un danger pour la circulation sur le pont [17].



Figure1.25: Pont tournant.

1.6.5. La classification selon la forme:

La classification des ponts selon leur forme et suivant l'inclinaison de la ligne d'appuis par rapport à l'axe longitudinal du pont peut être déclinée comme suit :

1.6.5.a. Pont biais :

C'est un Pont dont le tablier n'est pas perpendiculaire aux rives, il est donc plus long (Voir Figure1.27) [18].

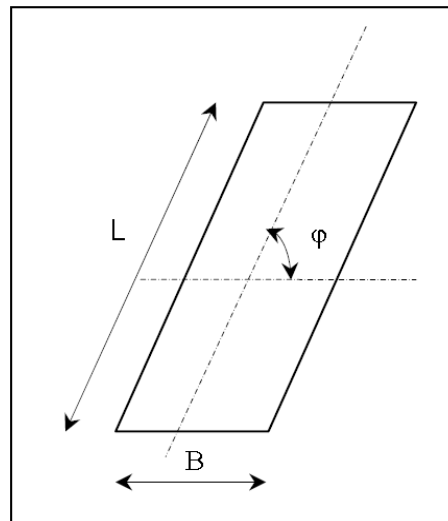


Figure1.26: Pont biais [18].

On appelle angle de biais (φ) l'angle entre la ligne d'appuis et l'axe longitudinal de l'ouvrage. Voir figure ci-dessus [18].



Figure1.27: Pont biais.

1.6.5.b. Pont droit :

C'est un pont dont l'angle de biais de leur tablier est égal à 90° ou 100 gr .
(Voir Figure1.28)



Figure1.28: Pont droit.

1.6.5.c. Pont courbe :

C'est un pont dont leur tablier subit une courbure, comme il est illustré par la Figure1.29.



Figure1.29: Pont courbe.

1.6.6. La classification selon leur mode d'exécution :

On peut classer les ponts par rapport au mode de réalisation de ces derniers aussi :

1.6.6.a. Pont réalisé par encorbellement :

La construction par encorbellement successifs, qui consiste à exécuter un ouvrage élément par élément, sans contact avec le sol, est une technique très ancienne. Dès l'antiquité, elle fut appliquée à la construction de voûte en Europe et en Amérique du sud. Au 19^{ème} siècle et au début de 20^{ème}, elle fut appliquée à la construction de pont métallique en arc ou en poutre treillis. Plus récemment elle fut appliquée à la construction de pont à haubans métallique comme le pont de Normandie sur la Seine [14].

Dans le domaine du béton précontrainte, la construction par encorbellement successifs s'applique majoritairement à des ponts dont les tabliers peuvent être assimilés à des poutres droites ou courbes en plan et sont construits à partir de leurs appuis, avec des voussoirs coulés en places ou préfabriqués [14].

Ce mode de construction consiste à exécuter l'essentiel du tablier d'un pont sans cintre ni échafaudages au sol, en opérant par tronçons successifs dénommés voussoirs. Chacun de ces éléments étant construit en encorbellement par rapport à celui qui le précède. Après exécution d'une paire de voussoirs symétriques, les câbles de précontrainte qui aboutissent à des extrémités sont mis en tension, ce qui permet de les plaquer contre les voussoirs précédents et de constituer ainsi une console autoporteuse pouvant servir d'appui pour la suite des opérations. (Figure1.31) [14].

La construction de la console s'effectue en général symétriquement, de part et d'autre d'une pile, de façon à minimiser les moments transmis à cet appui lors de l'exécution. La double console obtenue est alors dénommée fléau. Parfois la construction de la console s'effectue dissymétriquement, d'un seul côté d'un fléau, l'autre fléau étant déjà clavé avec la travée adjacente. Exceptionnellement si la construction de la console se réalise à partir d'une culée, le moment de renversement apporté par la console sera alors équilibré par un contrepoids dimensionné en conséquence et fera partie du tablier lui-même. (Figure1.30) [14].

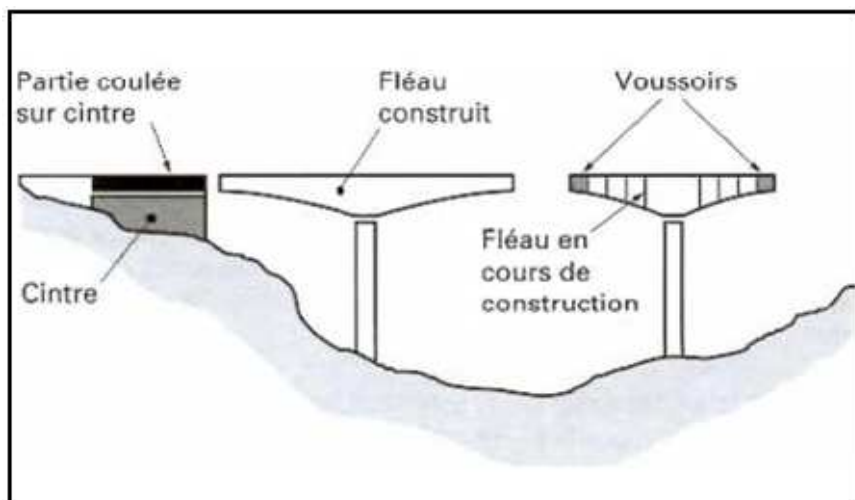


Figure1.30 : Principe de la méthode de construction en encorbellement [4].



Figure1.31 : Ponts construits en encorbellement [3].

Transversalement le tablier est un caisson unicellulaire, le hourdi supérieur bordant en console de part et d'autre peut être raidi par des nervures transversales éventuellement précontraintes ou par des bracons. Il est possible d'atteindre des largeurs de 30m [3].

Les avantages et les inconvénients de la méthode :

La construction par encorbellement successif présente de nombreux avantages :

- Tout d'abord, la construction des tabliers s'effectue, pour l'essentiel du linéaire, sans aucun contact avec le sol, ce qui permet de construire des ouvrages au dessus de rivières à fortes crues ou au-dessus de vallées très accidentées ou très profondes, ou au-dessus d'auto routes [14].
- La méthode permet d'autre part d'exécuter des ouvrages de géométries très diverses. Ainsi, en élévation, il est possible de projeter des tabliers de hauteur constante ou variable. Dans ce dernier cas, il est possible de faire des variations paraboliques, cubiques ou linéaires. La méthode est également extrêmement tolérante à l'égard de la géométrie de la voie portée puisque contrairement aux techniques du poussage et du lançage, tous les profils en long et tracés en plan peuvent être construits sans difficultés [14].
- Enfin la construction par éléments de 3 à 4m de longueur permet un bon amortissement des outils de coffrage du tablier, même si les travées sont peu nombreuses et de longueurs différentes. Dans le cas de voussoirs préfabriqués, la petitesse de ces éléments permet aussi de limiter le poids des éléments à poser et donc de réduire le coût du matériel de pose [14].

La construction par encorbellement successifs des ponts en béton présente aussi quelques inconvénients :

- A portées fixées, les ouvrages construits par cette méthode sont beaucoup plus lourds que des ouvrages mixtes, ce qui conduit à des appuis et des fondations plus importantes que celle de ces ouvrages bien évidemment, ceci pénalise la méthode, en particulier lorsque les terrains de fondations sont médiocres ou lorsqu'on est en zone sismique [14].
- Un autre inconvénient important de cette méthode est l'importance des tâches à effectuer in situ. Bien évidemment, lorsque les voussoirs sont préfabriqués, l'importance de ces tâches diminue, elle reste cependant bien plus importante que pour un pont en béton poussé [14].
- Sur le plan esthétique, les ponts construits par encorbellement successifs sont des ouvrages dont le tablier est assez épais, ce qui peut poser des problèmes dans certains sites. Le découpage en petits voussoirs et la multiplicité des phases de bétonnage qui en résulte, est aussi parfois à

l'origine de défaut de parements et notamment de différences de teintes entre deux voussoirs successifs [14].

1.6.6.b. Pont construit par poussage :

La méthode de construction des ponts en béton précontraint par poussage, directement inspirée du lancement des ponts métalliques, consiste à confectionner un tablier sur une rive ou sur les deux rives de la brèche à franchir, puis à le mettre en place sur ses appuis définitifs par déplacement longitudinal. Cette technique n'a pu se développer que grâce à la mise au point de plaques d'appui provisoires revêtues de Téflon ou de produits similaires, permettant le glissement avec un faible frottement. Elle présente de nombreux avantages : la construction « au sol » du tablier permet à la fois une meilleure organisation du travail, une plus grande sécurité pour le personnel d'exécution et une meilleure qualité. En permettant de s'affranchir de toute installation entre les appuis (cintre ou charpente), elle entre en concurrence directe avec les ponts métalliques ou les ponts construits en encorbellement de hauteur constante dans une gamme de portées allant de 50 à 70 m [3].

On distingue principalement deux types de ponts poussés (quelques ouvrages de grande longueur ont été construits en combinant ces deux types) :

- Les ponts à trois travées construits par moitié sur chaque rive (**poussage bilatéral**), les deux moitiés étant ensuite poussées sur leurs appuis définitifs et solidarisées pour rendre le tablier continu [4].
- Les ponts construits par tronçons successifs dans un atelier fixe sur l'une des rives et progressivement poussés sur les appuis définitifs (**poussage unilatéral**) : ils constituent, de loin, la famille la plus nombreuse [4].

L'application de la méthode du poussage exige qu'un certain nombre de conditions soient réunies : tablier de hauteur constante, tracé parfaitement rectiligne, ou rectiligne en plan et inscrit sur un cercle en élévation, ou encore tracé inscrit sur une surface tronconique appropriée afin de conférer à l'ouvrage la courbure souhaitée tant en plan qu'en élévation. Les conditions sur la

géométrie du tracé ont pour but d'éviter le développement d'efforts parasites plus ou moins contrôlables pendant l'opération de poussage [4].

D'autre part, il faut pouvoir disposer, en arrière d'une (ou des) culée(s), d'une longueur suffisante pour aménager l'aire de fabrication du tablier : la demi-longueur de l'ouvrage, s'il s'agit d'un pont à trois travées mis en place par poussage bilatéral, ou une longueur comprise entre une et deux travées courantes s'il s'agit d'un pont mis en place par poussage unilatéral [4].

Le procédé de construction des ponts par poussage s'accommode, en principe, de nombreux types de tabliers : dalle, dalle nervurée, caisson uni ou multicellulaire. Mais les dalles, pleines ou élégies, à section rectangulaire ou dotées d'encorbellements latéraux, ne peuvent convenir que pour des portées déterminantes ne dépassant pas 20 à 25 m. Par ailleurs, les tabliers en dalle nervurée ont été progressivement abandonnés, malgré leur simplicité d'exécution, au profit des poutres-caissons du fait de leur faible rigidité à la torsion, de la médiocrité de leur rendement géométrique et des problèmes qu'ils posent pour l'entretien (visites) et l'exploitation (passage des réseaux de concessionnaires) [4].

1.6.6.c. Pont réalisé sur cintre :

Il existe des autres méthodes de construction des ponts en béton précontraint comme la construction sur cintre autolanceur, montré sur la Figure 1.32. La construction sur cintre autolanceur consiste à confectionner un ouvrage par travées entières dans un cintre suspendu à une structure métallique porteuse. Cette structure est appuyée, vers « l'arrière », sur l'extrémité du tablier déjà exécuté et vers « l'avant » sur une pile (ou une culée). Lorsque le béton de la nouvelle travée a durci et a été mis en précontrainte, le cintre est déplacé pour franchir la travée suivante à l'aide d'un avant-bec métallique facilitant l'accostage sur une nouvelle pile [4].

On distingue les cintres autolanceurs « par-dessus », qui portent les coffrages au moyen de suspentes, des cintres « par-dessous » dans lesquels

les coffrages sont fixés aux éléments porteurs. Le tablier peut être une dalle nervurée, mais plus généralement une poutre-caisson [4].



Figure1.32: Un cintre autolanceur.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé des généralités à propos des ponts, en citant une définition du pont et ces composants, l'historique de la construction des ponts et son évolution jusqu'alors avec les innovations rencontrées dans la réalisation de ces ouvrages.

De plus on a classés les différents types des ponts selon plusieurs critères qui sont : le matériau de construction, La nature de la voie portée et leur destination, le système structurel, La mobilité de tablier, La forme et enfin leurs mode d'exécution.

De tous les types de ponts, une fonction reste commune à tous, ils offrent la possibilité de franchir. Ensuite, suivant son utilisation, il change de nom.

Quand il permet la circulation de l'eau, on l'appelle aqueduc, lors de la circulation de trains ou de voitures, il devient pont de chemin de fer ou pont autoroutier, enfin quand il permet aux badauds de se rendre facilement sur l'autre rive, il est alors une passerelle.

On distingue selon la comparaison entre les différents types des ponts que les ponts à câble soit suspendus ou haubanés sont les plus rigides, en plus ils peuvent avoir des grandes portées qui permettent de franchir des obstacles, et créer la liaison entre deux rives éloignées. Pour étendre le domaine d'application des ponts à câble au-delà de leur limite actuelle de portée, on songera à associer les deux systèmes de haubanage et de suspension.

Cette solution mixte n'a pas encore dépassé le stade de la conception et aucun ouvrage de ce type n'a été réalisé. La raison en est probablement dans le fait que de telles conceptions cherchent à associer dans un même ouvrage deux techniques fondamentalement différentes : haubanage d'une part, câbles de suspension et suspentes d'autre part. Non seulement les comportements structuraux sont différents, mais les matériaux et la technologie de construction sont aussi très différents. Et pour permettre l'élaboration de ce système mixte Des recherches sont donc nécessaires incluant l'étude de ces comportements différentiels.

La recherche permanente de progrès dans les matériaux, dans les moyens de calcul, dans les méthodes de mise en œuvre, dans les équipements de chantier donne à chaque ouvrage significatif une originalité par rapport aux précédents. La précontrainte extérieure, les bétons de haute performance, l'application du ciment blanc pour la réalisation des tabliers, les bétons auto plaçant, les adjuvants de nouvelle génération, les possibilités de préfabrication, les modes de traitement de surfaces sont des moyens à la disposition des maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres et entreprises dont les quels il est largement possible de trouver les sources raisonnables d'originalité et de réussite technique.

Les matériaux de construction des ponts ont une influence sur le temps de réalisation, la rigidité, le comportement sismique et la durée de vie des ponts, cependant la mixité de ces matériaux qui attribue un meilleur comportement résistant à ces ouvrages. De plus l'utilisation des matériaux composites dans la construction d'ouvrages d'art permet d'ériger un pont en quelques jours au lieu d'un mois si l'on avait utilisé du béton armé conventionnel. Cette rapidité de mise en œuvre compense le supplément de coût de la matière. Mais leur légèreté et leur insensibilité à la corrosion sont autant de facteurs clés de leur succès dans l'industrie de la construction des ponts.

On ne se limite pas à la bonne conception et réalisation des ouvrages d'art car la surveillance et l'entretien des ponts est très important pour assurer sa longévité, comme la majorité des ponts se trouve dans des milieux agressifs sans oublier les conditions climatiques assez difficiles et les risques sismiques.

La prise en considération des effets sismiques dès le stade de conception du projet du pont est importante même pour les régions à sismicité faibles ou modérées, cette attention ne s'arrête pas à ce stade seulement car elle est très importante aussi durant la vie du pont.

Pour mieux traiter ce sujet vital touchant la longévité du pont, nous présenterons dans le chapitre suivant le risque sismique et la vulnérabilité sismique de ces ouvrages d'art.

CHAPITRE 2 : VULNERABILITE SISMIQUE DES PONTS

2.1. Introduction :

La vie humaine quotidienne est menacée par plusieurs phénomènes, parmi eux les catastrophes naturelles, les menaces terroristes ect... Afin de réduire leur impact il est nécessaire de les prendre en compte. Parmi les catastrophes naturelles nous distinguons les tremblements de terre, les cyclones, les inondations, les tsunamis, les glissements de terrain et les volcans. Ces catastrophes naturelles posent des défis aigus aux gestionnaires de sécurité civile et de grands systèmes urbains car ils ont des effets à court et longs termes sur la population, les constructions, les infrastructures, et les activités économiques.

Le séisme est l'un des risques majeurs qui frappe le globe terrestre, pour lequel on ne peut agir ni sur l'aléa ni sur la probabilité qu'un événement se produise et son intensité. L'étude du risque sismique passe par la connaissance de la physique des séismes et des failles; par l'évaluation des effets de propagation et d'atténuation; par l'estimation des effets de site et des vulnérabilités.

Les grands séismes destructeurs occasionnent également un grand nombre de dégâts humains et matériels, dont les principales causes de ces dommages peuvent être exprimées en trois points essentiels :

- Le manque ou bien l'insuffisance des données sismiques au niveau de plusieurs régions,
- Des erreurs commises au niveau de réalisation et de la technique de réalisation ainsi que la qualité des matériaux utilisés,
- La mauvaise connaissance des limites réelles de résistances d'une structure ainsi que des dommages qui peuvent se produire lors d'un séisme réel.

Ces points engendrent une vulnérabilité de la structure.

La vulnérabilité sismique représente la réponse du milieu urbain à l'aléa sismique. Cette notion requiert des informations liées au comportement physique des structures d'une zone urbaine. Afin d'étudier cette vulnérabilité, il est important de préciser certaines notions de base telles que : aléa, risque, vulnérabilité, etc.

2.2. Notions de base :

On définit, généralement, un risque comme étant une corrélation entre l'aléa (le phénomène) et la vulnérabilité [19].

Les définitions des termes suivants concernant les catastrophes sont [20] :

Aléa :

Il est défini comme étant un événement rare ou extrême, qui survient dans l'environnement naturel ou l'environnement créé par l'homme, et affecte négativement la vie humaine, les biens ou les activités, au point de créer une catastrophe.

Risque :

Le risque est défini comme les pertes attendues (pertes de vies, blessures, dommages à la propriété, grave perturbation des activités économiques) causées par un phénomène particulier. Il est fonction de la probabilité d'occurrence particulière des aléas et des pertes que chacun d'eux va causer.

Vulnérabilité :

Dans la littérature, la définition de la vulnérabilité sismique varie d'un auteur à un autre, mais on peut la définir comme étant le degré de perte occasionnée à un élément ou à un ensemble d'éléments soumis à une probabilité donnée d'occurrence d'un phénomène naturel ou d'une catastrophe [19].

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons uniquement à l'étude de la vulnérabilité sismique.

2.3. Vulnérabilité sismique :

Le séisme qui se définit comme étant une rupture soudaine des couches supérieures de la terre, entraînant parfois des vibrations du sol. Celles-ci peuvent occasionner l'effondrement des bâtiments, des ponts et la perte de vies humaines et de biens. L'évolution de la technologie et l'expérience des séismes récents a fourni beaucoup de données, qui ont été utilisées dans le développement de modèles pour mieux estimer les pertes dans les structures et les infrastructures.

2.4. Vulnérabilité sismique des ponts :

L'étude des dommages subis à la suite des derniers tremblements de terre aux États-Unis (San Fernando 1971, Loma Prieta 1989, Northridge 1994), au Japon (Kobé 1995), au Canada (Saguenay 1988) et dans d'autres régions à travers le monde, (Costa Rica 1991, Kocaeli 1999) a permis de mieux comprendre la nature des mouvements sismiques, et d'identifier les faiblesses des éléments structuraux des ponts, et le comportement des fondations et des sols sur lesquels elles reposent (Mitchell et Tinawi 1992, Priestley et coll. 1994, CAEE 1995, Anderson et coll. 1996, Yashinski 1998, Kawashima 2000, Saatcioglu et coll 2001, Priestley et coll. 1996). Au niveau des structures, l'expérience a démontré que les dommages subis par les ponts et les viaducs les plus fréquemment observés sont [21] :

- La perte d'appuis des travées, ou l'échappement du tablier de ses appuis.
- La rupture fragile des piles et des colonnes.
- L'endommagement et la rupture des culées.
- Les problèmes liés aux sols de fondation.

Il est reconnu que la dissipation de l'énergie induite par les vibrations sismiques dépend des principaux éléments structuraux d'un pont, soient : le tablier, le système d'appuis, les piles, les culées et les fondations (figure 2.1). Par

ailleurs, la nature du sol et les effets de sites qui en résultent contribuent grandement à augmenter la vulnérabilité sismique des ouvrages [21].

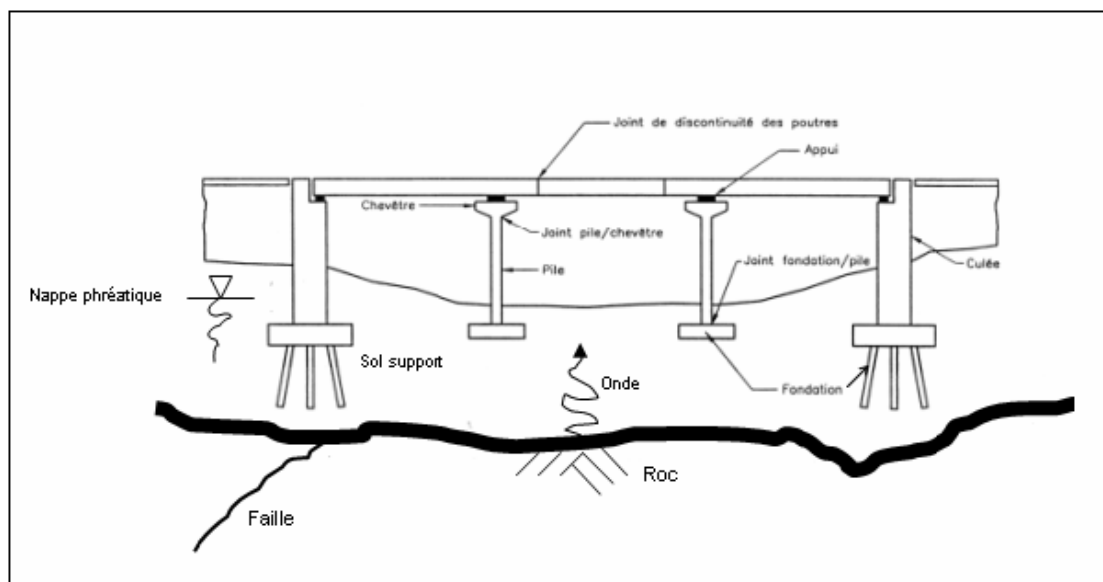


Figure 2.1: Parties constituantes d'un système sol-pont [21].

Au cours d'un séisme, les efforts induits dans une structure sont essentiellement liés aux forces inertielles horizontales qui résultent de la mise en mouvement des masses.

Sur les ponts, l'essentiel de la masse est généralement concentré au niveau du tablier. L'effort provient donc de celui-ci descend dans les appareils d'appui, les piles, les culées et les fondations.

Vis-à-vis des sollicitations verticales (environ 2 fois plus faibles que les sollicitations horizontales), les charges sismiques à vide sont généralement couvertes par le dimensionnement sous charges d'exploitation et ne posent donc pas de problème particulier.

Explicitons les principaux désordres qui peuvent être occasionnés aux éléments d'un pont [22]:

2.4.1. Echappement du tablier de ses appuis :

Lorsque les distances de repos d'appui sont insuffisantes, le déplacement relatif entre le tablier et ses appuis peut entraîner un échappement. Ce

phénomène, peut se produire selon la direction longitudinale ou transversale, concerne plus particulièrement les ponts à travées indépendantes (Figure 2.2). Selon la direction transversale, le risque peut être accentué par un biais ou une courbure importante (Figure 2.3). Sur les ponts biais, les chocs des culées sur le tablier créent un moment de rotation d'axe vertical dans la structure qui a pour conséquence de pousser le tablier hors de ses appuis.



Figure 2.2: Echappement longitudinal (Kobé,1995) [22].



Figure 2.3: Echappement dû à une courbure importante (San Fernando,1971) [22].

2.4.2. Rupture fragile des piles :

La présence de butées latérales (Figure 2.4) supprime généralement le risque d'échappement transversal. Il faut toutefois bien noter que les butées, comme toute autre connexion rigide du tablier sur ses appuis (encastrement, appareils d'appuis à pot mono-directionnels...), peut conduire à une forte augmentation des efforts dans ces derniers. Cette augmentation des efforts est alors susceptible de provoquer des ruptures fragiles notamment dans les piles (Figure 2.5) si leur résistance est insuffisante (manque de ductilité ou de confinement du béton, rupture par effort tranchant, insuffisance d'ancrage ou de recouvrement des aciers passifs...).

La rupture fragile d'une pile soumise à un chargement cyclique, débute par une fissuration par fendage du béton parallèle aux armatures chevauchées suivi

d'une dislocation du béton et d'un arrachement des barres. Ce mode de rupture est caractérisé par une capacité en flexion réduite et fragile, sans aucune ductilité. Ce type de rupture est observé lorsque la longueur de chevauchement est insuffisante ou que le confinement fournit par les étriers transversaux est déficient.



Figure 2.4: Exemple de butées latérales [22].



Figure 2.5: Rupture par effort tranchant [22].

2.4.3. Endommagement et la rupture des culées :

L'opposition des forces de poussée dynamique des terres et de chocs du tablier sur les culées peut provoquer un endommagement de celles-ci (Figure 2.6). Notons que plus la hauteur des remblais est grande, plus la culée est vulnérable vis-à-vis des effets de la poussée dynamique des terres.



Figure 2.6 : Endommagement des culées (Costa Rica 1990) [22].

2.4.4. Problèmes liés aux sols de fondation

Lorsque l'ouvrage est localisé sur un sol liquéfiable ou soumis à d'éventuels glissements de terrain, il y a un gros risque de perte de portance et d'effondrement général (Figure 2.7 et Figure 2.8). Les ouvrages fondés profondément dans le substratum rocheux sont, en comparaison des ouvrages fondés superficiellement, moins vulnérables vis-à-vis de ces phénomènes.



Figure 2.7 : Exemple de liquéfaction (Costa Rica, 1990) [22].



Figure 2.8 : Liquéfaction du sol.

2.5. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique :

Des méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle ont été développées. Issues en générales des retours d'expérience, elles dépendent donc de l'échelle : pays, région, communes, nombre de structures à analyser ainsi que du budget et du temps disponibles. Elles peuvent être utilisées pour estimer de façon approchée les pertes et les dommages engendrées par un séisme.

Parmi ces méthodes nous avons la [19] :

- Méthode de HAZUS.
- Méthode de RADIUS (Risk Assesment Diagnosis of Urbain Areas Against Seismic).
- Méthodologie de RISK-UE.

L'estimation des pertes dues aux séismes, dans une région donnée ne se limite pas aux bâtiments seulement, mais aussi aux infrastructures et les ouvrages d'art ce qui conduit à établir des recherches, pour l'élaboration et le développement des méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts.

2.6. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts :

L'estimation et la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art se basent sur certains critères, sous-cités :

- La visite et l'expertise des structures.
- L'observation des pathologies avant et après un séisme.
- L'identification des caractéristiques principales influençant la réponse sismique.
- Le choix de la bonne méthode d'estimation de cette vulnérabilité.

Parmi ces méthodes les plus connues dans le monde, nous avons:

2.6.1. Méthode du "IQOA" : (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art)

L'estimation d'un ouvrage résulte d'une analyse de son état, faite soit à partir du dossier de l'ouvrage si celui-ci contient un rapport d'inspection détaillée périodique faite dans l'année, soit à l'issue d'une visite sommaire réalisée conformément au guide de visite IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) élaboré par l'organisme français SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes). Ce guide permet de procéder à l'évaluation de l'état de l'ouvrage, en parcourant une liste des défauts les plus courants, en notant leur existence éventuelle, et en déduisant une cotation ; la cotation de l'ouvrage résulte alors d'une synthèse des cotations des différentes parties d'ouvrage. La visite puis la cotation doivent être effectuées par un spécialiste des ouvrages d'art ou par une personne qualifiée [23].

Dans cette méthode les ponts sont caractérisés par cinq classes plus une mention en cas d'urgence, dont les définitions sont rassemblées ci-dessous [23]:

Classe 1 : Ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.

Classe 2: Ouvrage,

- dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts,
- dont la structure présente des défauts mineurs,
- qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.

Classe 2E : Ouvrage,

- dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts,
- dont la structure présente des défauts mineurs,
- qui nécessite un entretien spécialisé urgent, pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.

Classe 3: Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.

Classe 3U : Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation urgents liés à l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.

Mention S : Lorsque les défauts ou déficiences constatés sur l'ouvrage peuvent mettre en cause la sécurité des usagers et nécessitent de ce fait d'être traités de manière urgente, la mention "S" est attribuée à l'ouvrage en complément de l'une quelconque des cinq classes d'état définies précédemment. Cette cotation doit refléter un défaut d'une partie d'ouvrage existante ou disparue, et non pas une non-conformité à des règles de sécurité ou un niveau de sécurité jugé insuffisant.

En conclusion, la note fixée à l'ouvrage est constituée de deux parties distinctes :

- la classe d'état choisie parmi 1, 2, 2E, 3, 3U et qui caractérise son état mécanique ou fonctionnel, par ordre croissant de gravité
- la mention éventuelle "S" relative à l'urgence à entreprendre des travaux au regard de la sécurité des usagers, qu'ils concernent ou non la structure.

De ce fait, les cinq classes sont dédoublées pour arriver à 10 notations possibles : 1, 1S, 2, 2S, 2E, 2ES, 3, 3S, 3U, 3US (la notation 1S devrait être rare)

Cette note s'obtient par cotation de chaque élément de l'ouvrage, puis par l'attribution d'une note de synthèse affectée d'une part aux équipements et d'autre part à la structure décomposée éventuellement en tablier et appuis, puis par l'attribution de la note de synthèse générale affectée à l'ouvrage. En principe, à chaque étape de regroupement des notes, la note globale à retenir est la plus défavorable des notations élémentaires.

La démarche d'évaluation de l'état des ponts et d'appréciation de la classe dans laquelle doit être rangé un pont est conduite selon le processus résumé dans l'organigramme montré dans l'annexe 1. De plus les résultats de l'évaluation sont

reportés sur un document spécifique (fiche de synthèse) à chaque ouvrage et dont le modèle est adapté au type d'ouvrage [23]. (Voir annexe 1)

2.6.2. Méthode du "MTQ" : (Ministère des Transports du Québec)

La méthode du Ministère des Transports du Québec, modifiée pour tenir compte des nouvelles dispositions du CNBC 2005 (*Code national du bâtiment - Canada 2005*) en matière de sismicité (MTQ modifiée).

La méthode MTQ s'appuie sur l'aléa sismique régional, les conditions de sol et des caractéristiques structurales et non structurales d'un pont ou d'un viaduc (MTQ 2007b).

À noter que cette méthode a été élaborée sur la base des travaux de recherche réalisés à l'École Polytechnique de Montréal et que sa version officielle n'est pas encore disponible [21].

Comme il est noté avant, la méthode du MTQ a été modifiée afin d'être conforme aux nouvelles données d'aléa sismique régional et à la nouvelle catégorisation sismique des sites du CNBC 2005. Elle permet de calculer un indice de vulnérabilités numérique désigné **IVS**. Cet indice **IVS** varie entre 0 et 100, 100 représentant le plus haut niveau de vulnérabilité par exemple pour la ville de Québec la valeur minimale de l'**IVS** est de 40. L'**IVS** est donné par l'expression

$$\text{suivante : } IVS = 100 - \left[RS \times FF \times FA \times \sum_{i=1}^{i=8} \omega_i \times C_i \right]$$

Où les variables sont définies dans l'annexe 1.

Les valeurs attribuées aux différents facteurs et coefficients d'influence sismique servant à calculer l'indice de vulnérabilité sismique dépendent de leur contribution relative à la vulnérabilité sismique générale de l'ouvrage. Le facteur de risque sismique **RS** représente un élément clé pour le calcul de la vulnérabilité sismique des ponts puisqu'il représente la probabilité d'occurrence d'un événement sismique majeur en un lieu donné, pour une intensité donnée. Cependant, lorsqu'on considère les ouvrages situés sur un même territoire, par exemple sur le territoire de la ville de Québec, l'aléa sismique régional est le même

et ne constitue donc pas un facteur discriminant. La prise en compte des conditions du sol local par le biais du facteur **FF** permet d'évaluer la vulnérabilité des ponts en relation avec l'effet d'amplification des mouvements sismiques (aléa sismique local) [21].

2.6.3. Méthode du "NYDOT" : (New York Department of Transportation)

La méthode NYDOT a été développée par le "New York Department of Transportation" (NYDOT 1995). Cette méthode ne considère pas l'aléa sismique régional ou local et utilise un algorithme de classification des ponts et viaducs pour regrouper les ouvrages selon leurs caractéristiques structurales (travées simples ou multiples, appuis à rotules, biais, nombre de poutres, etc.) et les fondations (pieux) (voir figure 2.9). À chaque groupe d'ouvrage, la méthode associe une classe de vulnérabilité sismique à laquelle correspond un niveau de priorité d'intervention, tel que présenté au Tableau suivant [21].

GROUPE DE PONTS	CLASSE DE VULNÉRABILITÉ	NIVEAU DE PRIORITÉ D'INTERVENTION
<i>Groupe 1</i>	<i>Classe 1</i>	<i>Très élevé</i>
<i>Groupe 2</i>	<i>Classe 2</i>	<i>Modérée à élevée</i>
<i>Groupe 3</i>	<i>Classe 3</i>	<i>Faible à modéré</i>
<i>Groupe 4</i>	<i>Classe 4</i>	<i>Faible</i>

Tableau 2.1 : Classement de la vulnérabilité sismique selon le NYDOT [21].

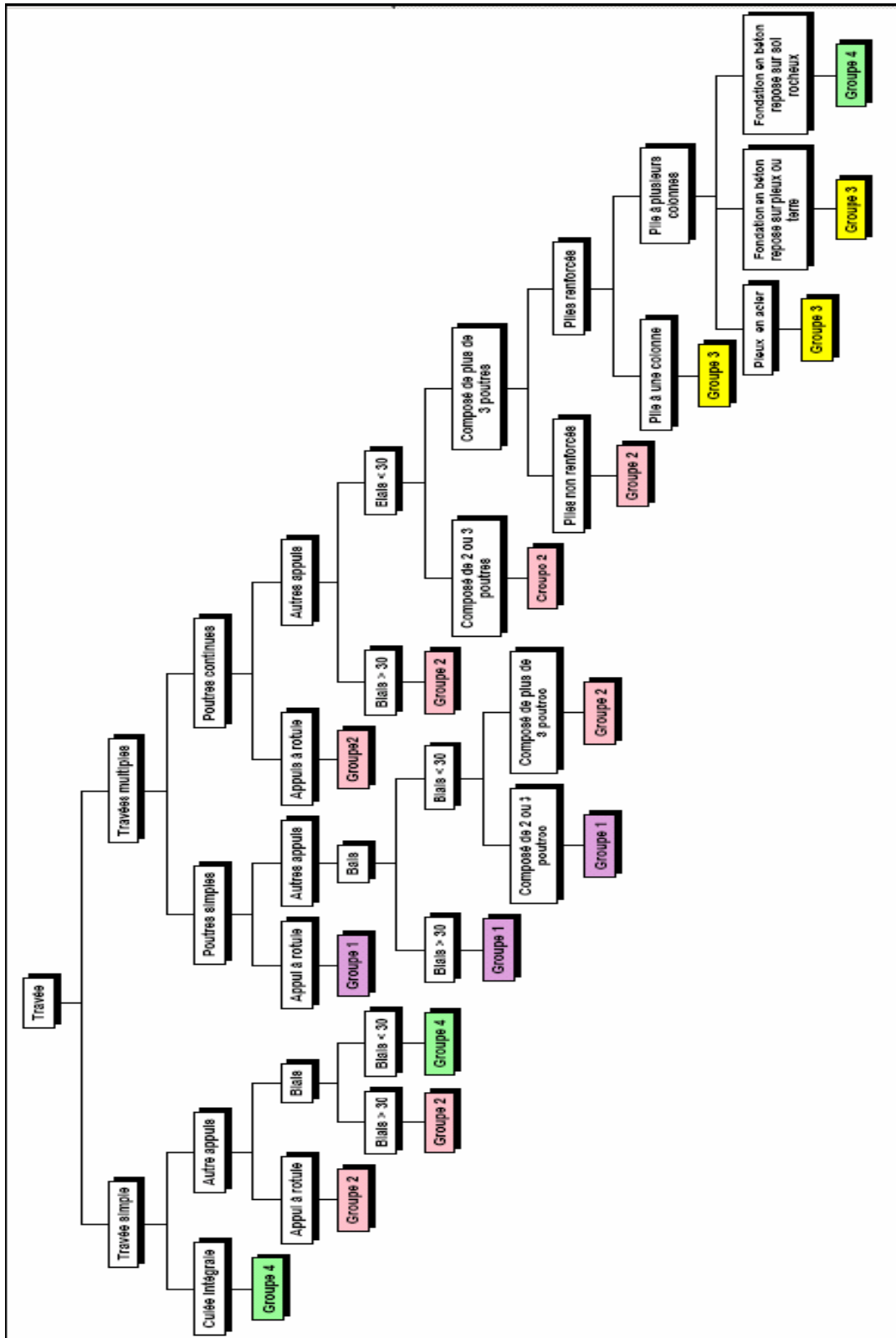


Figure 2.9 : Algorithme de classification des ponts selon le NYDOT [21].

2.6.4. La nouvelle méthode développée dans le cadre du projet microzonage et vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec :

Dans le cadre du projet de microzonage et vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec, l'objectif est l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts et viaducs et d'identifier les ouvrages les plus vulnérables sur la base de données facilement accessibles. Cet objectif est atteint par le biais d'un classement indiciel et d'un classement par classe des ponts et viaducs en fonction de leur vulnérabilité sismique.

Le deuxième objectif de cette nouvelle méthode est de refléter la prépondérance du rôle de certains éléments structuraux dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique et de mettre en évidence l'influence de l'effet de site amplification. L'indice de vulnérabilité est établi en fonction des cinq facteurs suivants :

- l'aléa sismique,
- les conditions de sol,
- la vulnérabilité du tablier,
- la vulnérabilité du système d'appuis, qui incluent tous les éléments qui supportent la structure y compris les appuis, les piles et les fondations,
- la vulnérabilité reliée aux éléments généraux caractérisant la structure.

Cette nouvelle méthode d'évaluation vise à permettre plus facilement l'identification des ouvrages les plus vulnérables aux séismes et est actuellement en cours de validation [21].

Les principales étapes de cette nouvelle méthode d'évaluation des ponts et viaducs sont les suivantes :

1. Réunion de l'information disponible sur les ponts (localisation, année de construction, matériau, etc.)
2. Inspection sommaire pour obtenir les caractéristiques générales (paramètres structuraux et non-structuraux) qui permettront d'attribuer un indice de vulnérabilité sismique à l'ouvrage.

3. Évaluation de la sismicité régionale et de la classe sismique de site permettant d'attribuer un indice de susceptibilité à l'amplification sismique du site.

Cette nouvelle approche a amené les gestionnaires de la Ville de Québec à s'interroger sur la vulnérabilité sismique de son parc immobilier et des infrastructures et les a conduit à vouloir se doter de nouveaux outils méthodologiques et informatiques pour leur permettre de composer rationnellement et efficacement avec le risque sismique [21].

2.6.5. La méthode des courbes de fragilité : (Fragility curves)

Il est possible de prévoir de manière déterministe l'excitation sismique nécessaire afin d'atteindre un niveau de réponse ou/et d'endommagement pour un pont donné. En plus les propriétés des matériaux et des caractéristiques structurales qui affectent la capacité d'un pont, il est nécessaire de donner le mouvement sismique (MMI, PGA,...) ainsi que les conditions du sol qui affectent la demande sismique [24].

La fragilité se définit comme la probabilité conditionnelle de dépassement d'un état limite pour un niveau d'intensité sismique donné.

Des courbes de fragilité analytique pour différents types de ponts aux États-Unis ont été validées par rapport aux courbes empiriques obtenues à partir des données enregistrées lors des séismes de Northridge 1994 et Loma Prieta 1989. [24]

2.6.6. La méthode "SISMOA" :

La procédure SISMOA détermine empiriquement le risque sismique sur un ouvrage d'art. À l'échelle d'un itinéraire, les résultats permettent de hiérarchiser les ponts par ordre de sensibilité, en vue d'une analyse socio-économique des risques par rapport aux enjeux.

La méthode aboutit, pour l'ouvrage étudié, au calcul de l'indice de vulnérabilité "V", représentatif de sa sensibilité propre aux mouvements dynamiques de type sismique. Couplé à l'aléa sismique "A" (représentatif de l'agression sismique prévisible dans sa région d'implantation), l'indice de vulnérabilité permet de calculer le risque sismique "R" qui définit l'espérance mathématique d'endommagement du pont au cours d'une période de référence. Enfin, la combinaison de l'indice de risque "R" avec le critère d'importance "I", représentatif du caractère plus ou moins essentiel de l'ouvrage pour la société en cas de crise (desserte des hôpitaux, acheminement des secours, reprise rapide de l'activité économique...), permet d'établir le niveau de priorité "P". De façon plus synthétique, on peut noter [22] :

$$P = R \times I = (V \times A) \times I$$

Le logiciel SISMOA se présente sous la forme d'une feuille Excel sophistiquée. Il a été réalisé par le Laboratoire Régional de Nice du "CETE Méditerranée" sous le pilotage du SETRA (service d'étude technique des routes et d'autoroutes). A partir d'un certain nombre de critères géométriques et typologiques, le logiciel permet une évaluation qualitative de la vulnérabilité des différents éléments structurels de l'ouvrage (tablier, culées, piles, fondations). La combinaison de ces indices de vulnérabilité spécifiques conduit au calcul de l'indice de vulnérabilité global, compris entre 0 et 1 [22].

La présentation des résultats a fait l'objet d'une procédure automatique afin d'en permettre ultérieurement une exploitation à l'échelle d'un itinéraire sous support SIG (Système d'Information Géographique). Cette fonctionnalité permet une représentation visuelle et efficace des résultats et autorise un croisement immédiat entre des données concernant le site (équipements stratégiques, itinéraires, géologie, sismicité...) et celles directement relatives aux ouvrages (typologie, photographie, vulnérabilité et risque sismique).

Grâce à l'interactivité de l'outil SIG, SISMOA constitue non seulement un outil d'aide à la définition des programmes de confortement mais pourrait aussi évoluer à terme vers des fonctions d'élaboration de stratégies de prévention des risques

sismiques voire d'aide à la prise de décision en période de crise. De plus cette méthode à plusieurs perspectives de développement, et pour plus de détails sur elle voir annexe 1 [22].

2.6.7. La méthode de "Kubo/Katayama" :

La méthodologie proposée par les deux japonais K.Kubo et T.Katayama est efficace pour évaluer les dommages des ponts, et pour observer les points vulnérables de ces systèmes structurels.

Dans la méthode de Kubo/katayama il y a dix paramètres qui sont très attaché à la probabilité de l'effondrement des ponts. Ces paramètres sont faciles à identifier sur site. Chaque paramètre est classé en quelques catégories avec une valeur numérique pour chaque classe. Le résultat final obtenu après un calcul simple permet de classer les ponts étudiés selon le degré de la probabilité d'effondrement.

Les paramètres proposés par Kubo et Katayama sont les suivant :

- Intensité sismique.
- Type de poutre.
- Le potentiel de liquéfaction.
- Nombre de travée.
- Hauteur maximum de la culée / la pile.
- Matériau de construction de la culée / la pile.
- Type de fondation.
- Type de sol.
- La largeur de la pile / la culée du pont.
- Type d'appui.

2.7. Conclusion :

L'étude de la vulnérabilité sismique est nécessaire pour permettre la pérennité des ponts et des viaducs et réduire les pertes et les dommages

provoqués par les séismes, cette étude est basée sur plusieurs méthodes qui sont citées dans ce chapitre.

Nous constatons par la comparaison entre ces différentes méthodes qu'elles ont le même but mais chacune d'elles a ces propres caractéristiques ainsi les méthodes "IQA" (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) et "NYDOT" développé par le "New York Département of Transportation", évaluent l'état apparent de la structure des ponts et ses équipements. Elles ne considèrent pas l'aléa sismique régional ou local et utilisent un algorithme de classification des ponts selon leurs caractéristiques structurelles. La méthode des courbes de fragilité permet de prédire le niveau de dommage que pourrait subir un pont soumis à une accélération sismique. Les propriétés matérielles et structurelles étant fixées. La méthode "MTQ" du Ministère des Transports du Québec, la méthode "SISMOA" et la méthode de "Kubo/Katayama" sont des outils permettant une évaluation qualitative de la vulnérabilité des ouvrages d'art vis-à-vis du séisme. Elles aboutissent au calcul d'un indice de vulnérabilité sismique globale couplé à l'aléa sismique par la combinaison des différents indices de vulnérabilité spécifiques à chaque paramètre influant sur la vulnérabilité des ponts. Cet indice permet de classer ces ouvrages selon leurs états.

Après avoir passé en revue les méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts dans le monde, et afin de pouvoir estimer cette vulnérabilité sismique en Algérie, nous avons opté pour la méthode japonaise de "Kubo/Katayama" validée et appliquée au Japon, parce qu'elle s'appuie sur des critères typologiques simples, faciles à appréhender par une personne qualifiée, sans obligation de disposer de matériels et/ou de technologie développée contrairement aux autres méthodes.

CHAPITRE 3 :

METHODE DE « KUBO - KATAYAMA »

3.1. Introduction :

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des ponts, nous avons cité quelques-unes dans le chapitre précédent, parmi ces méthodes nous avons opté pour la méthode basée sur le calcul d'un indice permettant la classification de la structure. Cette méthode a été développée par les deux professeurs japonais « Keizaburo Kubo » et « Tsuneo Katayama ». Elle a été appliquée sur de nombreux ponts au Japon.

Dans ce qui suit nous allons présenter cette méthode ainsi que les modifications apportées et les applications faites sur quelques ponts en Algérie.

3.2. Méthode de «Kubo-Katayama » :

Cette méthode a été développée en se basant sur les résultats d'expertises effectuées sur des ponts suite à des séismes au Japon.

3.2.1. Principe de la méthode :

Cette méthode d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts est basée sur l'indice de vulnérabilité, qui est un indicateur de l'état de la structure qui peut être estimé avant comme après l'occurrence de l'évènement sismique. Il nous permet de connaître l'état des ouvrages d'art d'une région et de les classer selon leur vulnérabilité, donc il offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismique des ponts d'une région.

Dans cette méthode dont le principe est illustré dans l'organigramme ci-après (Figure 3.1) nous avons différents paramètres qui influent sur la vulnérabilité sismique des ponts. Chacun d'entre eux est divisé en catégories, et chaque catégorie a son propre facteur de pondération. Le produit des valeurs des facteurs de pondération de tous les paramètres représente l'indice de vulnérabilité d'un pont.

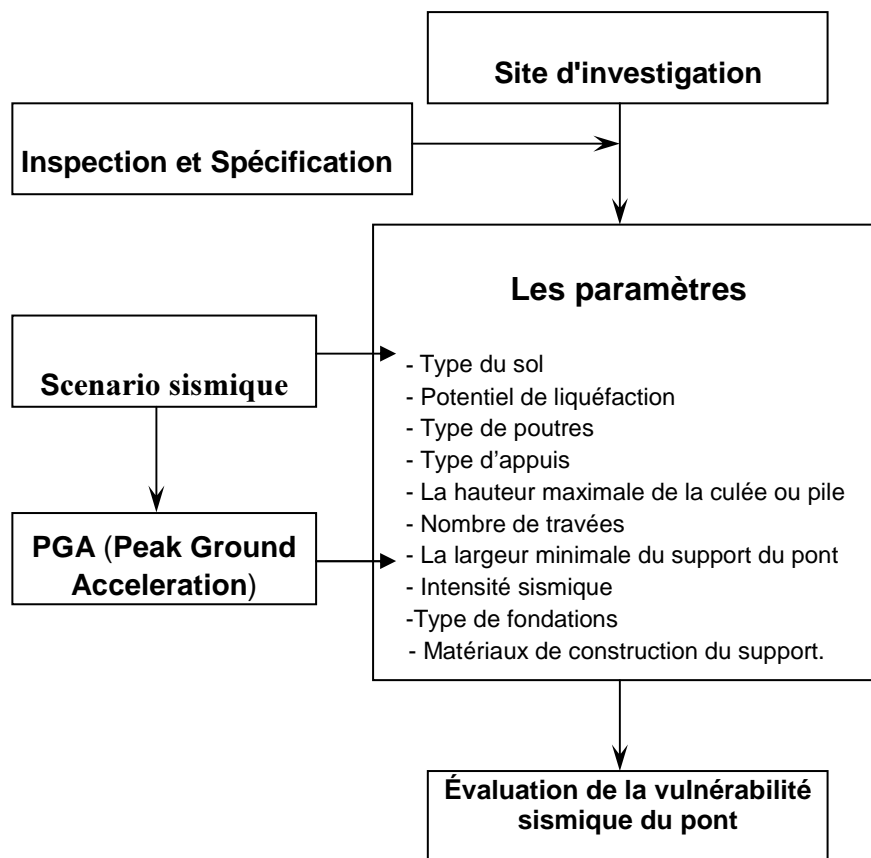


Figure 3.1 : Organigramme de l'analyse de la vulnérabilité des ponts selon la méthode de « K. Kubo et T. Katayama » [26].

3.2.2. Analyse statistique de la méthode :

Une trentaine de ponts de différents degrés d'endommagement ont été sélectionnés pour servir d'exemple. Ces ponts ont été endommagés suite aux séismes de Kanto (1923), Fukui (1948) et Niigata (1964). Quatorze ponts ont été endommagés mais ne se sont pas effondrés. Le degré de dommage a été estimé en se référant aux rapports d'expertises post sismique et une valeur numérique a été affectée à chaque exemple.

Posons que le degré de dommage d'un exemple i est noté A_i . Les valeurs de A_i varie de 1,5 à 5 pour les ponts effondrés et de 0,8 à 2 pour les autres.

Les paramètres ayant une influence sur le comportement des ponts ont été identifiés à partir de ces exemples. Après plusieurs analyses préliminaires dix paramètres ont été sélectionnés. Ils sont donnés dans la première colonne du tableau 3.1. Chaque paramètre est divisé en catégories. Les catégories sont affectées par les exemples choisies. Par exemple il n'y a pas eu de dommage sur des ponts bâti sur un sol de type I donc on retrouve que les types II, III et IV.

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Type de Sol	Sol Rigide (Stiff)	0,50
	Sol Moyen (Medium)	1,00
	Sol Mou (Soft)	1,50
	Sol Très Mou (Very Soft)	1,80
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
	$0 < PL < 15$	1,50
	$PL \geq 15$	2,00
Type de Poutre	Arc ou Portique Rigide	1,00
	Poutre Continue	2,00
	Poutre Simple	3,00
Type d'Appuis	Avec un Appareillage Spécifique	0,60
	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	Mobiles	1,15
	Autres (Pas d'appuis, etc.)	1,10
	Système de Prévention	0,60
	Système d'Isolation ou de Résistance Sismique	0,90
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	Inferieur à 5m	1,00
	Entre 5 et 10m	1,35
	Supérieur à 10m	1,70
Nombre de Travées	1 travée	1,00
	2 travées ou plus	1,75
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	Supérieur à 70cm (Wide)	0,80
	Inferieur a 70cm (Narrow)	1,20
	Pas d'assise (0 cm) (No seat)	1,10
Intensité Sismique	$MSK < 7.885$	1,00
	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
	$8.680 \leq MSK < 9.475$	2,40
	$9.475 \leq MSK < 10.270$	3,00
	$10.270 \leq MSK$	3,50
Type de Fondation	Pieu Battu	1,40
	Autre Pieu	1,00
	Etendue	1,00
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
	Acier	1,00
	Maçonnerie	1,40
	Autres	1,00

Tableau 3.1 : Tableau des paramètres de la méthode avec leurs coefficients de pondérations [26].

L'explication de ces paramètres est présentée dans la suite.

3.2.3. Définitions des paramètres :

Les paramètres de la méthode de « Kubo-Katayama » sont de type descriptif ou typologique (comme Type de poutres, Type d'appuis, etc.), ou bien de type quantitatif (Intensité sismique, Potentiel de liquéfaction, etc.). Ils se présentent comme suit [26] :

3.2.3. 1) Type du sol :

Selon le guide "SERDHB" (Specification for Earthquake Resistant Design of Highway Bridges) élaboré par "JRA" (Japan Road Association) en 1971, le type du sol est classé en quatre catégories :

Type 1 :

Dans ce premier type on a soit un sol de l'ère tertiaire ou plus, définie comme une roche mère ou substratum, ou une couche de diluvien avec une profondeur de moins de 10m au-dessus de la roche mère. Ce type est noté comme sol rigide.

Type 2 :

Ce type regroupe les sols composés d'une couche de diluvien avec une profondeur de plus de 10m au-dessus de substratum, et les sols constitués d'une couche d'alluvion avec une profondeur de moins de 10m au-dessus de la roche mère. Ce type est mentionné comme sol moyen.

Type 3 :

Couche en Alluvion avec une profondeur de moins de 25m composé d'une couche liquéfiable de moins de 5m de profondeur, ou un sol avec une contrainte de compression inférieure à 0,2 kg/cm². Il est noté comme sol mou.

Type 4 :

Dans ce dernier on trouve les types non classés dans les autres types (I, II, III), ce type est considéré comme sol très mou.

3.2.3. 2) Potentiel de liquéfaction :

La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique. Le passage d'une onde sismique provoque dans certaines formations géologiques, la perte de résistance d'un matériau sableux saturé en eau, liée à

une augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques.

La classification de ce paramètre repose sur la valeur du potentiel de liquéfaction selon "SERDHB" on à trois catégories :

Catégorie A :

Sol non liquéfiable avec un potentiel de liquéfaction nul.

Catégorie B :

Dans cette catégorie la valeur du potentiel de liquéfaction est entre 0 et 15.

Catégorie C :

Le potentiel de liquéfaction est supérieur ou égal à 15 ($PL \geq 15$).

3.2.3. 3) Type de poutres :

Une poutre dans un pont est un élément structurel très important, trois catégories sont proposées pour ce paramètre :

Catégorie A :

Sont classés, dans cette catégorie, les ponts avec un arc ou portique rigide.

Catégorie B :

Dans cette catégorie, sont classés les ponts à poutre continue.

Catégorie C :

Cette catégorie regroupe les ponts à poutre simple.

3.2.3. 4) Type d'appuis :

Ce paramètre est divisé en quatre classes, qui sont :

Catégorie A :

Dans cette classe, on trouve les ponts qui ont des appuis avec un appareillage spécifique.

Catégorie B :

On trouve dans cette catégorie, les ponts avec des appuis d'une bonne conception.

Catégorie C :

Sont classés, dans cette catégorie, les ponts à appuis mobiles.

Catégorie D :

Cette catégorie regroupe les ponts qui n'ont pas d'appuis, ou qui ont un autre type non cité ci-dessus.

Après avoir choisis la catégorie correspond au paramètre type d'appuis, Ce dernier sera traité selon deux critères : système de prévention et système d'isolation afin de déterminer son propre coefficient de pondération.

Ces deux critères qui sont associés à deux nouveaux coefficients de pondération, peuvent être définis comme suit :

- Le système de prévention regroupe tous les travaux d'entretien et de réparation des éléments d'un pont, particulièrement les appareils d'appuis qui nécessitent une permanente surveillance durant la vie de l'ouvrage afin de permettre les préventions et les interventions nécessaires.
- La présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique, ce système influe sur le comportement sismique de l'ouvrage et il consiste à ajouter des différents dispositifs pour assurer une bonne résistance sismique, à savoir les butées, les attelages sismiques, les appareils d'appuis spécifiques et les amortisseurs.

3.2.3. 5) Hauteur maximale de la culée ou pile :

La classification de ce paramètre, se fait comme suit :

Classe A :

Dans cette classe, la hauteur maximale de la culée ou pile est inférieure à 5m.

Classe B :

Sont classés dans cette classe, les ponts qui ont une hauteur maximale de leurs culées ou piles entre 5 et 10m.

Classe C :

On trouve dans cette catégorie, les ponts avec une hauteur maximale qui dépasse les 10m.

3.2.3. 6) Nombre de travées :

Pour ce paramètre on a deux groupes de classification :

Classe A :

Cette classe regroupe les ponts à une seule travée.

Classe B :

Dans cette classe, sont regroupés les ponts à deux ou plusieurs travées.

3.2.3. 7) Largeur minimale du support du pont :

Ce paramètre a une grande importance pour éviter les dégâts sismiques, en particulier l'échappement du tablier de ses appuis. Cette largeur signifie la distance minimale entre la fin d'appui et le bord du sommet du support (culée ou pile) comme elle est montrée dans la figure ci-dessous.



Figure 3.2 : Largeur du support du pont.

Les trois classes de classification pour ce paramètre sont :

Classe A :

C'est la classe des ponts qui ont une large largeur d'appuis, "L" est supérieur à 70 cm.

Classe B :

Dans cette classe on trouve les ponts à une largeur d'appui étroite, "L" est inférieur à 70 cm.

Classe C :

Cette classe regroupe les ponts qui n'ont pas une largeur d'assise, "L" égale à zéro. Par exemple le cas d'un portique rigide.

3.2.3. 8) Intensité sismique :

L'intensité sismique estime les dégâts causés à la surface par un séisme, ces dégâts dépendent de la nature des soles, de la profondeur du séisme et des types des structures. La classification de ce paramètre repose sur le degré de cette intensité sur l'échelle MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik), La classification adoptée dans la méthode est la suivante :

Classe A :

Dans cette classe, l'intensité sismique en MSK est inférieure à 7,885.
($MSK < 7,885$)

Classe B :

Sont classées les intensités sismiques entre 7,885 et 8,680.
($7,885 \leq MSK < 8,680$)

Classe C :

Cette classe regroupe les intensités sismiques entre 8,680 et 9,475.
($8,680 \leq MSK < 9,475$)

Classe D :

Dans la catégorie suivante, on trouve les intensités sismiques entre 9,475 et 10,270. ($9,475 \leq MSK < 10,270$)

Classe E :

Les intensités sismiques supérieures ou égales à 10,270 se trouvent dans ce groupe. ($MSK \geq 10,270$)

3.2.3. 9) Type de fondations :

Le rôle des fondations ne se limite pas à transmettre les charges verticales de la superstructure au sol, elles permettent aussi de prolonger les ondes sismiques à la superstructure, ce qui donne une importance particulière à ce paramètre. La classification de ce paramètre se fait comme suit :

Catégorie A :

Cette catégorie regroupe les ponts qui ont des fondations en pieux battu.

Catégorie B :

Les ponts avec d'autres types de pieux sont regroupés dans cette classe.

Catégorie C :

Cette classe est pour le type des fondations étendu.

3.2.3. 10) Matériaux de construction du support (pile, culée)

Comme il est noté précédemment, le développement et la variation des matériaux de construction ont une influence sur le comportement des ponts. De même ces matériaux affectent la longévité de ces derniers, notamment leurs supports (piles, culées). Ce paramètre est classé comme suit :

Classe A :

Dans cette classe on trouve les ponts avec des supports en béton armé.

Classe B :

Les ponts avec des supports métalliques sont classés dans cette catégorie.

Classe C :

Cette classe regroupe les ponts dont les supports sont en maçonnerie.

Classe D :

Les ponts dont les supports sont construits avec d'autres matériaux que ceux cités ci-dessus, sont classés dans cette dernière classe.

3.2.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'indice de vulnérabilité « I_v » se calcul comme étant le produit des coefficients de pondération qui représentent la classe des paramètres du pont, comme il est noté dans l'équation suivante [26].

$$I_v = \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^{m_j} w_{jk}^{X_{ijk}}$$

Avec :

N : Le nombre de tous les paramètres.

M_j : Le nombre de classes de paramètre j .

x_{ijk} : Correspondant à la classe k du paramètre j de l'échantillon (pont) i .

Cette variable prend la valeur 1 (un) si les propriétés de l'échantillon i correspondent à la classe k pour le paramètre j , et 0 (zéro) autrement.

w_{jk} : Le coefficient de pondération de la classe k du paramètre j .

3.2.5. Classification :

Le classement de cet indice est établi suivant trois classes de probabilité d'endommagement qui sont indiquées dans le tableau suivant :

Classes de probabilité d'endommagement	I_v
Faible probabilité d'endommagement	$0 < I_v < 22$
Moyenne probabilité d'endommagement	$22 \leq I_v < 30$
Forte probabilité d'endommagement	$I_v \geq 30$

Tableau 3.2 : Tableaux des classes d'endommagement en fonction de " I_v " [26].

3.3. Méthode Modifiée :

L'observation des caractéristiques des ponts présents en Algérie, nous a interpellés sur quelques paramètres qui nous semblent avoir un impact sur la réponse sismique des ponts. Aussi nous nous proposons dans ce qui suit de voir l'influence de ces paramètres ainsi que les modifications que nous avons apportés à la méthode pour la rendre plus applicable à notre contexte.

3.3.1. Modifications apportées :

Les nouvelles modifications apportées à cette méthode sont les suivantes :

1. Calcul des intensités sismiques sur l'échelle MMI (Modified Mercalli Intensity Scale) au lieu de MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik scale).
2. Introduction de nouveaux paramètres qui ne sont pas inclus dans cette méthode, et qui semblent avoir une influence sur la vulnérabilité sismique des ponts. Ces paramètres sont :
 - La typologie de la culée.
 - La typologie de la pile.
 - La courbure du tablier.
3. Attribution des valeurs des coefficients de pondération à chaque classe de ces paramètres.
4. Etablissement des nouvelles bornes des classes de l'indice de vulnérabilité.

5. Elaboration de la fiche technique qui regroupe tous les paramètres de cette méthode et les classés selon leurs ordres d'importance et d'influence sur la vulnérabilité sismique des ponts.

La mise en œuvre de ce qui a précédé a été effectué selon les étapes que nous allons expliciter.

3.3.2. Mise en œuvre :

Comme il est noté précédemment l'intensité sismique dans la méthode de «Kubo-Katayama» est représentée en MSK, et puisque cette dernière devient obsolète, nous avons donc représenté l'intensité sismique dans cette méthode sur l'échelle MMI. Pour effectuer ce changement de la représentation de l'effet sismique nous avons utilisé la loi de "Murphy" pour exprimer le PGA (Peak Ground Acceleration) en fonction de MSK puis le MMI en fonction du PGA, ce qui est montré ci-dessous.

La loi du Murphy :

$$MSK = \frac{\ln\left(\frac{PGA}{0,8103}\right)}{0,7433} \implies PGA = 0,8103 e^{(0,7433 \cdot MSK)}$$

$$PGA = 1,7787 e^{(0,5756 \cdot MMI)} \implies MMI = \frac{\ln\left(\frac{PGA}{1,7787}\right)}{0,5756}$$

MSK	PGA (cm/s ²)	MMI
7,885	284,453	8,816
8,680	513,625	9,843
9,475	927,429	10,869
10,270	1674,617	11,896

Tableau 3.3 : Transformation du MSK en MMI en fonction du PGA.

Par la suite nous avons opté pour des valeurs normalisées de ces nouvelles classes d'intensité sismique représentée à l'échelle MMI comme indiqué sur le tableau suivant :

Paramètre	Classes en MMI	Coefficient de pondération
Intensité sismique	MMI < IX	1,0
	IX ≤ MMI < X	2,1
	X ≤ MMI < XI	2,4
	XI ≤ MMI < XII	3,0
	XII ≤ MMI	3,5

Tableau 3.4 : Nouvelles bornes d'intensité sismique en MMI.

Afin d'introduire de nouveaux paramètres, nous allons faire des simulations numériques de ces derniers. Ces simulations consistent à effectuer une modélisation en éléments finis des paramètres rajoutés puis de déterminer des coefficients de pondération pour chaque classe définie des paramètres traités. L'étude faite pour la détermination de ces coefficients sera exposée dans ce qui suit.

3.3.2. 1) Typologie de la culée :

Une étude bibliographique nous a amené à constater que la typologie de la culée n'avait pas d'influence sur le comportement sismique d'un pont quelque soit le type de la culée (culée enterrée, culée remblayée ou fondée en tête de déblai) à cause de la rigidité qui tend vers l'infinie ($K=\infty$). Ceci a été confirmé par le guide de conception « pont courant en zone sismique » élaboré par SETRA, [27] de même la modélisation nous a donné les même résultats on ne prendra pas en compte ce paramètre.

3.3.2. 2) Typologie de la pile :

Pour ce paramètre nous avons considéré trois modèles à étudier qui ont les mêmes caractéristiques mécaniques. Le premier est un pont à une seule travée (sans appuis intermédiaires), le deuxième est un pont à piles colonnes, et enfin le troisième est un pont à pile en fût massif. Les caractéristiques des matériaux et les étapes de modélisation par un logiciel de calcul sont données dans l'annexe 3.

a. Pont à une seule travée : (sans piles)

Les caractéristiques de l'ouvrage étudié sont :

- Une longueur totale du tablier égale à 60m.
- Une largeur totale du tablier égale à 10m.
- Un tablier en dalle pleine dont les dimensions de sa section transversale sont représentées dans la Figure 3.3. Ce tablier repose sur chacun de ces appuis par l'intermédiaire de quatre appareils d'appuis en caoutchouc fretté qui ont une rigidité $K=3200\text{kN/m}$ chacun (Voir annexe 3)

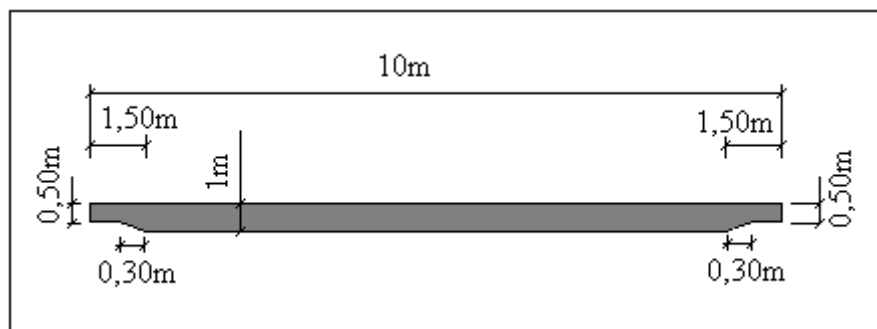


Figure 3.3 : section transversal du tablier du pont.

Le modèle numérique est représenté dans la figure suivante :

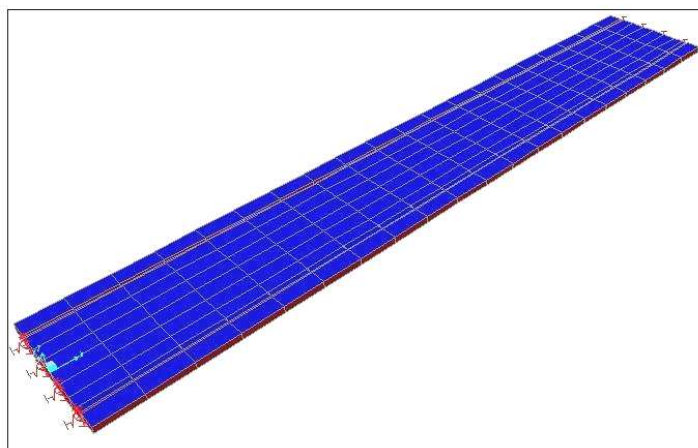


Figure 3.4 : Pont droit a une seule travée.

b. Pont a piles colonnes : (Pont à deux travées séparées par piles colonnes)

Dans ce modèle nous avons gardé les mêmes caractéristiques du premier modèle (pont a une seul travée), sauf que nous avons ajouté une pile qui se compose de trois colonnes de section circulaire (diamètre égale à 100cm) et d'une hauteur H égale à 6m, au milieu du tablier. Ce dernier repose au niveau de cet appui sur quatre appareils d'appuis, qui ont les mêmes caractéristiques que les autres appareils d'appuis qui se trouvent au niveau des culées. Ces organes d'appuis sont posés sur un chevêtre de section 150 cm x 120 cm. Ceci est illustré sur la figure suivante :

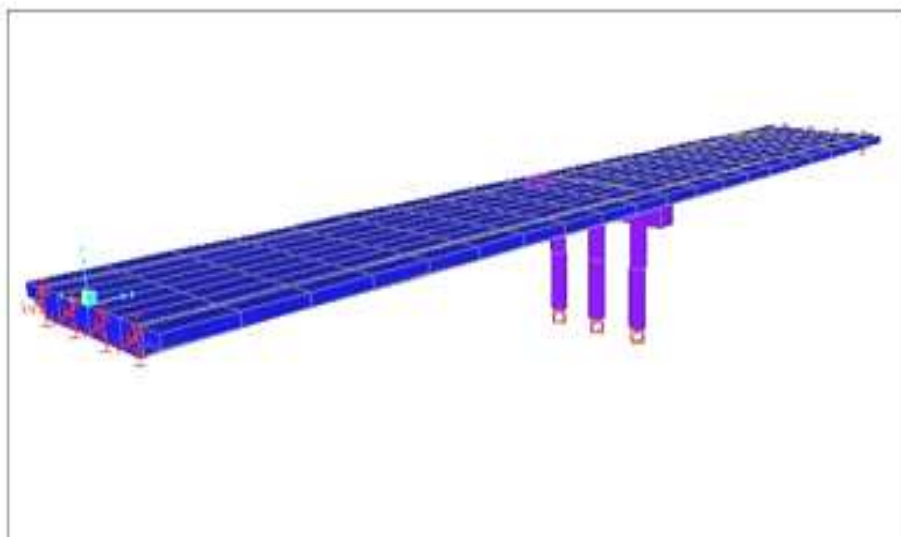


Figure 3.5 : Pont à deux travées séparées par piles colonnes.

c. Pont à pile en fût massif : (Pont à deux travées séparées par pile en fût massif)

Dans ce modèle, nous avons considéré une pile en fût massif de dimensions 0,6 m x 6 m x 10 m, le modèle est représenté dans la figure suivante :

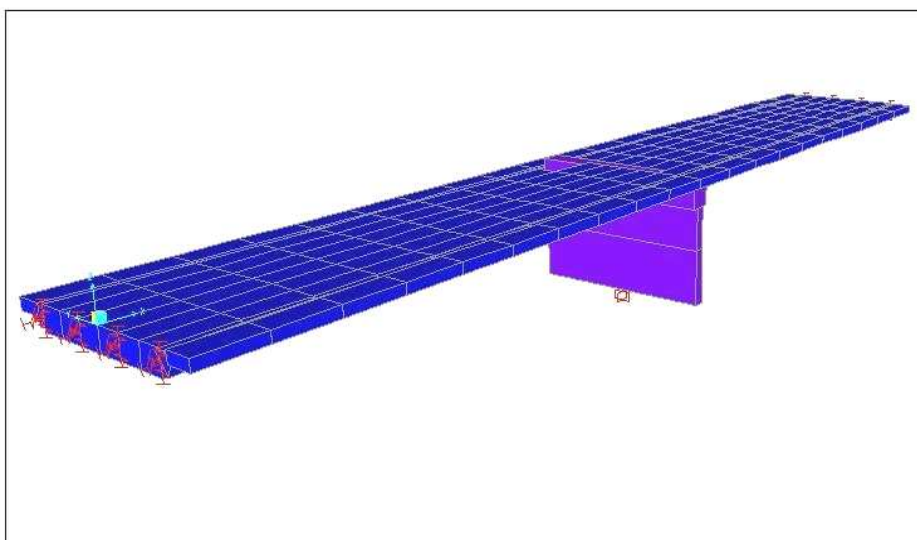


Figure 3.6 : Pont à deux travées séparées par pile en fût massif.

3.3.2. 3) Courbure du pont :

La courbure d'un pont représente l'angle balayé en plan par la tangente à l'axe horizontal du tablier [19], elle varie suivant le degré de cet angle et le rayon de courbure R.

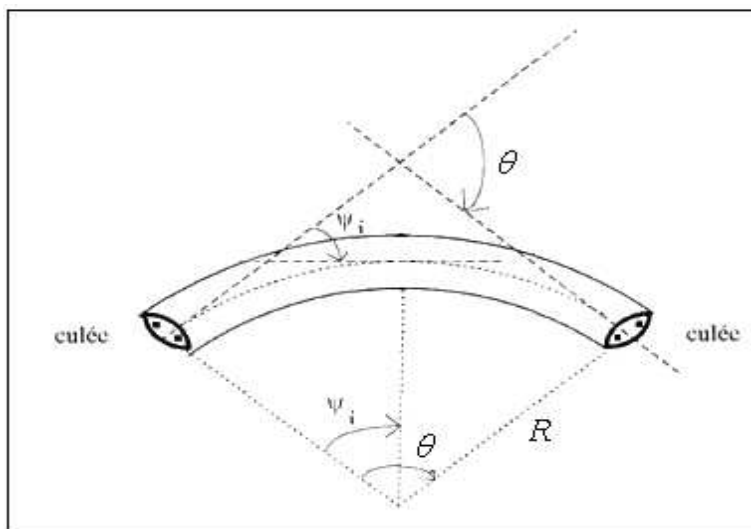


Figure 3.7 : Le rayon et l'angle de courbure horizontale d'un tablier [27].

L'étude de ce paramètre se fera sur quatre ponts dont la courbure horizontale de leurs tabliers varie. Ces modèles sont les suivant :

a. Pont droit :

Pour ce modèle nous avons conservé le même modèle (pont à une seule travée) étudié précédemment pour le paramètre typologie de la pile avec un angle $\theta = 0^\circ$ et un rayon $R = 0\text{m}$.

b. Pont légèrement courbé :

Pour ce modèle le tablier est courbé d'un angle θ de 30° et le rayon R est de 100m , comme il est schématisé dans la figure suivante.

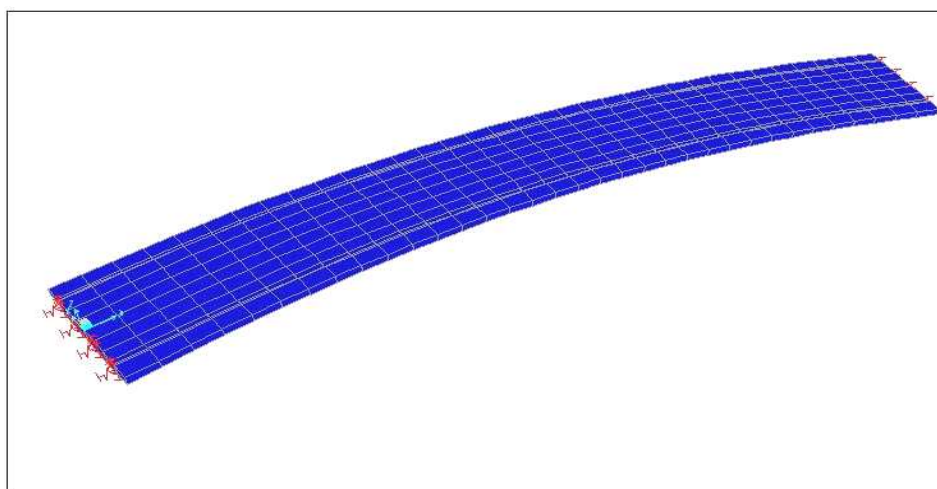


Figure 3.8 : Pont à tablier légèrement courbé.

c. Pont moyennement courbé :

Ce modèle se caractérise par un angle de courbure horizontale $\theta = 30^\circ$ et un rayon de courbure $R = 60\text{m}$, comme indiqué dans la figure 3.9.

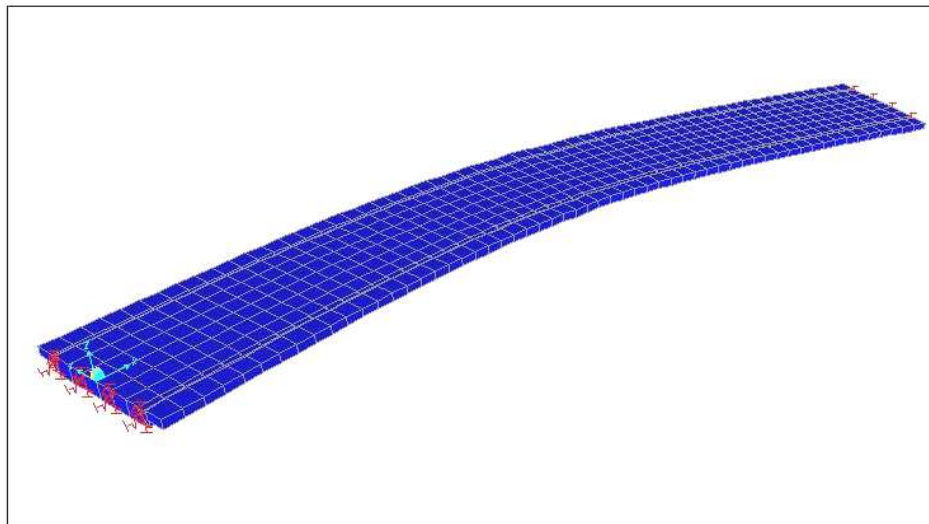


Figure 3.9 : Pont à tablier moyennement courbé.

b.4. Pont fortement courbé :

La figure suivante représente ce dernier modèle qui se définit par un angle de courbure de 80° et un rayon $R = 30\text{m}$ (voir figure 3.10).

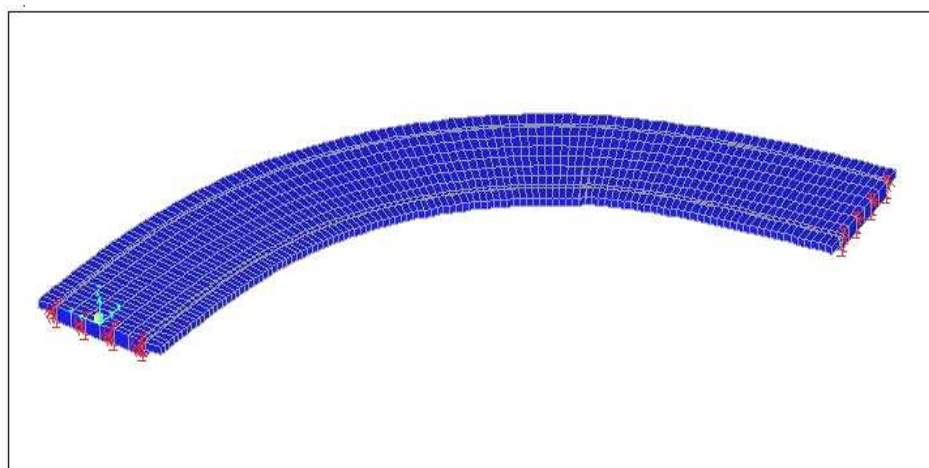


Figure 3.10 : Pont à tablier fortement courbé.

Par la suite nous avons fait une étude sismique par une analyse temporelle de tous les modèles étudiés, afin de déterminer les réponses

sismiques (périodes, déplacements, etc.) de ces modèles. Dans l'annexe 3, nous donnons les caractéristiques sismiques utilisées pour l'analyse.

3.3.3. Interprétation des résultats:

Afin d'évaluer le comportement structural et sismique de modèles des ponts traités, les résultats ont été rapportés en termes de périodes et de déplacements. Les tableaux suivants regroupent les périodes fondamentales et les déplacements extrêmes pour chaque modèle, suivant les trois directions et selon les combinaisons utilisées.

Modèles	Pont à une travée	Pont à piles colonnes	Pont à pile en fut massif
Périodes fondamentales T(s)	2,2983	1,0415	1,0195

Tableau 3.5 : Périodes fondamentales des modèles du paramètre typologie de la pile.

Modèles	Pont droit	Pont légèrement courbé	Pont moyennement courbé	Pont fortement courbé
Périodes fondamentales T(s)	2,2983	2,3916	2,3993	3,1323

Tableau 3.6 : Périodes fondamentales des modèles du paramètre courbure du pont.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherrhell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,1869	0,1886	0,0585	0,0244	0,0237	0,0075	0,0248	0,0273	0,0084
	Min	-0,1900	-0,1852	-0,0594	-0,0238	-0,0243	-0,0074	-0,0276	-0,0245	-0,0092
dy (m)	Max	0,1862	0,1870	0,0563	0,0243	0,0245	0,0074	0,0245	0,0248	0,0075
	Min	-0,1893	-0,1904	-0,0573	-0,0238	-0,0240	-0,0072	-0,0273	-0,0276	-0,0084
dz (m)	Max	0,0718	0,0722	0,2388	0,0057	0,0058	0,0190	0,0283	0,0284	0,0944
	Min	-0,0582	-0,0586	-0,1936	-0,0066	-0,0067	0,0221	-0,0261	-0,0261	-0,0869

Tableau 3.7 : Déplacements extrêmes du 1^{er} modèle pour le paramètre typologie de la pile.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherrhell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,0641	0,1124	0,0337	0,0118	0,0160	0,0048	0,0262	0,0379	0,0114
	Min	-0,0544	-0,1106	-0,0332	-0,0134	-0,0146	-0,0044	-0,0274	-0,0306	-0,0091
dy (m)	Max	0,0637	0,1109	0,0333	0,0118	0,0146	0,0044	0,0261	0,0306	0,0092
	Min	-0,0540	-0,1127	-0,0339	-0,0134	-0,0160	-0,0048	-0,0272	-0,0380	-0,0114
dz (m)	Max	0,0319	0,0326	0,1053	0,0047	0,0048	0,0155	0,0129	0,0131	0,0426
	Min	-0,0310	-0,0316	-0,1023	-0,0052	-0,0052	-0,0170	-0,0126	-0,0128	-0,0417

Tableau 3.8 : Déplacements extrêmes du 2^{ème} modèle pour le paramètre typologie de la pile.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherrhell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,0584	0,1046	0,0314	0,0113	0,0150	0,0045	0,0246	0,0379	0,0114
	Min	-0,0445	-0,1019	-0,0305	-0,0127	-0,0136	-0,0041	-0,0214	-0,0314	-0,0094
dy (m)	Max	0,0580	0,1022	0,0307	0,0112	0,0137	0,0041	0,0245	0,0315	0,0094
	Min	-0,0441	-0,1048	-0,0315	-0,0126	-0,0150	-0,0045	-0,0213	-0,0379	-0,0114
dz (m)	Max	0,0318	0,0320	0,1057	0,0047	0,0047	0,0155	0,0129	0,0129	0,0427
	Min	-0,0310	-0,0312	-0,1027	-0,0051	-0,0052	-0,0170	-0,0126	-0,0127	-0,0418

Tableau 3.9 : Déplacements extrêmes du 3^{ème} modèle pour le paramètre typologie de la pile.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherrhell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,1869	0,1886	0,0585	0,0244	0,0237	0,0075	0,0248	0,0273	0,0084
	Min	-0,1900	-0,1852	-0,0594	-0,0238	-0,0243	-0,0074	-0,0276	-0,0245	-0,0092
dy (m)	Max	0,1862	0,1870	0,0563	0,0243	0,0245	0,0074	0,0245	0,0248	0,0075
	Min	-0,1893	-0,1904	-0,0573	-0,0238	-0,0240	-0,0072	-0,0273	-0,0276	-0,0084
dz (m)	Max	0,0718	0,0722	0,2388	0,0057	0,0058	0,0190	0,0283	0,0284	0,0944
	Min	-0,0582	-0,0586	-0,1936	-0,0066	-0,0067	0,0221	-0,0261	-0,0261	-0,0869

Tableau 3.10 : Déplacements extrêmes du 1^{er} modèle pour le paramètre courbure du pont.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,1872	0,1916	0,0775	0,0244	0,0241	0,0098	0,0249	0,0278	0,0113
	Min	-0,1905	-0,1883	-0,0763	-0,0239	-0,0246	-0,0100	-0,0277	-0,0249	-0,0101
dy (m)	Max	0,1897	0,1877	0,0771	0,0246	0,0246	0,0099	0,0254	0,0249	0,0106
	Min	-0,1920	-0,1910	-0,0776	-0,0242	-0,0240	-0,0098	-0,0274	-0,0278	-0,0110
dz (m)	Max	0,0776	0,0778	0,2578	0,0062	0,0062	0,0205	0,0324	0,0325	0,1076
	Min	-0,0596	-0,0599	-0,1980	-0,0066	-0,0066	-0,0219	-0,0284	-0,0285	-0,0944

Tableau 3.11 : Déplacements extrêmes du 2^{ème} modèle pour le paramètre courbure du pont.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,1872	0,1914	0,0774	0,0244	0,0241	0,0097	0,0248	0,0277	0,0112
	Min	-0,1903	-0,1882	-0,0762	-0,0238	-0,0246	-0,0100	-0,0276	-0,0248	-0,0101
dy (m)	Max	0,1897	0,1876	0,0771	0,0246	0,0245	0,0099	0,0253	0,0248	0,0106
	Min	-0,1918	-0,1908	-0,0775	-0,0242	-0,0240	-0,0098	-0,0273	-0,0277	-0,0109
dz (m)	Max	0,0776	0,0778	0,2578	0,0062	0,0062	0,0205	0,0326	0,0327	0,1084
	Min	-0,0594	-0,0596	-0,1970	-0,0067	-0,0067	-0,0221	-0,0284	-0,0286	-0,0944

Tableau 3.12 : Déplacements extrêmes du 3^{ème} modèle pour le paramètre courbure du pont.

Déplacements		Séisme de Boumerdès			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
dx (m)	Max	0,1944	0,1877	0,0659	0,0245	0,0236	0,0083	0,0281	0,0271	0,0096
	Min	-0,1912	-0,1846	-0,0646	-0,0250	-0,0241	-0,0085	-0,0277	-0,0243	-0,0093
dy (m)	Max	0,1871	0,1969	0,0664	0,0244	0,0248	0,0084	0,0246	0,0283	0,0095
	Min	-0,1902	-0,1940	-0,0655	-0,0239	-0,0253	-0,0085	-0,0274	-0,0277	-0,0093
dz (m)	Max	0,0861	0,0862	0,2845	0,0075	0,0075	0,0246	0,0295	0,0295	0,0972
	Min	-0,0705	-0,0706	-0,2312	-0,0068	-0,0067	-0,0224	-0,0333	-0,0333	-0,1098

Tableau 3.13 : Déplacements extrêmes du 4^{ème} modèle pour le paramètre courbure du pont.

Après une analyse statistique des résultats des déplacements mentionnés auparavant pour chaque paramètre et suivant chaque combinaison, nous avons obtenu les résultats indiqués dans les tableaux suivants :

Déplacements Moyens Modèles	Séisme de Boumerdes			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Pont a une travée	0,1471	0,1470	0,1107	0,0181	0,0182	0,0117	0,0264	0,0265	0,0358
Pont à piles colonnes	0,0499	0,0851	0,0570	0,0100	0,0119	0,0085	0,0221	0,0272	0,0209
Pont à pile en un fut massif	0,0446	0,0794	0,0554	0,0096	0,0112	0,0083	0,0196	0,0274	0,0210

Tableau 3.14 : Déplacements moyens des modèles pour le paramètre typologie de la pile.

Déplacements Moyens Modèles	Séisme de Boumerdes			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Pont droit	0,1471	0,1470	0,1107	0,0181	0,0182	0,0117	0,0264	0,0265	0,0358
Pont légèrement courbé	0,1494	0,1494	0,1274	0,0183	0,0184	0,0136	0,0277	0,0277	0,0408
Pont moyennement courbé	0,1493	0,1492	0,1272	0,0183	0,0183	0,0137	0,0277	0,0277	0,0409
Pont fortement courbé	0,1532	0,1533	0,1297	0,0187	0,0187	0,0134	0,0284	0,0284	0,0408

Tableau 3.15 : Déplacements moyens des modèles pour le paramètre courbure du pont.

Déplacements Moyens Paramètres	Séisme de Boumerdes			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Typologie de la pile	0,0805	0,1039	0,0743	0,0126	0,0137	0,0095	0,0227	0,0270	0,0259
Courbure du pont	0,1498	0,1497	0,1237	0,0184	0,0184	0,0131	0,0276	0,0276	0,0396

Tableau 3.16 : Déplacements moyens pour chaque paramètre.

Déplacements Moyens Modèles	Séisme de Boumerdes			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Pont a une travée	1,83	1,42	1,49	1,44	1,32	1,24	1,17	0,98	1,38
Pont à piles colonnes	0,62	0,82	0,77	0,80	0,86	0,89	0,97	1,01	0,81
Pont à pile en un fut massif	0,55	0,76	0,75	0,76	0,81	0,87	0,86	1,01	0,81

Tableau 3.17 : Coefficients des modèles pour le paramètre typologie de la pile.

Déplacements Moyens Modèles	Séisme de Boumerdes			Séisme de Cherchell			Séisme d'El Centro		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Pont droit	0,98	0,98	0,89	0,99	0,99	0,90	0,96	0,96	0,90
Pont légèrement courbé	1,00	1,00	1,03	1,00	1,00	1,04	1,00	1,01	1,03
Pont moyennement courbé	1,00	1,00	1,03	1,00	1,00	1,04	1,00	1,01	1,03
Pont fortement courbé	1,02	1,02	1,05	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03

Tableau 3.18 : Coefficients des modèles pour le paramètre courbure du pont.

A partir des tableaux précédents, nous sommes arrivé à la proposition suivante des coefficients de pondération pour les différentes classes des paramètres rajoutés.

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Typologie de la pile	Pas de piles	1,36
	Piles Colonnes	0,84
	Fut Massif	0,80
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
	Légèrement/ Moyennement courbé	1,01
	Fortement courbé	1,03

Tableau 3.19 : Coefficients de pondération des nouveaux paramètres.

Pour les deux paramètres étudiés, nous avons une bonne cohérence entre les coefficients de pondération trouvés et les catégories de ces paramètres. De même ces résultats sont jugés raisonnables car on remarque que la pluparts de ces coefficients appartiennent aux intervalles choisis auparavant dans l'analyse statistique de la méthode de « Kubo-Katayama », et le reste des coefficients ne s'éloigne pas de ces intervalles.

En fonction des valeurs obtenues, de nouvelles frontières des classes de dommage ont été proposées.

Classes de probabilité d'endommagement	I_v
Faible probabilité d'endommagement	$0 < I_v < 18$
Moyenne probabilité d'endommagement	$18 \leq I_v < 42$
Forte probabilité d'endommagement	$I_v \geq 42$

Tableau 3.20 : Tableaux des nouvelles classes d'endommagement en fonction de " I_v ".

Afin de permettre l'évaluation de l'indice de vulnérabilité d'un ouvrage d'art, nous avons élaboré une fiche technique (voir annexe 4) regroupant l'ensemble des informations nécessaires au calcul de cet indice.

Cette fiche sera remplie durant une enquête sur site, elle contient les parties suivantes :

1^{er} Partie : Données générales

Dans cette partie, on trouve les renseignements généraux du pont:

- Code et nom du pont;
- Nom de la commune où se trouve le pont;
- Nom de la route et de l'élément le traversant;
- Année de construction de l'ouvrage;
- Nombre de voies total dans le pont.

2^{eme} Partie : Caractéristiques géométriques

On y trouve :

- Longueur de l'ouvrage;
- Largeur de l'ouvrage.

3^{eme} Partie : Caractéristiques sismiques

Cette partie contient l'intensité sismique attendue.

4^{eme} Partie : Caractéristiques du sol

On trouve dans cette partie :

- Le type de sol;
- Le potentiel de liquéfaction.

5^{eme} Partie : Caractéristiques structurales

La présente partie rassemble :

- Le type de poutre;
- Le nombre de travées;
- La hauteur maximum de culée / Pile;
- Le matériau de construction de la culée / Pile;
- Le type de fondation;
- La typologie de la pile du pont;
- La courbure horizontale du tablier;
- La largeur minimale du support du Pont;
- Le type d'appui.

3.4. Conclusion :

La méthode de Kubo-Katayama a été analysée en détail. Ceci a permis une compréhension approfondie des paramètres utilisés ainsi que de la méthodologie employée pour la classification des ponts.

En se basant sur cette analyse et l'observation des ouvrages présents en Algérie, nous avons proposés un certain nombre de modification permettant l'utilisation de la méthode dans notre contexte.

A cet effet, des simulations numériques ont été effectués afin de caractérisés les nouveaux paramètres préconisés. Une nouvelle classification a été proposée aussi, ainsi que la fiche technique élaborée à cet usage.

La méthode de Kubo-Katayama et la méthode avec modifications ont été programmées en langage Delphi afin de les rendre facilement utilisable sur site par les ingénieurs.

CHAPITRE 4

PROGRAMMATION ET APPLICATION

4.1. Introduction :

Afin de faciliter l'utilisation de la théorie présentée auparavant (chapitre 3), nous avons développé un programme en « Delphi » permettant le calcul de l'indice de vulnérabilité et le classement des ponts par la méthode de « Kubo-Katayama ».

Par la suite nous avons programmés les modifications apportées à la méthode.

Des exemples seront présentés et traités par les deux approches.

4.2. Présentation de l'environnement Delphi :

Delphi est un environnement de programmation visuelle orienté objet destiné au développement rapide de programmes ou applications compatibles à plusieurs tâches, tel que le Windows. Ce logiciel fournit tous les outils nécessaires pour développer, tester et déployer des applications, donc parmi les principales particularités de Delphi qui nous a conduites à choisir ce logiciel de programmation nous avons [28] :

- Environnement de développement intégré,
- Bibliothèque complète de composants réutilisables,
- Conception par « glisser-déplacer »,
- Outils bidirectionnels,
- Compilateur de code natif,
- Outils de bases de données,
- Connectivité de bases de données intégrées.

Les programmes développés et les applications effectuées pour les deux méthodes sont détaillés dans les paragraphes suivants :

4.3. Méthode de « Kubo-Katayama »:

Un programme de calcul a été élaboré pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des ponts suivant la méthode de « Kubo-Katayama », les étapes

suivantes présentent la description et le mode de fonctionnement de ce programme ainsi que des applications effectuées en Algérie.

4.3.1. Présentation du programme développé :

Les procédures à suivre pour le calcul de l'« I_v » sont données dans l'organigramme suivant :

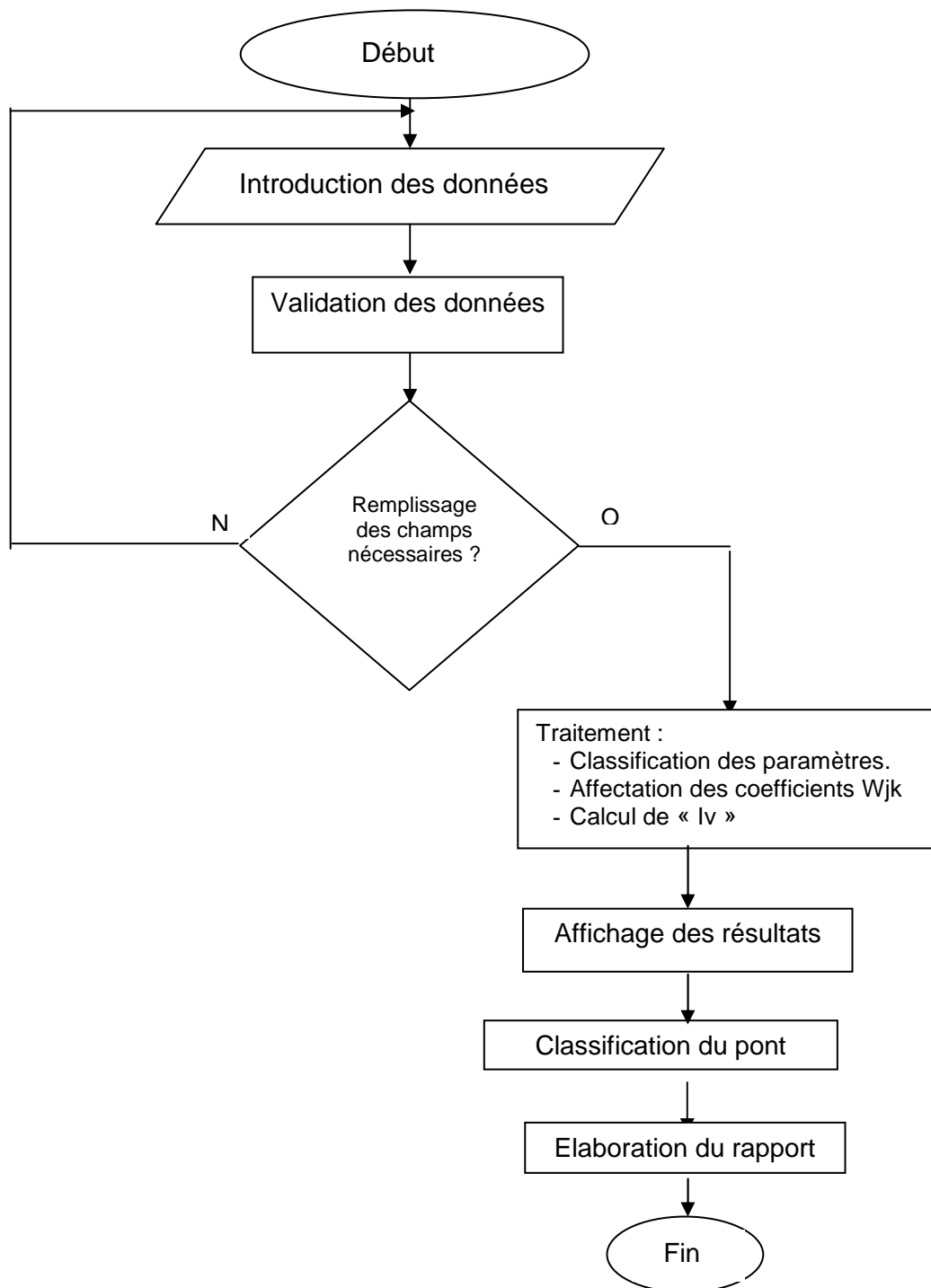


Figure 4.1 : Organigramme de calcul.

Le présent programme se compose de deux parties, la partie visuelle dite « Interface utilisateur » et la partie programme, appelée « code source ».

4.3.1. 1) Partie Interface Utilisateur :

Comme vous pouvez la voir dans les figures suivantes, cette interface se compose d'une page d'introduction des données géré par une barre des menus et un navigateur.

a. Barre des menus :

La barre des menus rassemble les principaux menus permettant de manipuler les différentes applications de l'étude de la vulnérabilité des ouvrages d'art, ces menus sont résumés comme suit:

a.1. Le menu Etude :

Ce menu nous permet :

- de lancer des nouvelles pages d'introduction des données.
- d'ouvrir, restaurer ou modifier une étude déjà traitée.
- de faire des enregistrements des données saisies et des résultats obtenus.
- d'imprimer le rapport obtenu pour la classification des ponts.

a.2. Le menu Consultation :

A partir de ce menu nous pouvons consulter les rapports d'expertise traités et les fiches techniques remplies et enregistrées préalablement.

a.3. Le menu Aide :

Dans ce dernier menu nous trouvons des informations à propos de ce programme et des renseignements sur son utilisation et son mode de fonctionnement.

b. Page d'Introduction des données :

Pour créer une nouvelle page d'introduction des données, il suffit de cliquer sur l'entrée «Nouveau» du menu Etude. Cette page est constituée de trois onglets (Paramètres d'identification, Paramètres de calcul, et Rapport),

plus un navigateur qui permet de se déplacer dans la base de données et d'effectuer des opérations d'enregistrement, de modification et de suppression.

b.1. Paramètres d'identification :

Cet onglet rassemble les renseignements généraux du pont et ses caractéristiques géométriques. (Voir la figure 4.2)

The screenshot displays the 'V.I.P.B' software window with the 'PARAMETRES D'IDENTIFICATION' tab selected. The interface includes a menu bar with options like 'Premier', 'Précédent', 'Suivant', 'Dernier', 'Nouveau', 'Supprimer', 'Modifier', 'Enregistrer', 'Annuler', and 'Actualiser'. The main form area contains the following fields and controls:

- Ministère: Text input field
- Date: Text input field
- Code principal: Text input field
- Nom de pont: Text input field
- Nom de la Wilaya: Dropdown menu
- Nom de la Commune: Dropdown menu
- Nom de la route: Text input field
- Nombre des voies: Text input field
- Année de construction: Dropdown menu
- Element le traversant: Dropdown menu
- Longueur de pont (m): Text input field
- Nom de l'element le traversant: Text input field
- Largeur de pont(m): Text input field
- Image upload area with 'Ajouter une Image' and 'Supprimer l'image' buttons

At the bottom of the window, there are buttons for 'Annuler', 'Suivant >>', 'Recherche', and 'Aide'.

Figure 4.2 : Présentation de la page des paramètres d'identification.

b.2. Paramètres de calcul :

Tous les paramètres inclus dans le calcul de l'indice de vulnérabilité se trouvent dans cet onglet, tel que les paramètres structuraux et sismiques. (Voir la figure 4.3)

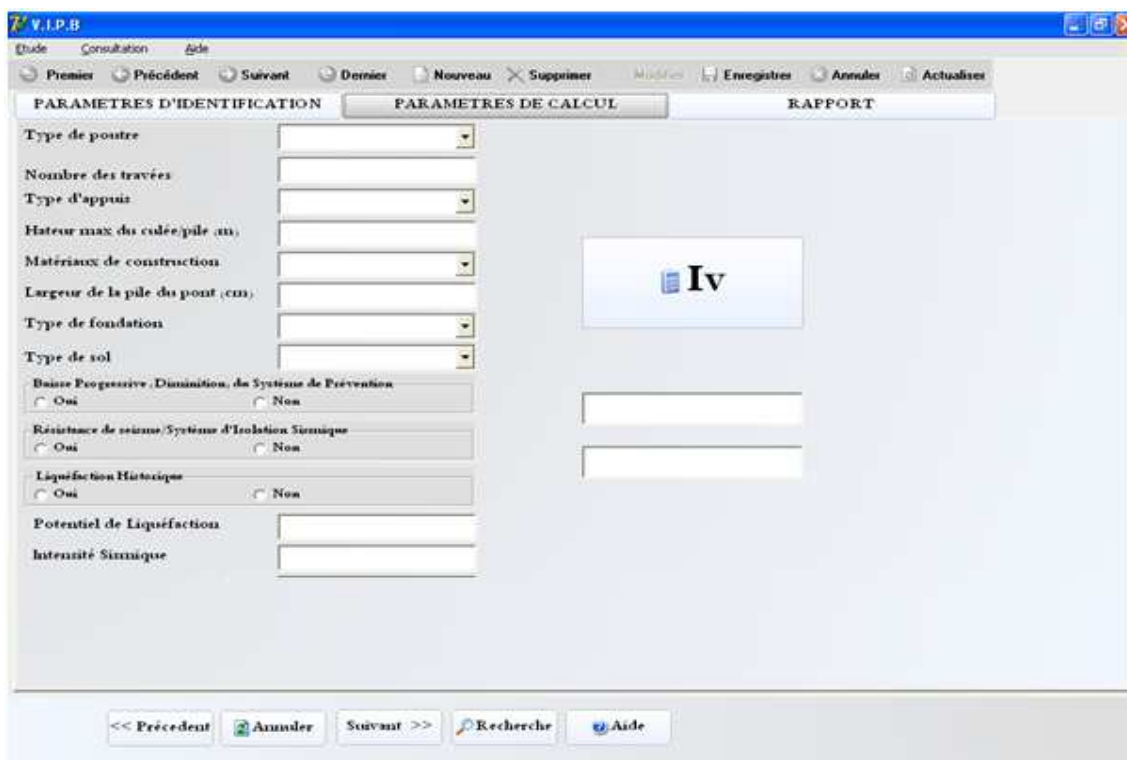


Figure 4.3 : Présentation de la page des paramètres de calcul.

b.3. Rapport:

Les résultats obtenus après le calcul sont présentés dans l'onglet « Rapport » montré sur la figure suivante.



Figure 4.4 : Présentation de la page de rapport d'expertise.

4.3.1. 2) Partie Programme :

Cette partie cachée à l'utilisateur, appelée « Code Source », rassemble les instructions écrites dans le langage Delphi pour permettre l'utilisation de ce programme de calcul. Cette partie fait le traitement automatique des données, tel que :

- L'identification des différents paramètres d'évaluation de la vulnérabilité des ponts.
- L'affectation des coefficients « w_{jk} » correspondant à chaque paramètre.
- Le calcul de l'indice de vulnérabilité « I_v » de l'ouvrage étudié.
- Ainsi que le classement de ces ouvrages selon leur indice de vulnérabilité calculé.

Le mode de fonctionnement de ce programme se fait en suivant la démarche suivante :

Après avoir lancé le logiciel en cliquant sur l'icône de lancement, choisissez dans le menu étude de la page d'accueil l'entrée « Nouveau » pour ouvrir une page d'introduction des données de la nouvelle étude. Remplissez les champs de l'onglet paramètres d'identification, par la suite cliquez sur suivant ou choisissez l'onglet paramètres de calcul et remplissez tous les champs de cet onglet, et enfin cliquez sur le bouton « IV », le rapport s'affichera indiquant la valeur de l'indice de vulnérabilité et le classement du pont étudié.

Concernant les champs réservés pour l'entrer des données, s'il s'agit des paramètres quantitatifs il faut saisir les caractères et les quantités nécessaires dans l'Edite, par contre pour les paramètres qualitatifs et typologiques il suffit de cliquer sur le menu et choisir l'une des catégories prédéfinies, ou choisir entre OUI ou NON.

Finalement, Il est possible d'imprimer la page du rapport final des résultats obtenus en cliquant sur l'entrée « Imprimer » du menu Etude.

Après la présentation du programme développé pour l'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts et son fonctionnement, on passe à une autre étape dans notre travail, celle de l'application qui sera présentée dans ce qui suit.

4.3.2. Exemples d'application :

Nous nous proposons de faire des applications de la méthode développée sur quelques ponts de la commune d'Alger centre et de la wilaya de Tipaza

4.3.2. 1) Pour la commune d'Alger centre :

Nous commençons par donner cinq exemples d'application dans la commune d'Alger centre, Cette commune située dans la wilaya d'Alger, s'étale sur 3,7km² de superficie et regroupe une dizaine de ponts.

a. Exemple 01 : Pont Krim Belkacem (Alger centre)

Le premier pont traité est un ouvrage à deux voies nommé Krim Belkacem situé dans la route nationale N° 11 à Alger centre et qui traverse le boulevard Krim Belkacem, Sa longueur est de 19m et sa largeur est de 13m. Après l'application de la méthode de «Kubo-Katayama» sur cet ouvrage nous avons les résultats donnés dans le tableau suivant :



Figure 4.5: Pont Krim Belkacem (Alger centre).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Moyen (Medium)	1,00
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	4 m	1,00
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	80cm	0,80
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	Iv	7,05
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.1 : Résultats de l'application de l'exemple 01 (Alger centre).

b. Exemple 02 : Pont Mohamed V (Alger centre)

Ce deuxième exemple d'application est le pont de Mohamed V (Alger centre) qui traverse la rue Cherif Omar, sa longueur égale a 6m et sa largeur égale a 14,25m, il est divisé en deux voies et il est constitué d'une seule travée. Après une enquête sur site on a obtenu :



Figure 4.6 : Pont Mohamed V (Alger centre).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Moyen (Medium)	1,00
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	6 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Maçonnerie	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	60 cm	1,20
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	lv	14,29
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.2 : Résultats de l'application de l'exemple 02 (Alger centre).

c. Exemple 03 : Pont de la Gare Ferroviaire (Alger centre)

L'exemple suivant est un ouvrage d'art a cinq travées construit en 1961, situé sur la R.N.05, il traverse le chemin de fer, sa longueur est de 126m et sa largeur est de 17m divisé en deux voies. Après l'enquête faite sur site on a :



Figure 4.7 : Pont de la Gare Ferroviaire (Alger centre).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Moyen (Medium)	1,00
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Continue	2,00
Nombre de Travées	5 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	5 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	140cm	0,80
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	IV	11,11
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.3 : Résultats de l'application de l'exemple 03 (Alger centre).

d. Exemple 04 : Pont Krim Belkacem (Alger centre)

Il s'agit du pont de Krim Belkacem situé sur la voie communale N°09 au boulevard Mohamed V, il traverse la rue des frères Ahmed et Boualem Khalef. Ce dernier est un pont en arc de 30m de longueur composé d'un seul arc, et 8,9m de largeur divisé en deux voies. Après avoir l'expertisé nous avons eu les résultats suivants:



Figure 4.8 : Pont Krim Belkacem (Alger centre).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Moyen (Medium)	1,00
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Arc ou Portique Rigide	1,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	12m	1,70
Matériau de la culée / Pile	Maçonnerie	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	Pas d'assise (0 cm) (No seat)	1,10
Type d'Appuis	Autres (Pas d'appuis, etc.)	1,10
	lv	6,04
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.4 : Résultats de l'application de l'exemple 04 (Alger centre).

e. Exemple 05 : Pont Siège de Parlement (Alger centre)

L'expertise de l'ouvrage d'art de «Siège de Parlement » (figure 4.9) installé à la R.N.05 qui traverse le chemin de fer, et qui se caractérise par une longueur de 80m et d'une largeur de 20,3m a conduit aux résultats suivants:

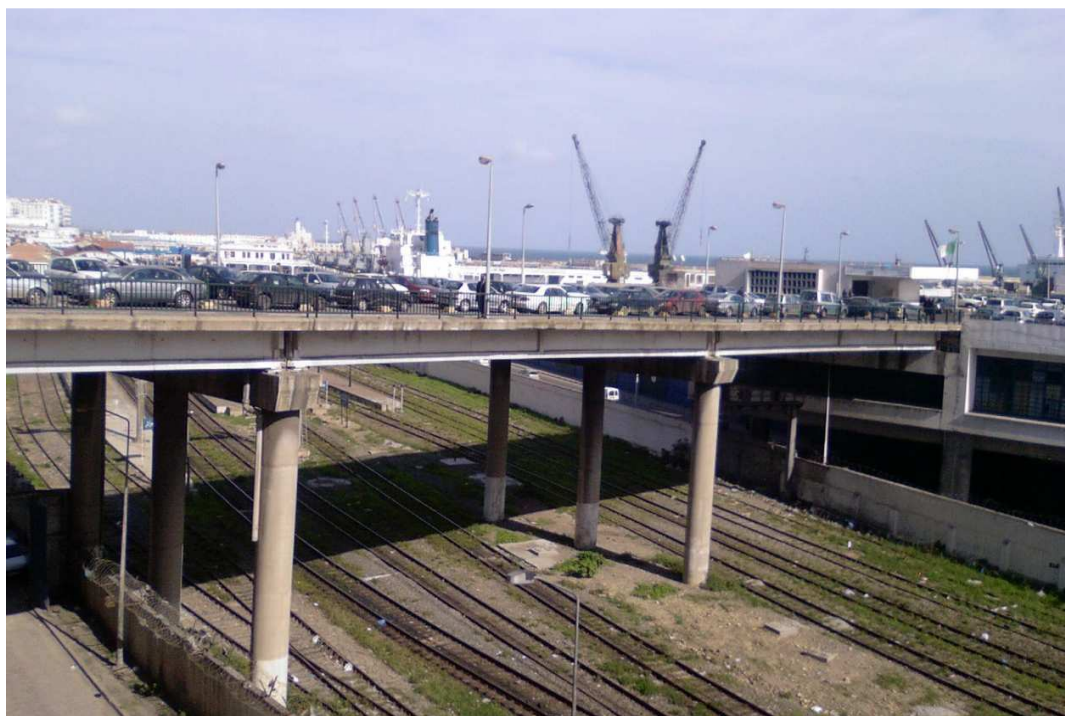


Figure 4.9 : Pont Siège de Parlement (Alger centre).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	7.885≤MSK<8.680	2,10
Type de Sol	Sol Moyen (Medium)	1,00
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	3 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	10,50 m	1,70
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Typologie de la pile	Piles Colonnes	0,84
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	80 cm	0,80
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	lv	20,99
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.5: Résultats de l'application de l'exemple 05 (Alger centre).

4.3.2. 2) Pour la wilaya de Tipaza :

Nous allons effectuer des applications de la méthode de «Kubo-Katayama » sur quelques ponts de la wilaya de Tipaza en utilisant le programme développé.

La wilaya de Tipaza (Figure 4.10) est située au nord de l'Algérie. Elle est considérée comme une zone de forte sismicité d'après le règlement parasismique algérien. Elle possède un grand nombre des ponts dont certains remontent à la période coloniale.

Cinq cas d'étude sont présentés dans ce qui suit.



Figure 4.10 : carte du réseau routier de la wilaya de Tipaza.

a. Exemple 01 : Pont de Bouyaghsane (Hadjout - Tipaza)

Le pont présenté dans la figure 4.11 est un pont construit en 1930 composé de deux travées ayant chacune une portée d'environ 5m. Sa longueur est de 12,70m et sa largeur est d'environ 14,20m. Le tablier repose sur deux culées et une pile en voiles, il se compose de deux voies de circulation. L'application de la méthode japonaise sur cet ouvrage nous a donné les résultats suivants :



Figure 4.11 : Pont de Bouyaghsane (Hadjout - Tipaza).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Mou (Soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Continue	2,00
Nombre de Travées	2 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	4,00 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Maçonnerie	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	70 cm	0,80
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	Iv	12,35
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.6: Résultats de l'application de l'exemple 01 (W.Tipaza).

b. Exemple 02 : Pont de Hachem (Sidi Amar - Tipaza)

Ce pont a été construit en 1993. Il comporte six travées et est constitué de cinq piles colonnes et un tablier de 141,80m de longueur et de 10,20m de largeur supportant une chaussée à deux voies de circulation. Les résultats de l'application de la méthode de «Kubo-Katayama » sont indiqués dans le tableau 4.7.



Figure 4.12 : Pont de Hachem (Sidi Amar - Tipaza).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq \text{MSK} < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Mou (Soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	$0 < \text{PL} < 15$	1,50
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	6 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	9,00 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Maçonnerie	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	70 cm	0,80
Type d'Appuis	Appuis (Avec une bonne conception)	1,00
	lv	37,50
	Evaluation	Forte probabilité d'endommagement

Tableau 4.7: Résultats de l'application de l'exemple 02 (W.Tipaza).

c. Exemple 03 : Pont de Harbil (Damous - Tipaza)

Le pont étudié est le Pont de Harbil localisé dans la commune de Damous sur la route nationale N° 11, il a été construit en 2002, il est long de 300m et large de 10,30m, son tablier courbé comporte deux voies de communication. Après avoir appliqué la méthode japonaise à ce pont, nous avons obtenu les résultats suivants.



Figure 4.13 : Pont de Harbil (Damous - Tipaza).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Mou (Soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	9 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	19,00 m	1,70
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	45 cm	1,20
Type d'Appuis	Avec un Appareillage Spécifique	0,60
	IV	28,34
	Evaluation	Moyenne probabilité d'endommagement

Tableau 4.8: Résultats de l'application de l'exemple 03 (W.Tipaza).

d. Exemple 04 : Pont Ikhouba (Messalmoun - Tipaza)

Le présent pont en arc de maçonnerie a été construit en 1870. Situé sur la route nationale N°11 à la commune de Messalmoun (W. Tipaza). Il est constitué d'un tablier de 22m de longueur et de 8,15m de largeur, ce tablier comporte deux voies de circulation. Les résultats d'évaluation de la probabilité d'endommagement de ce pont en utilisant le programme de la méthode de «Kubo-Katayama » sont illustrés dans le tableau suivant.



Figure 4.14 : Pont Ikhouba (Messalmoun - Tipaza).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Mou (Soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Arc ou Portique Rigide	1,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	8,50m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Maçonnerie	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	Pas d'assise (0 cm) (No seat)	1,10
Type d'Appuis	Autres (Pas d'appuis, etc.)	1,10
	IV	7,20
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.9: Résultats de l'application de l'exemple 04 (W.Tipaza).

e. Exemple 05 : Pont Meurad (Hadjout - Tipaza)

Cet ouvrage situé dans la commune de Hadjout (W.Tipaza) est un pont à poutres. Il comporte une seule travée, sa longueur est de 25m et sa largeur est égale à la moitié de sa longueur. Il a été construit en 2005, son tablier qui comporte deux voies de circulation s'appuie à ses deux extrémités sur deux culées enterrées en béton armé. L'application de cette méthode japonaise sur cet ouvrage nous a donnée les résultats suivants.



Figure 4.15 : Pont Meurad (Hadjout - Tipaza).

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2,10
Type de Sol	Sol Mou (Soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	$0 < PL < 15$	1,50
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	6 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	45 cm	1,20
Type d'Appuis	Avec un Appareillage Spécifique	0,60
	lv	19,29
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.10: Résultats de l'application de l'exemple 05 (W.Tipaza).

Le nombre total des ponts ciblés par notre étude dans la wilaya de Tipaza est de 61 ponts, nous avons appliqué la méthode de «Kubo-Katayama » sur ce nombre d'ouvrages et nous avons obtenu les résultats suivants (voir Figure 4.16) :

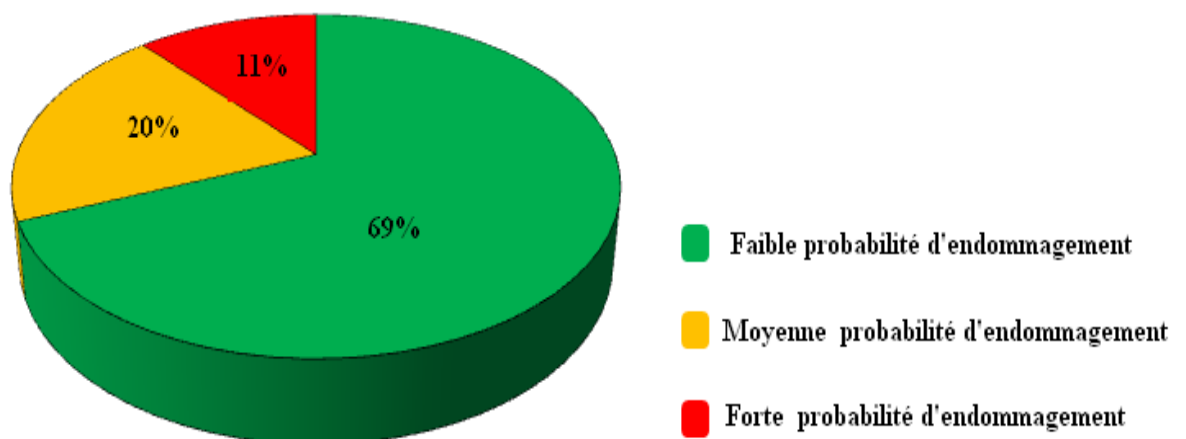


Figure 4.16 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya de Tipaza par la méthode de «Kubo-Katayama ».

Nous constatons que :

- 69% des ponts sont à faible probabilité d'endommagement.
- 20% sont à moyenne probabilité d'endommagement.
- 11% sont à forte probabilité d'endommagement.

4.4. Méthode Modifiée :

Après la mise en œuvre numérique de la méthode modifiée nous avons rajouté les deux paramètres présentés au chapitre 3 dans le programme Delphi développé précédemment et nous avons abouti à la version suivante du programme.

4.4.1. Présentation de programme modifié :

Le programme nommé « Vulnerability Index Program for Bridges », V.I.P.B, est développé pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des ponts. Ce programme regroupe les mêmes procédures que le programme développé pour la méthode de «Kubo-Katayama », sauf qu'il prend en compte les modifications apportées à celle-ci.

Le mode de fonctionnement et l'interface de ce logiciel sont semblables au premier sauf que nous avons ajouté à la page des paramètres de calcul des deux paramètres rajoutées à cette méthode.

La page d'accueil et la page des paramètres de calcul sont illustrées dans les figures suivantes :

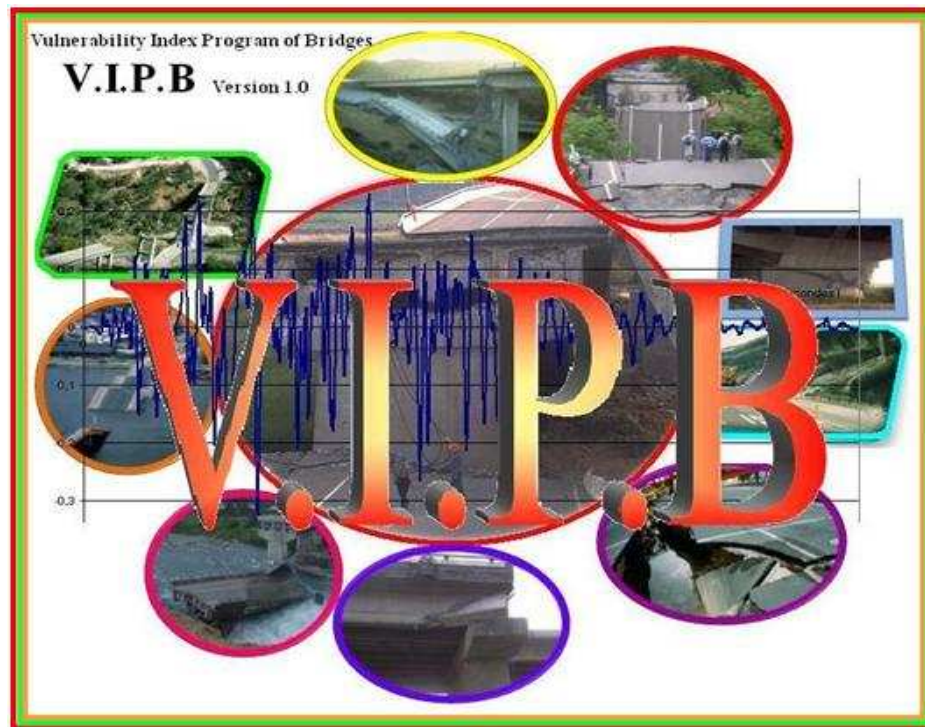


Figure 4.17 : Présentation de page d'accueil du programme VIPB.

Figure 4.18 : Présentation de la page des paramètres de calcul.

L'organigramme suivant regroupe les principaux composants de notre programme « V.I.P.B » :

Après cette brève présentation du programme V.I.P.B développé dans le cadre de notre étude nous allons présentés quelques exemples d'application de ce dernier.

4.4.2. Exemples d'application :

Afin d'effectuer des applications de notre programme, nous sommes sortis sur site et nous avons remplis les fiches techniques d'évaluation des quelques ouvrages d'art situés à différents endroits de la wilaya de Tipaza (Algérie).

Cinq exemples sont présentés dans ce qui suit :

a. Exemple 01: Pont Boukadir (Menaceur – Tipaza)

Ce pont illustré dans la figure 4.19, construit en 1993 est situé dans la commune de Menaceur (Tipaza) sur la route nationale N°66 . Il enjambe oued Boukadir et comporte une travée. La longueur totale du tablier est de 20,40 mètres et sa largeur est de 9,50 mètres. L'ouvrage est caractérisé par une forte courbure horizontale et une légère courbure verticale. Le tablier offre le passage de deux voies de circulation. Les données nécessaires pour l'estimation de degré d'endommagement de ce pont, sont remplies dans la fiche technique suivante.



Figure 4.20 : Pont Boukadir (Menaceur – Tipaza).

- Remplissage de la fiche technique :

Date : 05/01/2008

1. Données générales :

Code Principal : 42042

Nom du Pont : Boukadir

Année de Construction : 1993

Nom de la Commune où se trouve le pont : Menaceur

Nom de la Wilaya : Tipaza

Nom de la Route : R.N.66

Eléments le traversant :

- 1- Route
 2- Oued
 3- Chemin de fer
 4- Autre

Non de l'élément : Boukadir

Nombre de voies (Total) : 02

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) : 9,50m

Longueur du Pont (m) : 20,40m

3. Caractéristiques sismique :

Intensité sismique : I = IX

- 1- MMI < IX
 2- IX ≤ MMI < X
 3- X ≤ MMI < XI
 4- XI ≤ MMI < XII
 5- XII ≤ MMI

4. Caractéristiques du sol :

Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

PL= 0

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec $0 < PL < 15$
 3- Sol avec $PL \geq 15$

5. Caractéristiques structurales

Type de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 3- Poutre Continue

Nombre de Travées :

N= 1

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) : Matériau de la culée / Pile :

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 4- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) :

- 1- Supérieure à 70cm
 2- Inférieure à 70cm
 3- Pas d'assise (0 cm)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention :

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique :

- 1- OUI
 2- NON

- Résultat du calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple à donner les résultats regroupés dans le tableau (4.11) :

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$IX \leq MMI < X$	2,10
Type de Sol	Sol mou (soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	8 m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Typologie de la pile	Pas de piles	1,36
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	50cm	1,20
Type d'Appuis	Avec appareillage spécifique	0,60
	Iv	16,61
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.11 : Résultats de l'application de l'exemple 01.

b. Exemple 02: Pont Mazafran (Douaouda– Tipaza)

L'ouvrage est le pont de Mazafran (Figure 4.20) situé dans la commune de Douaouda, à l'Est de la wilaya de Tipaza, il franchit oued Mazafran. Ce pont se compose de six travées et son tablier regroupe deux voies de circulation, sa longueur est de 95,50m et sa largeur est de 12m. La fiche technique remplis durant l'expertise de ce pont est donné ci-après.



Figure 4.21 : Pont Mazafran (Douaouda– Tipaza).

- Remplissage de la fiche technique :

Date : 10/01/2008

1. Données générales :

Code Principal : 42031

Nom du Pont : Mazafran

Année de Construction : Non connue

Nom de la Commune où se trouve le pont : Douaouda

Nom de la Wilaya : Tipaza

Nom de la Route : R.N.11

Éléments le traversant :

- 1- Route
- 2- Oued
- 3- Chemin de fer
- 4- Autre

Non de l'élément : Mazafran

Nombre de voies (Total) : 02

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) : 12m

Longueur du Pont (m) : 95,50m

3. Caractéristiques sismique :Intensité sismique :

- 1- MMI < IX
 2- IX ≤ MMI < X
 3- X ≤ MMI < XI
 4- XI ≤ MMI < XII
 5- XII ≤ MMI

4. Caractéristiques du sol :Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec 0 < PL < 15
 3- Sol avec PL ≥ 15

5. Caractéristiques structuralesType de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 3- Poutre Continue

Nombre de Travées :

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) :

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

Matériau de la culée / Pile :

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 3- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) :

- 1- Supérieure à 70cm
 2- Inférieure à 70cm
 3- Pas d'assise (0 cm)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique

- 1- OUI
 2- NON

- Résultat du calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.12) :

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$IX \leq MMI < X$	2,10
Type de Sol	Sol très mou (very soft)	1,80
Potentiel de Liquéfaction	6	1,50
Type de Poutre	Poutre Continue	2,00
Nombre de Travées	6 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	5,50m	1,35
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Typologie de la pile	Piles colonnes	0,84
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	30cm	1,20
Type d'Appuis	Autres (pas d'appui, etc)	1,10
	Iv	39,50
	Evaluation	Moyenne probabilité d'endommagement

Tableau 4.12 : Résultats de l'application de l'exemple 02.

c. Exemple 03: Pont Damous (Damous – Tipaza)

L'exemple montré dans la figure suivante est un pont de longueur de 280m et d'une largeur égale a 15,50m, il contient neuf travées, son tablier possède trois voies de circulation. Il est supporté par huit piles en fut massif. Ce pont situé à l'ouest de la wilaya de Tipaza (commune de Damous) dans la route nationale N°11, enjambe oued Damous a été construit en 1987. Sa fiche technique est donnée ci-après.



Figure 4.22 : Pont Damous (Damous – Tipaza).

- Remplissage de la fiche technique :

Date : 20/01/2008

1. Données générales :

Code Principal : 42001

Nom du Pont : Damous

Année de Construction : 1987

Nom de la Commune où se trouve le pont : Damous

Nom de la Wilaya : Tipaza

Nom de la Route : R.N.11

Éléments le traversant :

- 1- Route
 2- Oued
 3- Chemin de fer
 4- Autre

Non de l'élément : Damous

Nombre de voies (Total) : 03

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) : 13,50m

Longueur du Pont (m) : 280m

3. Caractéristiques sismique :Intensité sismique :

- 1- $MMI < IX$
 2- $IX \leq MMI < X$
 3- $X \leq MMI < XI$
 4- $XI \leq MMI < XII$
 5- $XII \leq MMI$

4. Caractéristiques du sol :Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec $0 < PL < 15$
 3- Sol avec $PL \geq 15$

5. Caractéristiques structuralesType de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 3- Poutre Continue

Nombre de Travées :

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) : Matériau de la culée / Pile :

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 3- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) :

- 1- Supérieure à 70cm
 2- Inférieure à 70cm
 3- Pas d'assise (0 cm)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention :

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique :

- 1- OUI
 2- NON

- Résultat du calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.13) :

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$IX \leq MMI < X$	2,10
Type de Sol	Sol mou (soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	9 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	17 m	1,70
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Typologie de la pile	Fut massif	0,80
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	60cm	1,20
Type d'Appuis	Avec appareillage spécifique	0,60
	lv	21,53
	Evaluation	Moyenne probabilité d'endommagement

Tableau 4.13 : Résultats de l'application de l'exemple 03.

d. Exemple 04: Pont Piste agricole (Fouka – Tipaza)

Cet exemple traite d'un pont cadre construit en béton armé, situé sur la voie express Bousmail – Alger, et enjambe une piste agricole. La longueur de ce pont est égale à 14m et sa largeur est de 22m. Son tablier comporte quatre voies de circulation. Après avoir expertisé cet ouvrage nous avons remplis la fiche technique suivante.



Figure 4.23 : Pont Piste Agricole (Fouka– Tipaza).

- Remplissage de la fiche technique :

Date : 22/01/2008

1. Données générales :

Code Principal : 42057

Nom du Pont : Piste Agricole

Année de Construction : 2006

Nom de la Commune où se trouve le pont : Fouka

Nom de la Wilaya : Tipaza

Nom de la Route : V/Exp

Éléments le traversant :

- 3- Route
- 4- Oued
- 5- Chemin de fer
- 10-Autre

Non de l'élément : Piste Agricole

Nombre de voies (Total) : 04

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) : 22 m

Longueur du Pont (m) : 14 m

3. Caractéristiques sismique :Intensité sismique :

- 1- $MMI < IX$
 2- $IX \leq MMI < X$
 3- $X \leq MMI < XI$
 4- $XI \leq MMI < XII$
 5- $XII \leq MMI$

4. Caractéristiques du sol :Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec $0 < PL < 15$
 3- Sol avec $PL \geq 15$

5. Caractéristiques structuralesType de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 6- Poutre Continue

Nombre de Travées :

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) :

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

Matériau de la culée / Pile :

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc.)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 3- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) :

- 1- Supérieure à 70cm
 2- Inférieure à 70cm
 3- Pas d'assise (0 cm)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique

- 1- OUI
 2- NON

- Résultat du calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.14) :

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$IX \leq MMI < X$	2,10
Type de Sol	Sol mou (very soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Arc ou Portique Rigide	1,00
Nombre de Travées	1 travée	1,00
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	2,50 m	1,00
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Etendue	1,00
Typologie de la pile	Pas de piles	1,36
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	0cm	1,10
Type d'Appuis	Autres (Pas d'appuis, etc.)	1,10
	Iv	6,89
	Evaluation	Faible probabilité d'endommagement

Tableau 4.14 : Résultats de l'application de l'exemple 04.

e. Exemple 05: Pont Mazoum (Gouraya – Tipaza)

Dans cet exemple, nous avons étudié le pont situé sur la route nationale N° 11 à la commune de Gouraya (W.Tipaza), et qui franchit oued Mazoum, ce pont comporte trois travées, son tablier qui mesure 103,5m de longueur et 10m de largeur s'appuie sur deux culées fondées superficiellement en tête de déblai et deux piles colonnes en béton armé. Les données relevées au cours de l'expertise de ce dernier sont indiquées dans la fiche suivante.



Figure 4.24: Pont Mazoum (Gouraya – Tipaza).

- Remplissage de la fiche technique :

Date : 20/01/2008

1. Données générales :

Code Principal : 42009

Nom du Pont : Mazoum

Année de Construction : 1999

Nom de la Commune où se trouve le pont : Gouraya

Nom de la Wilaya : Tipaza

Nom de la Route : R.N.11

Eléments le traversant :

- 1- Route
 2- Oued
 3- Chemin de fer
 4- Autre

Non de l'élément : Mazoum

Nombre de voies (Total) : 02

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) : 10 m

Longueur du Pont (m) : 103,50m

3. Caractéristiques sismique :

Intensité sismique :

- 1- $MMI < IX$
 2- $IX \leq MMI < X$
 3- $X \leq MMI < XI$
 4- $XI \leq MMI < XII$
 5- $XII \leq MMI$

4. Caractéristiques du sol :Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

PL= 0

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec $0 < PL < 15$
 3- Sol avec $PL \geq 15$

5. Caractéristiques structuralesType de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 3- Poutre Continue

Nombre de Travées :

N= 3

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) : $H_{max} = 11m$ Matériau de la culée / Pile :

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc.)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 3- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) : $B_{min} = 60cm$

- 1- Supérieure à 70cm
 2- Inférieure à 70cm
 3- Pas d'assise (0 cm)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention :

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique :

- 1- OUI
 2- NON

- Résultat du calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.15) :

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Intensité sismique	$IX \leq MMI < X$	2,10
Type de Sol	Sol mou (very soft)	1,50
Potentiel de Liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
Type de Poutre	Poutre Simple	3,00
Nombre de Travées	3 travées	1,75
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	11 m	1,70
Matériau de la culée / Pile	Béton Armé	1,40
Type de Fondation	Autre Pieu	1,00
Typologie de la pile	Piles Colonnes	0,84
Courbure du pont	Pas de courbure	0,95
Largeur Minimale du Support du Pont (cm)	60cm	1,20
Type d'Appuis	Avec appareillage spécifique	0,60
	Iv	22,61
	Evaluation	Moyenne probabilité d'endommagement

Tableau 4.15 : Résultats de l'application de l'exemple 05.

Les résultats obtenus après l'estimation des 61 ponts étudiés dans la wilaya de Tipaza suivant la méthode modifiée sont synthétisés ci dessous (voir Figure 4.24):

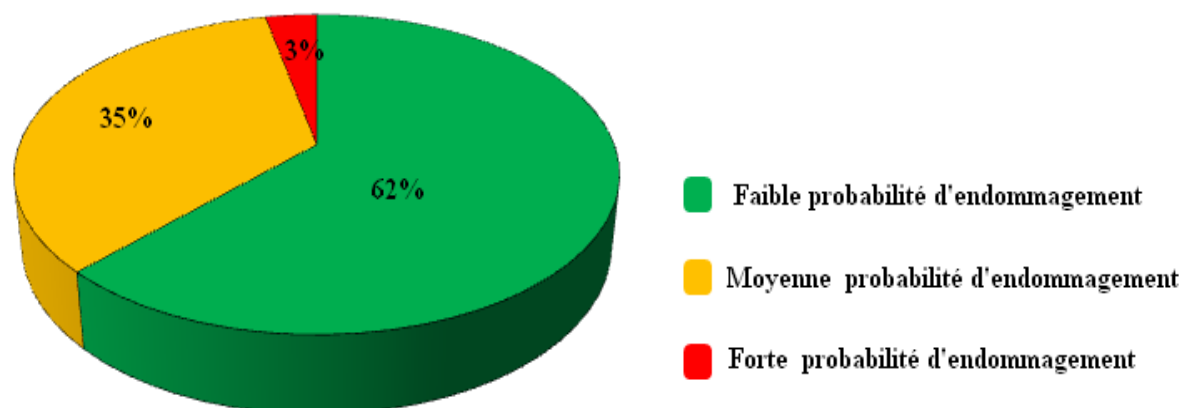


Figure 4.25 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya de Tipaza par la méthode modifiée.

Il en ressort que :

- 62% des ponts sont à faible probabilité d'endommagement.
- 35% sont à moyenne probabilité d'endommagement.
- 3% sont à forte probabilité d'endommagement.

4.5. Conclusion :

Un programme de calcul permettant l'estimation de la probabilité d'endommagement des ouvrages d'art sous action sismique a été élaboré. Ce dernier permet de calculer l'indice de vulnérabilité des ponts selon la méthode de « Kubo-Katayama ».

Afin de prendre en compte des modifications apportées à la méthode de « Kubo-Katayama », un programme a été développé et dénommé « Vulnerability Index Program for Bridges », (V.I.P.B).

Le « V.I.P.B » est un utilitaire simple et efficace, permet l'estimation de la probabilité d'endommagements des ponts de manière rapide et efficace.

Afin d'estimer la vulnérabilité des ponts par ce programme développé une fiche d'expertise sera remplie lors d'une enquête sur site, cette fiche regroupe tous les renseignements nécessaires pour cette évaluation.

Après la comparaison entre les résultats obtenus des applications faites sur les ponts de la wilaya de Tipaza suivant les deux méthodes, nous avons remarqué que le pourcentage des ponts à moyenne probabilité d'endommagement obtenu par l'application de la méthode modifiée est supérieur à celui obtenu dans l'ancienne méthode, avec un écart de 15% entre eux. Par contre le pourcentage des ponts à faible et à forte probabilité d'endommagement est inférieur, il est de 7 et 8% respectivement.

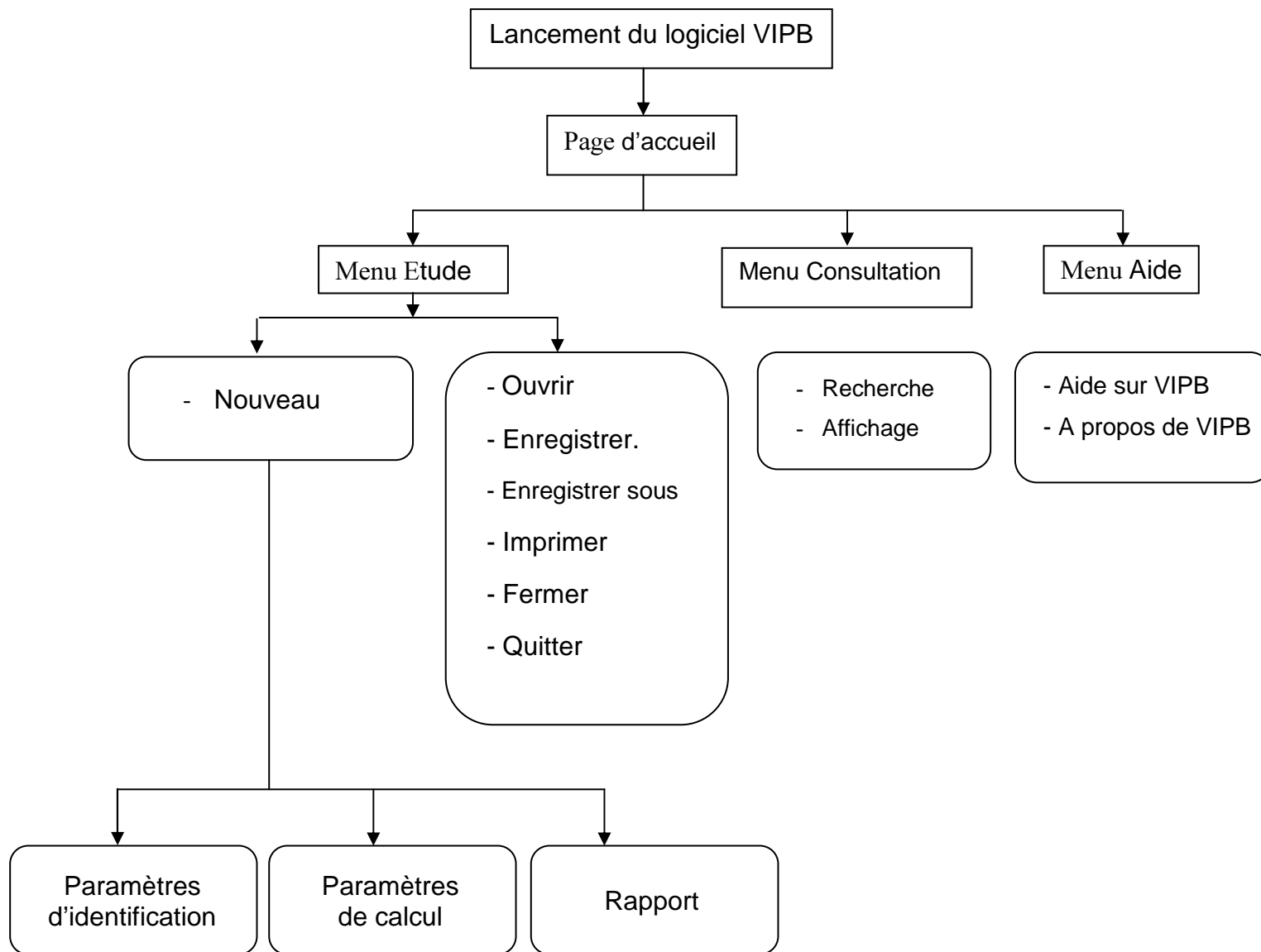


Figure 4.19 : Organigramme des composants du logiciel VIP.

CONCLUSION

Les ponts sont des ouvrages d'art dont la conception, l'étude et la réalisation nécessitent du temps et de l'argent. Aussi leurs pérennité doit être assurées étant donné leur rôle dans la vie économique et leur coût. Cette pérennité est sans cesse remise en question vue les conditions du trafic et les aléas naturels. Parmi ces aléas le séisme est l'un des plus destructeurs. Afin de se prévenir de ses effets néfastes, des études de vulnérabilité doivent être menées.

L'étude de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art existants est un sujet complexe car faisant intervenir plusieurs phénomènes difficiles à appréhender (comportement des ponts sous action sismique, effet de la liquéfaction, effet de l'interaction sol-structure ect.). Aussi ces études ont données lieu à plusieurs méthodes dont le degré de sophistication est variable selon les moyens dont on dispose.

Parmi ces méthodes, la méthode de « Kubo-Katayama » est l'une des plus efficace dans le sens où elle allie des paramètres de nature qualitative et d'autre de nature quantitative tout en se basant sur des études statistiques résultant du retour d'expérience sismique.

Cette méthode a été mise en œuvre sous langage Delphi. Des modifications y ont été apportées. Les deux versions de la méthode ont été mise sous un programme appelé V.I.P.B (Vulnerability Index Program for Bridges).

Ce programme permet la détermination d'un indice de vulnérabilité d'un pont et la classification de ce pont en fonction de la valeur trouvée pour cet indice. A cet effet, une fiche technique a été développée. Cette fiche regroupe l'ensemble des données nécessaires au calcul de l'indice de vulnérabilité.

Des exemples de ponts de la wilaya d'Alger et de la wilaya de Tipaza ont été traités. Ceci nous a permis de comparer les deux approches et de valider l'application de la méthode.

L'étude effectuée ne saurait s'arrêter là vue les multiples questions qui restent poser. Surtout en ce qui concerne les paramètres rajoutés et leurs coefficients de pondération, une étude numérique plus approfondie serait nécessaire. De même en ce qui concerne les fonctions de vulnérabilité ou de fragilité qu'il faudrait développer. Ce sont autant d'axe de recherches qu'il faudra entreprendre. Néanmoins ce travail constitue la première pierre qui permettra le lancement de ce projet.

ANNEXE 1

METHODES D'ESTIMATION DE LA VULNERABILITE DES PONTS

1. Méthode du "IQOA" :

1.1. Organigrammes de la méthode "IQOA" :

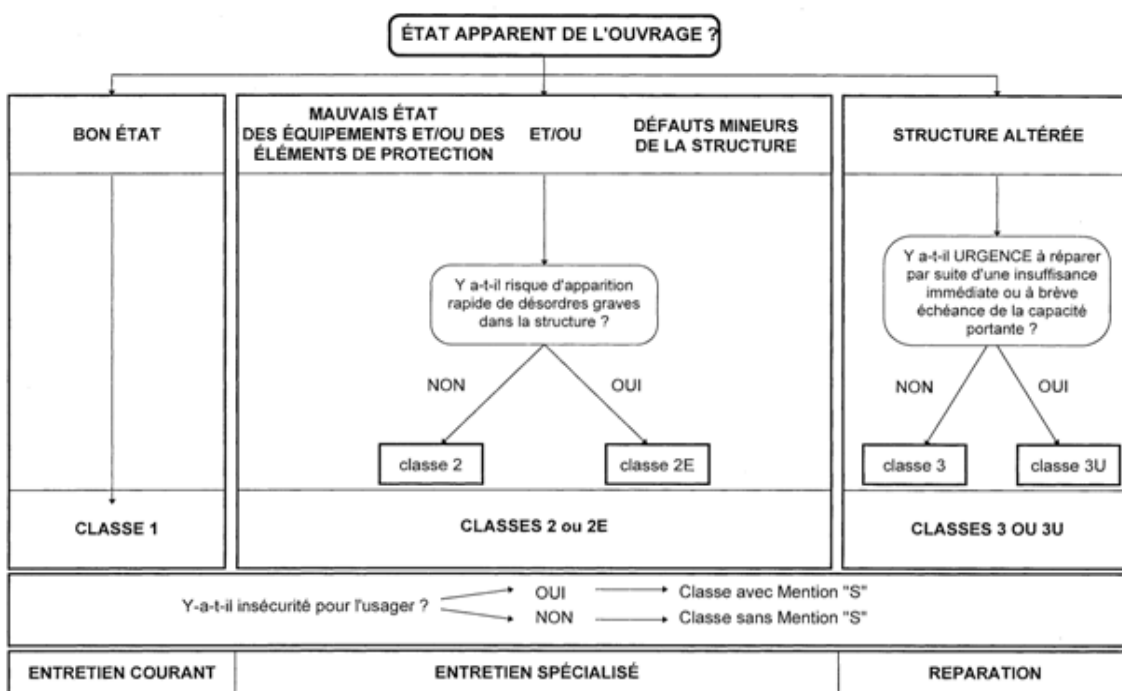


Figure1: Organigramme d'évaluation de l'état des ponts par la méthode « IQOA » [23].

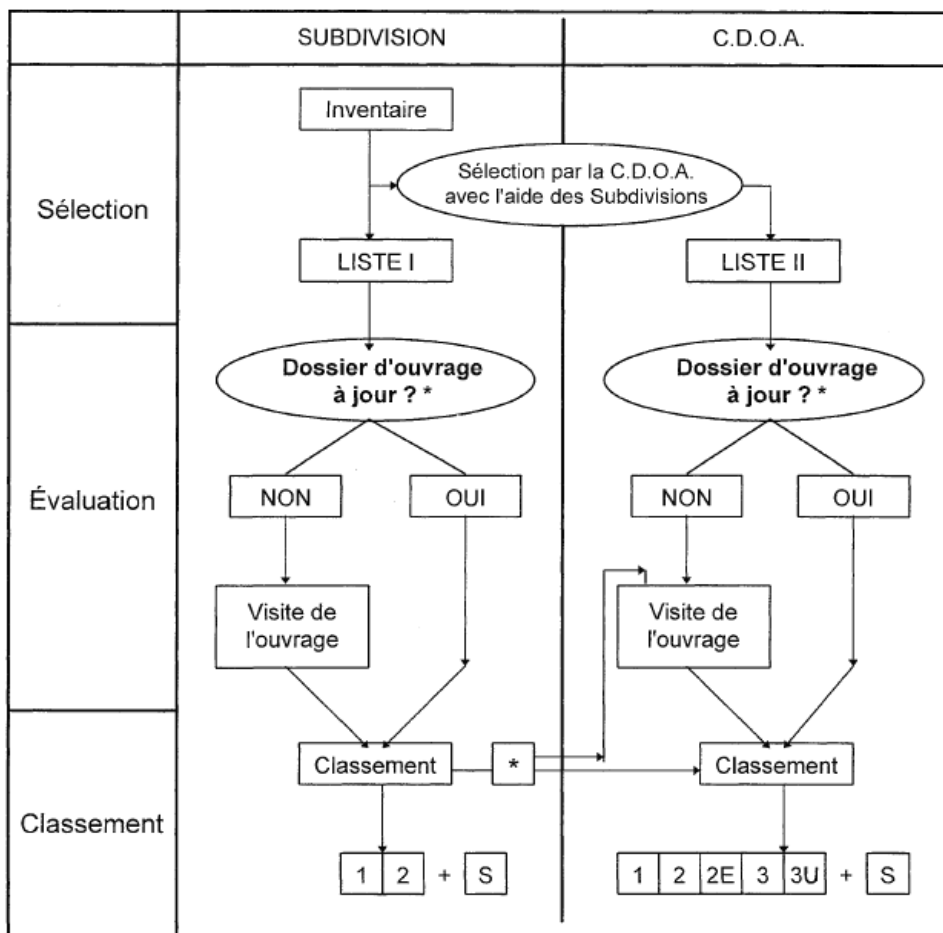


Figure 2 : Organigramme des tâches en D.D.E [23].

1.2. Fiche de synthèse

Toutes les fiches de synthèse comprennent :

- Une première page descriptive identifiant l'ouvrage, et donnant certaines caractéristiques fonctionnelles ou historiques pouvant avoir une influence sur l'état de l'ouvrage, ainsi que des indications sur les conditions de visite, enfin la classe de synthèse attribuée par le responsable de l'évaluation finale.
- Une deuxième page détaillant l'évaluation des équipements et du tablier, y compris les appareils d'appuis et les éléments de protection, sur laquelle est reportée l'évaluation des appuis faite par ailleurs pour aboutir à la note de synthèse de l'ouvrage. Suivant les cas et sauf pour les ouvrages monolithiques dont les appuis font partie intégrante de la structure.
- Une troisième page détaillant l'évaluation des culées et de leurs fondations,
- Une quatrième page détaillant l'évaluation des piles et de leurs fondations.

2. Méthode du "MTQ" :

L'IVS dans cette méthode est donné par l'expression suivante :

$$IVS = 100 - \left[RS \times FF \times FA \times \sum_{i=1}^{i=8} \omega_i \times C_i \right]$$

RS : Facteur de risque sismique qui dépend de l'aléa sismique régional déterminé par le CNBC 2005 exprimé en termes de niveau de sismicité défini selon les critères du FEMA 310 (ASCE, 1998) et décrit au Tableau suivant :

$Sa_{1,0}$	$Sa_{0,2}$	NIVEAU DE SISMICITÉ
> 0,200 g	> 0,500 g	Élevé
0,067 g à 0,200 g	0,167 g à 0,500 g	Modéré
< 0,067 g	< 0,167 g	Faible

Tableau 1 : Critères d'identification du niveau de sismicité (ASCE 1998) [21].

FF : Facteur de fondation qui s'appuie sur la catégorisation sismique des sites du CNBC 2005 décrite au Tableau I allant de roc sain (classe A) à un sol mou (classe E). Pour un sol de classe F, pour lequel une étude géotechnique spéciale est nécessaire, un avis de risque géotechnique doit être émis à la place d'un calcul de l'indice IVS.

DESCRIPTION GÉOTECHNIQUE DU SOL AU SITE	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SOL AU SITE	CLASSIFICATION DU SITE
A	<i>Roc sain</i>	$\bar{V}_s -30 > 1\ 500\ m/s$
B	<i>Roc</i>	$760\ m/s < \bar{V}_s -30 < 1\ 500\ m/s$
C	<i>Sol très compact ou roc fracturé</i>	$360\ m/s < \bar{V}_s -30 < 760\ m/s$ ou $\bar{N}I -30 > 50$ ou $\bar{S} u-30 > 100\ kPa$
D	<i>Sol raide</i>	$180\ m/s < \bar{V}_s -30 < 360\ m/s$ ou $15 < \bar{N}I -30 < 50$ ou $50 < \bar{S} u-30 < 100\ kPa$
E	<i>Sol argileux ou argile molle</i>	$\bar{V}_s -30 < 180\ m/s$ ou $I_p > 20, w > 40\%$ et $\bar{S} u-30 < 25\ kPa$
F	Sites nécessitant une analyse géotechnique particulière :	
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sols vulnérables à la rupture ou à l'effondrement sous chargement sismique 2. Tourbe ou argile très organique d'une épaisseur supérieure à 3 mètres 3. Argile très plastique d'une épaisseur supérieure à 8 mètres et $I_p > 75$ 4. Dépôt très épais (supérieur à 36 mètres) d'argile molle à moyennement raide 	

Tableau 2 : Catégorisation sismique des emplacements (CNBC, 2005) [21].

FA : Facteur d'âge qui prend en considération la date de la construction de l'ouvrage.

C_i : Coefficient d'influence sismique qui tient compte de la vulnérabilité des éléments structuraux et non structuraux décrits au Tableau ci dessous.

Types de caractéristiques	Description
Générales	Type de pont selon le matériau (bois, acier, béton) et la configuration structurale (portique, poutres, à béquilles, poutres-caissons, etc..) et selon la classification du MTQ (MTQ 2007a).
	Présence de services publics (aucun, éclairage, électricité, gaz naturel, aqueduc, etc...).
Reliées au tablier	Présence de discontinuités structurales
	Présence d'un biais entre les axes principaux du pont et les axes des appuis.
	Rigidité du tablier (reliée au nombre de poutres ou à la présence d'une dalle).
Reliées au système d'appui	Complexité structurale (pont avec ou sans piles à hauteur variable)
	Type de pile : à colonne unique, à colonnes multiples, banc, fût ou caisson
	Type d'appareil d'appui (appui à pendule ou autres)

Tableau 3 : Caractéristiques générales des ponts et viaducs servant à l'évaluation de la vulnérabilité sismique. [21]

ω_i : Coefficient qui représente la pondération de chaque élément (i).

3. Méthode "SISMOA" :

3.1. L'outil informatique "SISMOA" :

Comme il est noté précédemment le logiciel SISMOA se présente sous la forme d'une feuille Excel sophistiquée. ce logiciel permet une évaluation qualitative de la vulnérabilité des différents éléments structurels de l'ouvrage (tablier, culées, piles, fondations). La combinaison de ces indices de vulnérabilité spécifiques conduit au calcul de l'indice de vulnérabilité global, compris entre 0 et 1. On a ainsi :

- Pour un pont courant :

$$V = V_{\text{général}} \times \max (V_{\text{tablier}} ; V_{\text{culées}} ; V_{\text{piles}} ; V_{\text{fondations}})$$

- Pour un pont en maçonnerie :

$$V = V_{\text{général}} \times V_{\text{rsc}}$$

Car l'indice de vulnérabilité générale $V_{\text{général}}$ est une combinaison de trois facteurs d'influence à l'échelle globale de l'ouvrage :

- La date de construction de l'ouvrage (ou méthode de conception utilisée).
- Le type de structure (cadre ou portique, travées continues, travées indépendantes, maçonnerie).
- L'état de l'ouvrage (ou classe IQOA).

Les paragraphes suivants traitent les deux cas d'ouvrages :

a. Cas des voûtes en maçonnerie :

La vulnérabilité des voûtes en maçonnerie V_{rsc} est directement liée à la hauteur h_g du tympan au niveau de son centre de gravité. Cette hauteur est calculée à partir des épaisseurs h_1 et h_2 du tablier respectivement à la naissance des voûtes et à la clé (Figure 3).

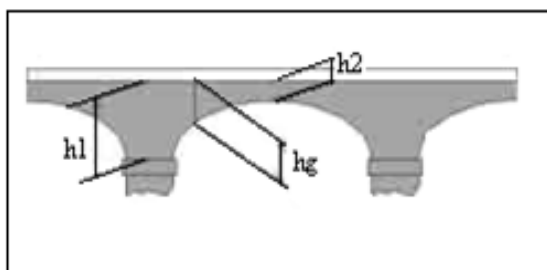


Figure 3 : Vulnérabilité des voûtes en maçonnerie [22].

b. Cas des ponts courants :

b.1. Vulnérabilité du tablier :

La vulnérabilité du tablier V_{tablier} est calculée en intégrant un grand nombre de paramètres tels que :

- Le biais et la courbure en plan de l'ouvrage ;
- Les risques d'échappement d'appui au droit de chaque appui selon les directions longitudinale et transversale (la notion de repos d'appui, illustrée fig. 6, caractérise ce risque) ;
- La présence ou non de butées transversales ;
- L'éventuelle dissymétrie des appuis en élévation ;

- La sensibilité à une éventuelle rupture des appareils d'appui (fonction de la rigidité du tablier) [22].

b.2. Vulnérabilité des culées :

La vulnérabilité des culées $V_{culées}$ est liée d'une part à la hauteur du remblai et d'autre part à la typologie propre de la culée. Par ordre de vulnérabilité croissante, on distingue les culées fondées superficiellement en tête de déblai, les culées enterrées et les culées remblayées. Suite aux différents retours d'expérience des premières utilisations de SISMOA, le cas des culées creuses a été rajouté, de même que des éléments permettant de prendre en compte la vulnérabilité des éléments latéraux. Pour le cas des culées remblayées, une distinction plus fine a été apportée selon la typologie des murs de front ("murs poids", voiles en béton armé ou murs en "terre armée") [22].

b.3. Vulnérabilité des piles :

Le calcul de la vulnérabilité des piles V_{piles} s'effectue selon les directions longitudinale et transversale. Il tient compte de la participation de chacune des piles à la reprise des efforts horizontaux en fonction de la régularité des hauteurs (notion de pile courte) et de la liaison entre la pile considérée et le tablier (liaison fixe, élastique ou glissante). La typologie (fût massif, pile caisson, voile, pile à colonnes multiples ou pile-marteau) et la masse du tablier sont aussi prises en considération [22].

b.4. Vulnérabilité des fondations

La vulnérabilité des fondations $V_{fondations}$ est évaluée en fonction du type de fondations (superficielles, semi-superficielles ou profondes) et des risques de liquéfaction et de glissement de terrain. En cas d'incertitude, le logiciel préconise d'avoir recours à une expertise géologique.

3.2. Premières utilisations de l'outil "SISMOA" :

A ce jour, l'outil "SISMOA" a été utilisé sur quatre régions différentes, particulièrement exposées au risque sismique :

- L'itinéraire Nice-Digne en région PACA pour lequel la méthode a été validée par des études détaillées sur un échantillon représentatif de huit ouvrages de l'itinéraire ;
- Le département de la Martinique pour lequel deux ouvrages stratégiques ont fait l'objet d'études détaillées;
- Le territoire de l'agglomération grenobloise;
- La Vallée de la Tinée dans le département des Alpes- Maritimes.

Ces applications ont permis de montrer la pertinence et l'efficacité de l'outil logiciel mais la méthode reste insuffisante pour prédire avec précision le niveau d'endommagement que subirait un ouvrage donné au cours d'un séisme. Ainsi, l'indice de présomption de risque sismique n'a de sens que statistiquement.

Les retours d'expérience sur les itinéraires traités sont en cours d'analyse en vue d'un re-calibrage visant à affiner l'influence relative de certains paramètres par rapport aux autres.

Des critères de vulnérabilité ou de solidité supplémentaires ont aussi été identifiés et ont été introduits dans la procédure, la rendant ainsi plus exhaustive. Sur le plan de l'ergonomie, une saisie des données rendue plus explicite devrait d'autre part faciliter l'accessibilité de l'outil à des utilisateurs non-spécialistes [22].

3.3. Perspectives de développement de "SISMOA" :

Cette méthode à plusieurs perspectives de développement desquelles on a :

- L'introduction du critère d'importance qui constitue jusqu'à maintenant un objectif majeur de perfectionnement. Il s'agit en effet d'un paramètre essentiel, indispensable pour fournir aux préfets et aux maîtres d'ouvrages des éléments précis et objectifs en vue de l'établissement des plans de Prévention des Risques et de la définition des itinéraires stratégiques. Ce critère d'importance devra être basé sur des paramètres tels que le trafic moyen supporté par l'ouvrage, le rattachement de celui-ci à des centres vitaux (hôpitaux, casernes de pompiers, commissariats de police, aéroports...), les possibilités ou non d'établir une déviation ou encore le rôle de l'ouvrage dans l'approvisionnement et la desserte des zones les plus urbanisées.

- La méthode SISMOA devra évoluer de la "simple" évaluation de la vulnérabilité des ponts à celle, plus générale, de la vulnérabilité des réseaux. Cette évolution sous-entend non seulement d'élaborer une procédure d'évaluation d'autres types d'ouvrages tels que les murs de soutènement et les tunnels mais implique aussi une réflexion à une échelle plus importante intégrant la présence d'équipements stratégiques, une ébauche d'organisation et d'utilisation des moyens en cas de crise et une analyse plus fine de la topographie du site (liquéfaction à grande échelle, glissements de terrain, instabilités de pentes...) [22].
- Sur la base des indices de vulnérabilité calculés pour chaque élément structurel de l'ouvrage, il est possible de prévoir à l'avenir une évaluation sommaire du coût des travaux de renforcement et de proposer des mesures de confortement à partir des techniques les plus couramment utilisées dans les pays à fort risque sismique : chemisage des piles, augmentation des repos d'appui, remplacement des appareils d'appui, utilisation d'appareils amortisseurs... [22].
- Actuellement, la définition de l'aléa sismique se limite au zonage réglementaire défini par les PS 92. Il sera intéressant à terme d'introduire des critères concernant l'aléa local et les effets de site (sols de nature à augmenter ou atténuer les ondes sismiques, présence de failles actives...) et de prendre en compte des données sur l'environnement immédiat de l'ouvrage (remblais, murs de soutènement, risque de chutes de blocs...).

ANNEXE 2

BIOGRAPHIE DES DEUX CHERCHEURS

Keizaburo Kubo, ingénieur japonais des séismes, il a travaillé sur le développement de design des ponts résistants au séisme, il a érigé des pipes et d'autres infrastructures civiles. Il a survécu au tremblement de terre de Niigata en 1964 et de San Fernando en 1971. Il est né en 1922 à Tokyo, est diplômé comme ingénieur en génie civil de l'institut impérial de Tokyo en 1945. Il est resté dans cette institution jusqu'à 1983. EN 1946, il a occupé le poste d'enseignant au département de génie civil, puis en 1948 celui de professeur assistant, pour devenir en 1963 professeur à l'institut des sciences industrielles.

En 1983, il a rejoint l'université de Saitama puis l'université de Tokai de 1987 à 1993, il était aussi vice président de l'association internationale de génie sismique (International Association for Earthquake Engineering "IAEE"). Entre 1984 et 1988, il a même organisé la conférence mondiale de génie sismique au Japon en 1988.

Tsuneo Katayama, né à Tokyo en 1939, il a eu son B.E (Bachelor of Education) en 1962 et son M.E (Master of Education) en 1964 à l'université de Tokyo, et il a obtenu son Ph.D (Doctort) à l'université de New South Wales en 1968 en Australie. Il a enseigné à l'université de Chuo comme Professeur Assistant en 1971 et comme Professeur en 1982 à l'Institut des Sciences Industrielles (Institute of Industrial Science "IIS") à l'université de Tokyo. Puis il a devenu secrétaire général à l'association internationale de génie sismique (IAEE) en 1988, et à partir de 1991 il a été directeur du centre de génie et d'atténuation des catastrophes attaché à l'institut des sciences industrielles, spécialisé dans l'atténuation des désastres des séismes au milieu urbain. Il a été même président de l'institut national des recherches des sciences de la terre et la prévention aux catastrophes au Japon.

Actuellement il est président de l'association international de génie sismique (IAEE), et dernièrement il a organisé la 14eme conférence mondiale de génie sismique en octobre 2008 à Beijing (Chine).

ANNEXE 3

MODELISATION ET ANALYSE SISMIQUE

1. Modélisation des ponts :

Dans ce travail, l'analyse des ponts est basée sur la modélisation de ses objets tels que le tablier, les piles et les appuis par la Méthode des Eléments Finis qu'il s'agit d'une technique de calcul numérique qui consiste à discrétiser en sous-ensembles un objet (ou une partie d'un objet) dont on veut étudier certaines de ses propriétés. Ces sous-ensembles sont appelés éléments. Ces derniers sont connectés entre eux par des nœuds. La discrétisation de l'objet se nomme le maillage. Ainsi notre objet est représenté par des fonctions définies sur chaque élément. Ces fonctions locales ont l'avantage d'être plus simple que celles que l'on pourrait éventuellement utiliser pour représenter la totalité de l'objet. Et après une analyse de la réponse mécanique associée à chaque élément en construisant des matrices de rigidité élémentaires et globales qui nous permettes de déterminer les périodes propres, les efforts et les déplacements de l'ouvrage.

Donc sous l'hypothèse d'une analyse dynamique linéaire avec une loi de comportement élastique pour matériaux homogènes et isotropes, le pont a été modélisé par des éléments coques (shell element) et des poutres tridimensionnels (frame element) et des éléments « Link ».

Le tablier du pont a été modélisé avec des éléments de coque mince quadrilatéraux (shell-thin element) à quatre nœuds, qui possède six degrés de liberté chacun.

Tous les éléments unidirectionnels du pont (piles, chevêtres, s'il y a lieu) sont simulés avec l'élément frame a deux nœuds et qui possède six degrés de liberté dans chaque nœud. Les appareils d'appuis sont modélisés par l'élément « Link ».

Les masses ont été modélisées par des masses réparties sur les différents éléments de l'ouvrage, et les caractéristiques des matériaux ont été considérées comme suit :

Module d'élasticité : $E = 3,20 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 = 3,20 \text{ GPa}$

Module de cisaillement : $G = 1,33 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 = 1,33 \text{ GPa}$

Poids volumique : $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$

Coefficient de poisson : $\nu = 0,2$

Calcul de la rigidité "K" de l'appareil d'appui a été fais comme suit:

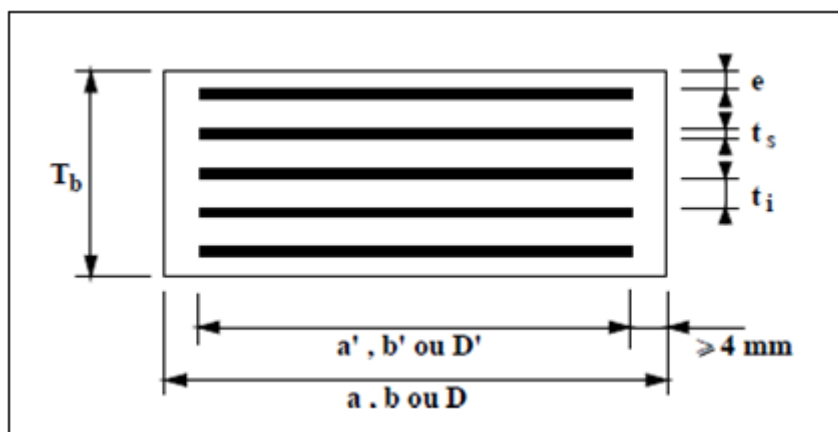


Figure 4 : Définition géométrique d'un appareil d'appui.

En fonction du nombre n de feuilles intermédiaires, on définit épaisseur nominale totale de l'appareil d'appui : $T_b = n (t_i + t_s) + t_s + 2 e$

$$K = \frac{a^2 \times G}{T_b}$$

Avec :

G : Module de cisaillement conventionnel de l'élastomère, $G=1,2 \text{ MPa}$ (Sous les effets dynamiques).

Les appareils d'appuis sont de dimensions: $400 \times 400 \times 6 \text{ mm}$.

Alors :

$$K = \frac{(0,40)^2 \times 1,2 \times 10^3}{0,06} = \frac{3200 \text{ kN}}{\square}$$

Cette modélisation a été effectuée a l'aide de logiciel de calcul des structures SAP2000 V.11 en utilisant le menu « Bridge » de ce dernier, qui nous facilite la tache et qui nous permet de faire une étude réussie.

2. Etude sismique :

Pour une étude sismique des modèles cités précédemment nous avons opté à utiliser l'analyse temporelle qui permette de représenter de manière plus réaliste les efforts par le séisme mais aussi le comportement structural des ouvrage.

Cette dernière étant caractérisée par l'affectation des accélérogrammes mesurés sur site ou générés de manière artificielle. Dans notre cas les accélérogrammes utilisés sont les suivants :

- Accélérogramme du séisme de Boumèrdes qui a frappé la région de Zemmouri le 21 Mai 2003 et dont l'accélérogramme est schématisé ci-dessous.

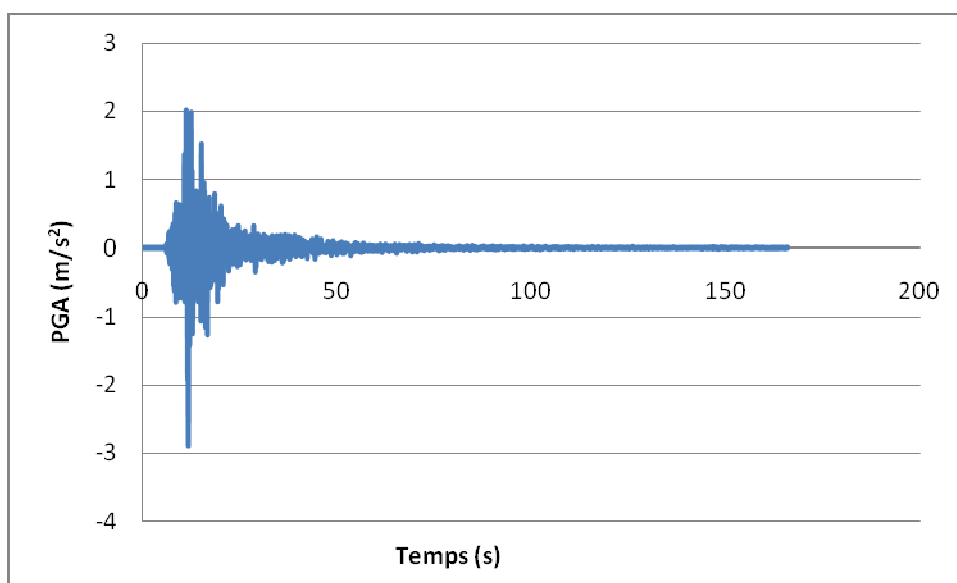


Figure 4 : Accélérogramme du séisme de Boumèrdes (2003).

- Accélérogramme du séisme de Cherchell qu'il a été enregistré durant le séisme de Chenoua le 29 Octobre 1989, indiqué dans la figure suivante.

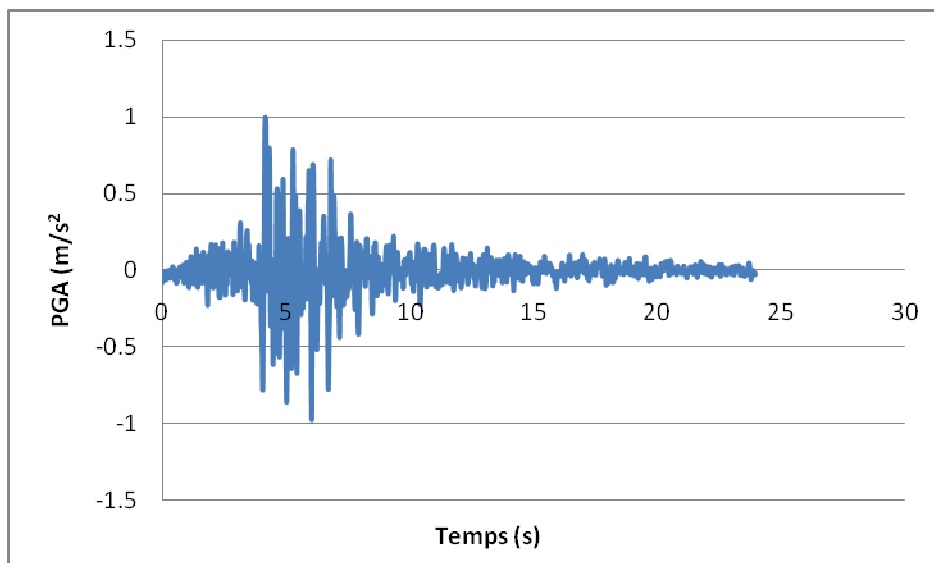


Figure 5 : Accélérogramme du séisme de Cherchell (1989).

- Accélérogramme de séisme d'El Centro en Californie, enregistré le 18 Mai 1940, il est montré par l'accélérogramme suivant.

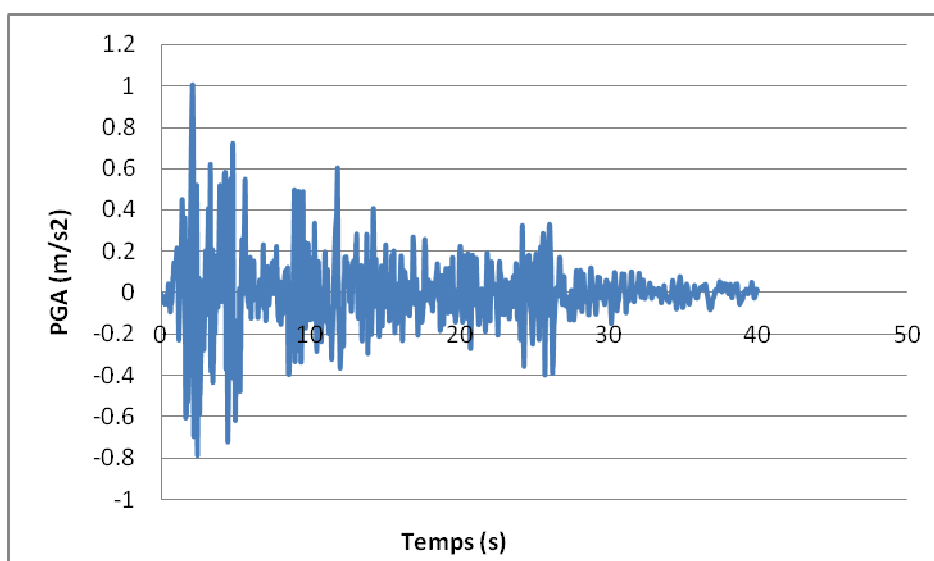


Figure 6 : Accélérogramme de séisme d'El Centro (1940).

Les combinaisons du mouvement sismique utilisées dans notre cas d'étude sont les suivantes [18] :

$$E_1 = E_x + 0,3E_y + 0,3E_z$$

$$E_2 = E_y + 0,3E_x + 0,3E_z$$

$$E_3 = E_z + 0,3E_y + 0,3E_x$$

Tel que : E_x , E_y et E_z sont les actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

ANNEXE 4
FICHE TECHNIQUE DE LA METHODE MODIFIEE

Date :

Enquêteur :

1. Données générales :

Code Principal :

Nom du Pont :

Année de Construction :

Nom de la Commune où se trouve le pont :

Nom de la Wilaya :

Nom de la Route :

Eléments le traversant :

- 1- Route
- 2- Oued
- 3- Chemin de fer
- 4- Autre

Non de l'élément :

Nombre de voies (Total) :

2. Caractéristiques géométriques :

Largeur du Pont (m) :

Longueur du Pont (m) :

3. Caractéristiques sismique :

Intensité sismique : I =

- 1- MMI < IX
- 2- IX ≤ MMI < X
- 3- X ≤ MMI < XI
- 4- XI ≤ MMI < XII
- 5- XII ≤ MMI

4. Caractéristiques du sol :Type de Sol :

- 1- Sol rigide (stiff)
 2- Sol moyen (medium)
 3- Sol mou (soft)
 4- Sol très mou (very soft)

Potentiel de Liquéfaction :

PL=

- 1- Sol non liquéfiable (PL=0)
 2- Sol avec $0 < PL < 15$
 3- Sol avec $PL \geq 15$

5. Caractéristiques structuralesType de Poutre :

- 1- Arc ou Portique Rigide
 2- Poutre Simple
 3- Poutre Continue

Nombre de Travées :

N=

- 1- Une travée
 2- Deux travées ou plus

H/ Maximum de culée / Pile (m) : $H_{max} =$

- 1- Inférieure à 5m
 2- Entre 5 et 10m
 3- Supérieure à 10m

Matériau de la culée / Pile :

- 1- Béton Armé
 2- Acier
 3- Maçonnerie
 4- Autres

Type de Fondation :

- 1- Pieu Battu
 2- Autre Pieu
 3- Etendue

Typologie de la pile :

- 1- Fut massif
 2- Piles colonnes
 3- Autres (Pas de piles, etc.)

Courbure horizontale du tablier :

- 1- Pas de courbure
 2- Légèrement/Moyennement courbé
 3- Fortement courbé

Largeur minimale du support (cm) : $B_{min} =$

- 1- Supérieure à 70cm (wide)
 2- Inférieure à 70cm (Narrow)
 3- Pas d'assise (0 cm)(No seat)

Type d'Appui :

- 1- Avec appareillage spécifique
 2- Appui (avec une bonne conception)
 3- Mobiles
 4- Autres (pas d'appui, etc)

Baisse progressive (diminution) du système de prévention :

- 1- OUI
 2- NON

Présence du système d'isolation sismique ou de résistance sismique :

- 1- OUI
 2- NON

REFERENCES

1. Cathy Franco, Jacques Dayan, « Les ponts », Editions Fleurus Paris, Mars 2009.
2. Jean-Marie Savet, « Les ponts d'hier et d'aujourd'hui », Editions Maé, Juillet 2006.
3. SETRA, « Les ponts. Les ponts en béton », Septembre 2004.
4. Anne Bernard-Gély et Jean-Armand Calgaro, « Conception des ponts ». Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, C 4 500, Octobre 1994.
5. SETRA, « Appareils d'appui en élastomère fretté. Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires », Guide technique, juillet 2007.
6. SETRA, « Appareils d'appui à pot. Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires », Guide technique, novembre 2007.
7. C.E.T.E, « Appareil d'appui, Présentation et produit C.E.T.E ». Document de Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (L.R.O.P). Septembre 2007.
8. Seantier. J, « Perfectionnement aux joints de chaussées ». Office européen des brevets, bulletin 90/36, Septembre 1990.
9. SETRA « Joints de chaussée de ponts-routes ; N° F AT JO 04-09 » Avis technique ouvrages d'art, Novembre 2004.
10. SETRA, « Etanchéité des ponts », Note de présentation des avis techniques routes. Octobre 2003.
11. SETRA « Rapport d'activités 2006 », Juin 2007.
12. SETRA, « Les ponts en maçonnerie. Historique et Constitution », Juin 1982.
13. Jean-Pierre DUCOUT, « Ponts métalliques. Conception générale » Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. C 2 675.
14. SETRA, « Ponts en béton précontraint construit par encorbellements successifs ». Guide de conception. Juin 2003.
15. SETRA, « Les ponts mixtes acier-béton, des ouvrages durables et novateurs », GPC Groupe spécialisé des ponts et charpentes. Novembre 2005.

16. Jean-Pierre DUCOUT, « Ponts métalliques. Applications spécifiques » Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. C 2 675.
17. Giorgio Faraggiana, Angia Sassi Perino, « les ponts » Aout 2004.
18. AFNOR, Eurocode 8 :« Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes », Partie 2 : Ponts, Décembre 2000.
19. Belhouane. I « Détermination de l'Indice de Vulnérabilité des Constructions en Béton Armé ». Thèse de magistère, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2006.
20. A.W. Coburn, R.J.S. Spence, A. Pomonis, « Evaluation de la Vulnérabilité et des Risques » (Première édition). Cambridge Architectural Research Limited. The Oast House, Malting Lane, Cambridge, Royaume Uni, 1991.
21. Marie-José Nollet, Amar, Khaled, Denis LeBoeuf, « Microzonage et vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec », Département de génie de la construction, École de technologie supérieure, Département de génie civil, Université Laval , mai 2007.
22. SETRA, « Ouvrages d'art », Bulletin n°43, septembre 2003.
23. SETRA, « Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA) », Classification des ouvrages, Mai 1996.
24. John B. Mander, « Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges » University at Buffalo, State University of New York
25. Kevin MACKIE, Bozidar STOJADINOVIC, « Fragility Curves For Reinforced Concrete Overpass Bridges ».
26. Keizaburo Kubo, Tsuneo Katayama, « A simple method for evaluating seismic safety of existing bridge structures », Proceedings of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering, India: Sarita Prakashan, 1977.
27. SETRA, SNCF, « Ponts courants en zone sismique », Guide de conception, Janvier 2000.
28. P.Bellavoine, « Delphi 7, Formation rapide », Dunod, juin 2003.