

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

UNIVERSITE DE BLIDA 1



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

PROJET DE FIN D'ETUDES

MASTER 2 EN GENIE CIVIL

OPTION : GÉOTECHNIQUE

Etude d'un pont routier avec conception optimale des piles

Etudié par :

BOUCHAKOUR Houda

Encadré par :

Dr M. ABDESSEMED

Dédicaces

Tous d'abord je remercie ALLAH qui m'a donné le courage, pour arriver à ce stade de fin d'étude et l'élaboration de ce mémoire.

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents, qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant tout mon cursus scolaire et universitaire. Mon père, qui a sacrifié tous ses efforts, afin de me voir devenir ce que je suis.

A mes très chères sœurs et frères "Madina", "Alaa", "Abd-El-Waheb", "Mohamed", "Mohcen" et "Islam".

Mes amis : Nadjib, Bisma, Samira, Nesrine, et Romaiissa.

A tous mes collègues de la promo Géotechnique (2021/2022), et surtout : Zitouni Habiba, FlitTa Yousra, et Nadjar Hadjer.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

Houda

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier, Le Bon Dieu, Tout Puissant, le Miséricordieux, pour m'avoir donné la force et le courage de bien mener ce travail de mémoire de master.

Je tiens à remercier mon encadreur, Dr Mouloud ABDESSEMED, Enseignant Chercheur, au Département de Génie Civil/ Université de Blida, qui m'a guidé sur ce chemin et pour sa patience et sa coopération tout au long de ce travail.

Je remercie également Mr Amesaudan Hafad, cadre et responsable au niveau de l'agence "ANRH", de la wilaya de Blida et Mr Tabani Samir, Directeur des Ouvrages d'art au niveau de l'organisme "CTTP"/ 4chemins (Kouba).

Je remercie également le Président et les membres du jury pour leur intérêt qu'ils ont porté pour l'examen de travail.

Enfin à tous ceux qui ont aidé de près ou de loin, au cours de notre formation de graduation, en l'occurrence nos chers enseignants de Licence et Master (de l'Université de Blida), nos gratitude et remerciements et le que le bon Dieu les garde.

A vous tous, un grand Merci.

ملخص:

تعتبر الجسور من الاعمال الفنية بامتياز، وتعتبر من البنى التحتية الأساسية الأكثر استغلالاً، يتم التأكيد على دعائم وأسس هذه الهياكل بواسطة تيار الماء عندما تكون موجودة في الوديان وبالقرى منها أو الأنهار .
تتكون هذه الأطر وحة مندراسة جيوتقنية وهيدرولوجية لجسر طريق كجسر علوي يعلو ادبولاية الجلفة .
نحن مهتمون بالاختيار الأمثل لأشكال الاكواام لتقليل وتجنب الآثار الضارة تحت الكوارث خلال مرور التيار انا المائية للأودية، سيتم تطوير التحليل الرقمي، من خلال البرنامج التجاري الرقمي ANSYS /WORKENCH بناء على طريقة العناصر المحدودة، مع مراعاة النهج الجيوتقني.

الكلمات المفتاحية: جسر، بطارية، هيدرولوجية، جيوتقنية، التحليل الرقمي، ANSYS.

Résumé :

Les ponts sont des ouvrages d'art par excellence et ils sont considérés comme les infrastructures de base les plus exploitées. Les appuis et les fondations de ces ouvrages sont sollicités par le courant d'eaux lorsqu'ils sont implantés sur des oueds ou à proximité des rivières. Ce mémoire, consiste à l'étude géotechnique et hydrogéologique d'un pont routier, comme passage supérieur sur un oued se trouvant dans la wilaya de Djalfa. On s'intéresse au choix optimal des formes des piles afin de réduire et par conséquent éviter les effets néfastes (voire les catastrophes), lors ce passage des courants d'eaux des oueds. Une analyse numérique, par le biais du logiciel commercial 'Ansys/ Version Workbench', basée sur la méthode des éléments finis (MEF) sera élaborée, en prenant en compte l'approche géotechnique.

Mots clés : Pont, pile, oued, hydrogéologique, géotechnique, analyse numérique, Ansys.

Abstract:

Bridges are engineering structures par excellence and they are considered as the most exploited basic infrastructures. The supports and the foundations of these structures are solicited by the water current when they are implanted on wadi or near rivers. This thesis consists of the geotechnical and hydrogeological study of a road bridge, as an overpass over a wadi located in the wilaya of Djalfa . We are interested in the optimal choice of the forms of the piles in order to reduce and consequently avoid the harmful effects (even the catastrophes), at the time of this passage of the water currents of the wadis. A numerical analysis, through the commercial software; Ansys/ Version Workbench&, based on the finite element method (FEM) will be developed, taking into account the geotechnical approach.

Key words: Bridge, pier, oued, hydrogeological, geotechnical, analysis, numerical, Ansys.

Table des matières

Dédicaces	I
REMERCIEMENTS	II
Résumé :	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	X
Liste des symboles.....	XI
Introduction Générale	1
Chapitre I :Synthèse Bibliographique	
I.1. Généralités sur les ponts routiers	3
I.1.1. Définition de pont	3
I.1.2. Critère de classification des ponts.....	3
I.1.3. Les composants d'un pont.....	5
I.2. Piles du pont et formes	7
I.2.1. Type des piles de pont.....	7
I.2.2. Les formes des piles	9
I.3. Paramètres de choix de conception des piles	10
I.3.1. Conditions d'appui	10
I.3.2. Morphologie des piles courantes.....	13
I.3.3. Etudes la stabilité des piles.....	14
I.3.4. les critères de choix des piles	15
I.3.4.1. Piles encastrées dans le tablier ou avec appareils d'appui	15
I.4. Statistiques des oueds dans la wilaya de Blida	17
I.5. Effet des courants d'eaux sur les appuis de ponts.....	20
I.5.1. L'eau et la sécurité des ouvrages hydrauliques.....	20
I.5.2. L'eau et la sécurité des ponts hydrauliques.....	21
I.5.2.1. Action de l'eau sur les piles	22
I.5.2.2. Effet des courants d'eaux sur les appuis de ponts.....	22
I.6. Conception géotechnique des semelles de fondation.....	28
I.6.1. Généralités sur les fondations	28

I.6.2. Choix type de fondation	29
I.6.3. Les principaux types de fondation	29
I.6.4. Le choix des fondations des ponts	33
I.6.5. Conception des semelles de fondation	33
I.6.5.1. Reconnaissance la zone de l'ouvrage.....	33
I.6.5.2. Travaux sur terrain	35
I.6.6. Bases de calcul géotechnique	37
I.6.6.1. Actions à prendre en compte.....	37
I.6.6.2. Propriétés des terrains	38
I.6.6.3. Données géométriques	39
Chapitre II :Approche géotechnique et donnée hydrologique	
II.1. Etude hydrologique et hydro gramme des crus	41
II.1.1. Généralités sur les crues.....	41
II.1.2. Définition de crue	41
II.1.3. Caractéristiques d'une crue.....	42
II.1.4. Origine de la formation des crues	43
II.1.5. Typologie des crues	44
II.1.6. Les processus de formation des crues.....	45
II.1.7 Période de retour d'une crue	45
II.2. Etude de la pluviométrie pour wilaya de Blida.....	46
II.2.1. Généralité sue la pluviométrie	46
II.2.1.1. Définition	46
II.2.1.2. Mesure de la pluviométrie	46
II.2.1.4. Variabilité spatio-temporelle des précipitations	48
II.2.2. Présentation de la zone d'étude	49
II.2.2.5. Situation géographique	49
II.2.2.2. Situation climatique	50
II.2.2.3. Données pluviométriques et hydrométriques.....	50
II.2.2.4. Pluviométrie mensuelle moyenne à Blida.....	51
II.3. Etude des débits maximaux pour oued Chiffa	52
II.3.1. Présentation du bassin versant de la Chiffa	52
II.3.1.1. Situation géographique	52
II.3.2. Climat de Chiffa.....	55
II.3.3. Le débit maximum de oued Chiffa	55

II.4. Paramètre de données hydrologique pour calcul de pont	56
II.4.1. Conception préliminaire	57
II.4.2. Les données hydrauliques et environnement	58
Chapitre III :Choix de logiciel	
III.1. Introduction	59
III.2. La méthode des élément finis	59
III.2.1. Domaines d'application de la MEF.....	59
III.2.2. Principes de la méthode des éléments finis	60
III.2.3. Etapes du calcul de la MEF	62
III.3. Modélisation par ANSYS	65
III.3.1. Présentation du logiciel ANSYS	65
III.3.2. Les versions de logiciel ANSYS	66
III.3.3 Organisation du logiciel ANSYS	67
Chapitre IV :Analyse numérique et cas d'étude	
IV.1. Introduction	70
IV.2. Objectif du travail.....	70
IV.3. Présentation de l'ouvrage	70
IV.4. Hydrologie de la région et climat	72
IV.5. Propriété des matériaux et maillage	73
IV.5.1. Béton armé	73
IV.5.2. Maillage et conditions au limites.....	74
IV.5.3. Conditions aux limites.....	74
IV.6. Les donné de calcule :	74
Chapitre V :Résultats et discussions	
V.1. Introduction	77
V.2. Pressions d'hydrauliques appliquées	77
V.3. Modèles des variantes.....	78
V.4. Résultats trouvés de l'analyse.....	79
V.4.1. Modèle de la pile à futs.....	79
V.4.1.1. Pile sans pression des eaux	79
V.5. Bilan et commentaires	85
Conclusion Générale Et Recommandations	87
Références	

Liste des figures

Figure I. 1: Pont routier au-dessus de la route.....	3
Figure I. 2: Vue d'un pont rail.....	4
Figure I. 3: Vue d'un pont canaux.....	4
Figure I. 4: les ponts en arc.	5
Figure I. 5: Composantes d'un pont.	6
Figure I. 6: Position des culés et les piles dans un pont routier.....	7
Figure I. 7: Pile en maçonnerie protégées.	8
Figure I. 8: Pont routier avec des piles métalliques.....	8
Figure I. 9: Pile en béton.	9
Figure I. 10: Pile de forme de voile.....	9
Figure I. 11: Pile a futs jumeaux.	10
Figure I. 12: Pile a colonne.....	10
Figure I. 13: Pile encastrée dans le tablier	15
Figure I. 14: Pont avec chevêtre.	16
Figure I. 15: Pile avec chevêtre.	17
Figure I. 16: Pile sans chevêtre.....	17
Figure I. 17: Positionnement géographique de la plaine de la Mitidja.....	18
Figure I. 18: Vue de Oued Chiffa.....	19
Figure I. 19: Vue des crues d'oued Djer.....	19
Figure I. 20: Carte présent les oueds dans la willaya de Blida.....	20
Figure I. 21: Effondrement du pont a couse du cours d'eau.....	21
Figure I. 22: Affouillement des remblais d'accès d'un dalot en Algérie	22
Figure I. 23: Schéma illustrant l'action de l'eau autour des piles de pont.	22
Figure I. 24: Un exemple d'affouillement autour des piles de pont.....	23
Figure I. 25: Un exemple d'affouillement autour d'un culé de pont.....	24
Figure I. 26: L'affouillement général de la rivière de Sg. Jeniang, Kedah	25
Figure I. 27: Phénomène d'affouillement sur fondation profonde.	26
Figure I. 28: L'érosion du sol.....	27
Figure I. 29: Désordre à la base des piles du pont sur Oued Allala (Ténès).	27

Figure I. 30: L'attaque des sulfates sur la pile d'un pont	28
Figure II. 1: Schéma de fondation.	28
Figure II. 2: Type de fondation superficielle.	30
Figure II. 3: Classification des pieux.	31
Figure II. 4: Choix le type de fondation.	32
Figure II. 5: Carte de zonage sismique du territoire national.	35
Figure II. 6: Caractéristiques d'un hydro-gramme de crues.	42
Figure II. 7: Le Pluviomètre	47
Figure II. 8: Pluviométrie mensuelle moyenne à Blida.	51
Figure II. 9: Situation géographique du bassin versant de l'Oued Chiffa.	52
Figure II. 10: Courbes hypsométrique du bassin versant de l'Oued Chiffa.	54
Figure II. 11: Organigramme de conception hydraulique préliminaire.	58
Figure III. 1: Maillage en élément finis d'un pont.	61
Figure III. 2: Numérotation des nœuds et des éléments pour un problème à 2 dimensions (première méthode).	62
Figure III. 3: Numérotation des nœuds et des éléments pour problème (deuxième méthode).	62
Figure III. 4: Organigramme générale de code de calcul.	63
Figure III. 5: Schéma d'utilisation classique d'ANSYS.	68
Figure IV. 1: Plan synoptique du l'axe d'étude de dédoublement de RN°1.	71
Figure IV. 2: Carte de la Wilaya de Djelfa.	71
Figure IV. 3: Evolution de l'humidité relative mensuelle (période de 1995-2004).	73
Figure IV. 4: Plan de notre travaille	75
Figure IV. 5: Section de poutre	75
Figure V. 1: Schématisation des pressions sur pile	78
Figure V. 2: Modèle des piles du pont à futs.	78
Figure V. 3: Modèle des piles du pont à voiles	78
Figure V. 4: Valeurs des déplacements dans le sens x	79
Figure V. 5: Valeurs des déplacements dans le sens transversal.	80
Figure V. 6: Valeurs des contraintes du pont.	80
Figure V. 7: Valeurs des déplacements dans le sens longitudinal.	81
Figure V. 8: Valeurs des déplacements transversaux.	81

Figure V. 9: Valeurs des contraintes du pont avec pressions d'eau.....	82
Figure V. 10: Valeurs des déplacements dans le sens x.....	83
Figure V. 11: Valeurs des déplacements dans le sens y.....	83
Figure V. 12: Valeurs des contraintes du pont sans pressions d'eau.....	84
Figure V. 13: Valeurs des déplacements dans le sens x.....	84
Figure V. 14: Valeurs des déplacements dans le sens y.....	85
Figure V. 15: Valeurs des contraintes du pont à voiles avec pressions d'eau.....	85

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Principaux sous bassins versants de Blida.	19
Tableau I. 2: Les débits maximums des oueds de willaya de Blida.	20
Tableau II. 1: Tableau climatique Blida	50
Tableau II. 2: Historique de pluviométrie de Blida.	50
Tableau II. 3: Répartition interannuelle des températures l'évapotranspiration bassin versant de la Chiffa.	55
Tableau II. 4: Répartition interannuelle des précipitations pour le bassin versant de la Chiffa.	55
Tableau II. 5: Débit max de oued Chiffa	56
Tableau IV. 1: Propriétés du béton armé.	74

Liste des symboles

G_{max} : la charge permanente défavorable,

G_{min} : la charge permanente favorable,

Q_r : la charge générale du trottoir,

W : Effet du vent,

T : Effet de température.

M_s : moment stabilisant.

M_r : moment renversant.

MRE : ministère des Ressources en eau.

ANRH : l'Agence nationale des ressources hydriques.

C3A : aluminat tricalcique.

B : largeur de la semelle ou la plus petite dimension.

D_f : la profondeur de fondation.

R.P.O.A: Le règlement parasismique algérien des ouvrages d'Art.

Q_p : Le débit de pointe de crue.

PDI : Indice de sécheresse de Palmer.

K_c : Indice de compacité de Gravelius.

P : Périmètre du bassin versant en km.

A : Superficie du bassin versant en km².

MEF : La méthode des éléments finis.

k_e : Construire la matrice et le vecteur élémentaire.

U : vecteur des déplacements.

E_c : Module d'élasticité.

ν : Coefficient de poisson.

γ :masse

volumique

de.

Introduction Générale

L'art de construire les ponts, remonte aux temps les plus reculés. Le premier pont a probablement été un arbre renversé par le vent au-dessus d'un cours d'eau, puis leur développement technologique a connu deux périodes, celle appelée "période romaine" et l'autre appelée "période contemporaine". En Algérie, le premier pont a été construit par les Romains en au 11^e siècle.

Les ponts sont des ouvrages d'art par excellence, on les considère comme les infrastructures de base, les plus répandus pour relier les réseaux routiers en cas de franchissement des obstacles (naturels ou artificiels). Dans le cas de passages sur oueds, ces ouvrages sont généralement sollicités par le courant d'eaux et les pressions interstitiels.

Dans ce mémoire, on s'intéresse au choix optimal des formes des piles afin d'éviter les effets néfastes (catastrophes), lors ce passage de courants d'eaux des oueds ; Un travail numérique basé sur la méthode des éléments finis (MEF), par le biais du logiciel commercial "Ansys/Version Workbench", sera élaboré avec une approche géotechnique (rapport du sol et données hydrologique). On prendra (02) variantes pour cela.

Pour cela, notre mémoire est divisé en sinque (05) chapitres. Après une introduction générale, le premier chapitre est sous forme de généralités sur les ponts et les définitions de ces éléments porteurs (comme les appuis centraux/piles). On s'étalera sur les paramètres de choix de conception des piles, les statistiques des oueds dans la wilaya de Blida et les Effet des courants d'eaux sur les appuis de ponts. Dans le deuxième chapitre, on procédera à une approche géotechnique et des données hydrologiques pour le calcul des effets des oueds sur la stabilité des ouvrages d'art.

Dans le troisième chapitre, choix de logiciel, on choiser logicielle ANSYS qui travaille a la base par laméthode d'élément finis. Dans le quatrième chapitre on définira un cas d'étude d'un pont routier, se trouvant dans une zone à fortes crues, ou on présentera les différents cas d'analyse numérique. Le sinqueième chapitre sera consacré aux résultats et discussions, avec des d'éventuelles comparaisons à d'autres chercheurs traitant le même sujet ;On terminera par une conclusion générale qui quantifiera les résultats trouvés et des recommandations pour futurs travaux .

Chapitre I :
Synthèse Bibliographique

Synthèse Bibliographique

I.1. Généralités sur les ponts routiers

I.1.1. Définition de pont

Un pont routier est un ouvrage d'art qui permet de franchir un obstacle naturel ou artificiel (cours d'eau, rivière, canyon, fleuve, bras de mer, voie de communication etc....), en passant par-dessus et qui supporte une route pour les véhicules automobiles.



Figure I. 1: Pont routier au-dessus de la route.

I.1.2. Critère de classification des ponts

Il existe de nombreux critères permettant de distinguer les ponts. Ces critères répondent aux besoins pour la construction d'un pont car les modèles de charges, les situations de risques, les hypothèses de dimensionnement ou encore les modèles de calcul sont fonction du type d'ouvrage. Les critères de classification sont principalement :

A- Selon leur destination :

C'est la nature de leur voie portée, qui permet de distinguer principalement les ponts :

- Ponts routes : sur lesquels passent les routes et autoroutes ;
 - Ponts rails, sur lesquels passent les chemins de fer.
 - Pont pour canaux : sur lesquels passent des voies de navigation intérieure.
 - Ponts-aqueducs : sur lesquels passent les canalisations d'eau.
 - Ponts pour piétons et cyclistes
 - Ponts pour avions : dans les aéroports.

Figure I. 3: Vue d'un pont rail.



Figure I. 2: Vue d'un pont canaux.

**B- Selon les matériaux utilisés pour la construction :**

- Les ponts en bois,
- Les ponts en béton armé,
- Les ponts en béton précontraint
- Les ponts métalliques.

Il existe aussi des ponts avec des tabliers mixtes acier-béton comportant des poutres métalliques et une dalle de couverture en béton qui peut être précontrainte transversalement.

C- Classification selon la structure :

La conception architecturale générale d'un ouvrage de franchissement fixe fait appel aux trois modes fondamentaux de fonctionnement mécanique des structures (flexion, compression et traction) pour donner cinq types de ponts fixes :

- Les ponts à voûtes,
- Les ponts en arc,
- Les ponts suspendus,
- Les ponts à haubans.



Figure I. 4: les ponts en arc.

D- Classification selon la voie portée :

La fonction d'un pont est liée à la fonction de la voie de communication portée :

- Un pont-route
- Un pont-rail ou pont ferroviaire désigne un ouvrage portant une voie ferrée ou un tramway,
- Une passerelle désigne un ouvrage portant une voie piétonne, pour les piétons,
- Un pont-canal désigne un ouvrage portant un canal.

E- Classification selon la nature :

- Ponts fixes : Les ponts fixes comprennent tous les ouvrages dont l'élément porteur, et en particulier le tablier, est fixe,
- Ponts mobiles : Un pont mobile est un pont dont le tablier est mobile en partie ou en totalité,
- Ponts provisoires : un pont provisoire permet d'apporter une solution temporaire de franchissement d'un cours d'eau ou à la dénivellation d'un carrefour. [1]

I.1.3. Les composants d'un pont

Un pont routier se compose généralement de deux parties principales à savoir : la superstructure et l'infrastructure qui repose sur le terrain et supporte la superstructure et les appareils d'appuis qui sont des éléments interposés entre la superstructure et l'infrastructure.

- ❖ **La superstructure** est composée principalement du tablier, structure sur laquelle se fait le déplacement à niveau ; Les tabliers de ponts reposent en général sur les appuis par l'intermédiaire d'appareils d'appui conçus pour transmettre à l'infrastructure des efforts verticaux et/ou horizontaux.

- ❖ **L'infrastructure** composé d'appuis intermédiaires, appelés « piles », et appuis d'extrémités, appelés « culées » et les fondations. [1]

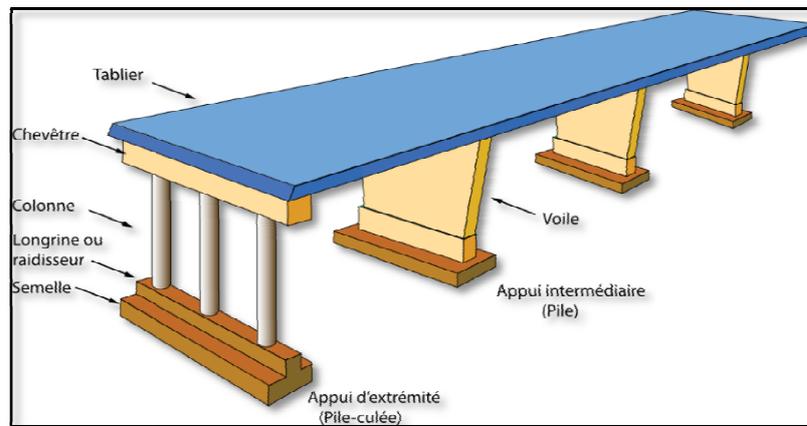


Figure I. 5: Composantes d'un pont.

Les culées : sont des appuis d'extrémité d'un ouvrage ; le rôle d'une culée est d'assurer la liaison entre le tablier du pont et le milieu environnant ; une culée assure donc à la fois les fonctions d'appui de tablier et de mur de soutènement. En tant qu'appui de tablier une culée est soumise aux mêmes efforts que les piles. En tant que mur de soutènement, elle subit la poussée des terres et des surcharges de remblais.

Les piles : servent d'appuis intermédiaires au tablier elles reprennent les efforts exercés par le tablier. Celui-ci peut-être simplement appuyé sur elles, partiellement ou totalement encastré.

Les fondations: elle a transmis les charges au sol.[1]

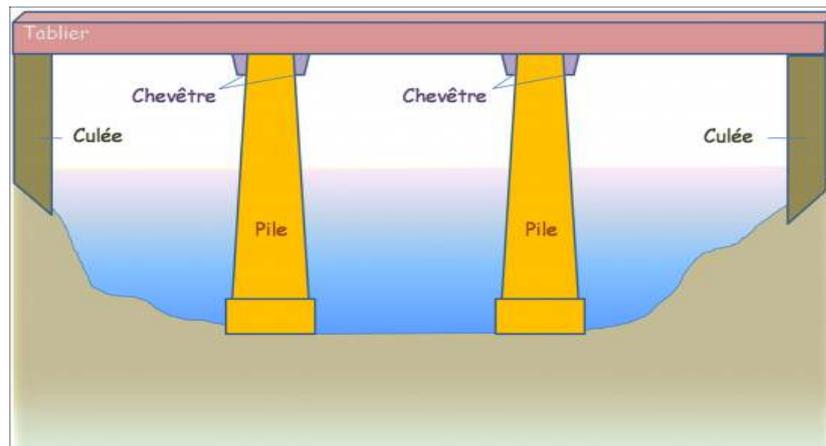


Figure I. 6: Position des culés et les piles dans un pont routier. [1]

I.2. Piles du pont et formes

I.2.1. Type des piles de pont

Les principes types de pile de pont est :

A - Les piles en maçonnerie

On distingue dans les piles de ponts en maçonnerie une partie résistante et une partie remplissage :

- La périphérie des fûts sur une certaine épaisseur constitue la partie résistante, réalisée en moellons d'appareil dans les angles et en moellons équarris ou même en moellons bruts.
- Le remplissage, au cœur de l'appui, est constitué de moellons bruts ou de tout venant liés ou non par du mortier, n'offrant pas de caractéristiques particulières de résistance mécanique et pouvant même parfois être de qualité très médiocre et très hétérogène.



Figure I. 7: Pile en maçonnerie protégées.

B -Les piles métalliques : Ce sont des piles intermédiaires généralement utilisées dans les ponts métalliques qui ne supportent pas une charge importante.



Figure I. 8: Pont routier avec des piles métalliques.

C- Piles en béton : La plupart des piles des ponts modernes sont en béton armé, ou en béton précontraint pour les plus grands ouvrages.



Figure I. 9: Pile en béton.

I.2.2. Les formes des piles

Il y a deux types de formes sont principalement rencontrés : les colonnes ou les voiles. Chaque appui peut être composé d'un ou plusieurs voiles ou colonnes.

1- Les piles de types de voile :

Les piles voiles de forme standard que l'on peut rencontrer sur la plupart des autoroutes sont représentés dans l'illustration ci-après.

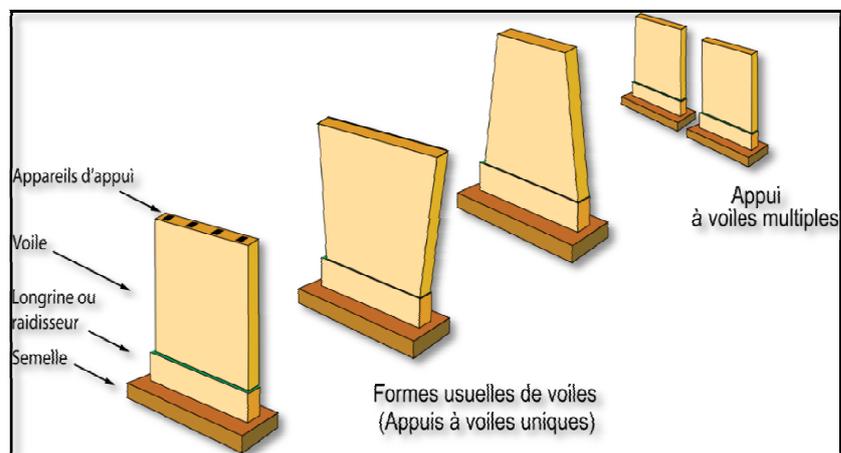


Figure I. 10: Pile de forme de voile.

2- Les piles de type colonne :

La deuxième famille de piles est celle dont les éléments porteurs sont de type Poteau. Les poteaux peuvent être libres en tête s'ils sont placés au droit des descentes de charges par l'intermédiaire des appareils d'appui, ou liés par un chevêtre dans le cas contraire.

Figure I. 11: Pile a futs jumeaux.

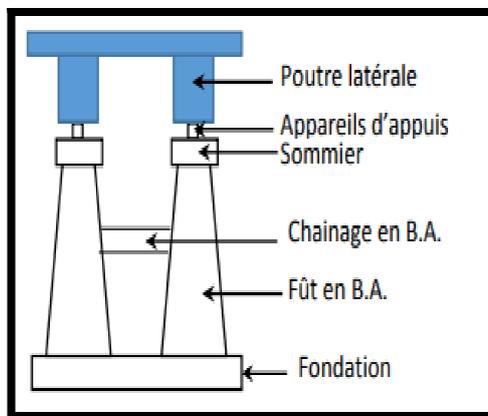
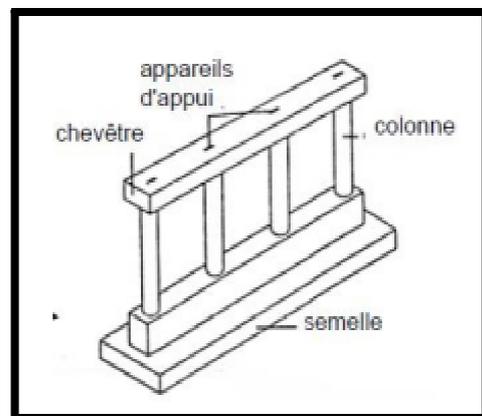


Figure I. 12: Pile a colonne.



3- Pile de forme spéciale :

- ✚ Pile en forme de Y,
- ✚ Pile en forme de V,
- ✚ Pile marteau,
- ✚ Pile en forme de portique.

I.3. Paramètres de choix de conception des piles

Les données et paramètres susceptibles d'intervenir dans la conception et choix des piles sont :

I.3.1. Conditions d'appui

La conception et le choix des appuis sont liés à une multitude de paramètres d'importance et d'incidence variable (caractéristiques du franchissement, du tablier site, sol de fondation, etc...), auxquels peuvent s'ajouter éventuellement des contraintes dans le domaine de l'esthétique pour les appuis vus.

L'étude des appuis a son origine à l'amont de celle du tablier, pour se terminer à l'aval de cette dernière. Les données et les paramètres à recueillir dépendent des conditions d'appui, que l'on peut classer de la manière suivante :

a) Conditions fonctionnelles : liées à l'implantation et l'emplacement des appuis qui dépendent de :

- Les tracés en plan des voies : les ouvrages biaisés ou courbes conduisent à de grandes longueurs des lignes d'appui d'où la nécessité de penser à des solutions de tablier en retrait avec encorbellements ou à des travées plus grandes pour réduire le nombre des appuis ;
- Les profils en long et en travers des voies : le tirant d'air ou le gabarit à dégager conduit parfois à des appuis de hauteur importante qui pose des problèmes du pont de vue technique, économique et esthétique ;
- Les terrassements aux abords : la conception des appuis extrêmes et leur implantation sont influencées par le niveau et la position des remblais d'accès par rapport aux voies.

b) Conditions d'implantation : il n'est pas toujours possible de placer un appui en un point qui serait cependant souhaitable vis-à-vis de la structure portée. C'est le cas d'un PS d'autoroute, par exemple, dont l'implantation des appuis dépend des caractéristiques transversales d'un ouvrage en site urbain, où les problèmes d'encombrement conditionnent l'implantation et le type des appuis.

c) Conditions mécaniques : elles concernent :

- La liaison avec le tablier qui peut être rigide, articulée, élastique ou libre, et la nature la forme et les dimensions des appareils d'appui influencent le choix et la conception des appuis ;

- La liaison avec le sol de fondation : en fonction de la nature du sol du type et de la hauteur de la fondation la liaison peut être considérée comme une articulation ou un encastrement.
- La continuité ou la discontinuité des éléments verticaux : il s'agit de l'existence ou pas d'un chevet et de la nature de ce dernier porteur ou non.
- La rigidité transversale par rapport aux tassements différentiels provenant d'un excentrement important des charges ou d'un manque d'homogénéité du sol ;
- La résistance aux chocs éventuels : les voiles sont en général, mieux adaptés dans cas avec une épaisseur minimale.
- La possibilité de changement des appareils d'appui : les réservations pour la prise en compte de ce dernier dans le calcul des appuis doivent être prises en compte.
- Sollicitations sur les piles : Ce sont les réactions développées par les charges permanentes et les surcharges considérées comme statiques ainsi que les variations linéaires, ainsi que les réactions développées par les mouvements des surcharges (freinage, force centrifuge ...). Elles s'appliquent directement au sommier. [1]

1. Réactions verticales :

- Charges permanentes G,
- Charges d'exploitation normales, les surcharges particulières.
- Charge du trottoir,
- Pression verticale du vent appliquée sur le tablier,
- Composante verticale du séisme,

2. Réactions horizontales :

- Force de freinage,
- Force de centrifuge,
- Déformation longitudinale du tablier (retrait, fluage, température),
- Force horizontale de rappel dans les appareils d'appuis glissants,
- Pression horizontale du vent appliquée sur le tablier et la pile dans la direction transversale,
- Composantes longitudinale et transversale du séisme.

d) Conditions économiques : une fois satisfaites les conditions fonctionnelles et mécaniques, il y a lieu de rechercher parmi toutes les solutions possibles et elles sont parfaites nombreuses celles qui s'avéreront les plus intéressantes du point de vue économique.

e) **Conditions esthétiques** : à adapter au type de l'ouvrage et de l'environnement et ce, afin d'avoir un art qui donne une jolie vue d'ensemble.

I.3.2.Morphologie des piles courantes

1- Les piles voiles :

C'est la transposition en béton armé des anciennes piles en maçonnerie. Elles sont souvent utilisées pour les passages supérieurs d'autoroute

Elles ont l'avantage d'engendrer un faible encombrement transversal et sont utilisées pour des hauteurs limitées à 15m.

Elles peuvent être utilisées pour le franchissement hydraulique en ajoutant des avant becs. L'épaisseur est alors de 1,00m. Il est possible d'adopter une conception avec deux ou plusieurs voiles pour alléger la pile. [2]

2- Les palées :

C'est une succession de colonnes reliées en tête par un chevêtre. Les colonnes peuvent être le simple prolongement des pieux (radiers semi-submersibles). Elles s'appuient sur une semelle éventuellement raidie. Il est recommandé de prévoir une colonne sous chaque appareil d'appui pour optimiser l'épaisseur du chevêtre.

3- Les piles en caisson :

Elles sont utilisées pour les piles de grande hauteur pour assurer plus de rigidité vis-à-vis des efforts horizontaux.

Elles doivent être vérifiées au flambement. Elles sont réalisées par un coffrage grim pant. L'épaisseur minimale est de 30cm. Elle est en général comprise entre 30 et 60cm. La pile est coiffée par un chevêtre important de 1 à 1,50m.[2]

4- Les piles marteaux :

Elles sont utilisées en site urbain, lorsqu'on a très peu d'espace ou en site aquatique pour limiter la perturbation des écoulements. Cette conception est, également, intéressante pour les franchissements géométriquement biais en conservant l'ouvrage mécaniquement droit.

Elle est formée d'une colonne soumise à d'importants moments de flexion transversaux et longitudinaux, et d'un chevêtre soumis à d'importants efforts de flexion et d'efforts tranchants.

I.3.3. Etudes la stabilité des piles

➤ Stabilité de la pile :

La stabilité d'ensemble d'une pile se ramène à la résistance du sol de fondation. On choisit la stabilité de la pile durant les diverses étapes de la vie de l'ouvrage :

- A la construction (phase transitoire),
- Exploitation (phase durable),
- Séisme (cas accidentel).

Les trois conditions de stabilité doivent être vérifiées, à savoir : au renversement, à l'enfoncement (poinçonnement du sol) et au glissement.[2].

➤ Combinaisons d'actions à l'état limite ultime de stabilité :

Phase de construction :

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,35 Q_c + 1,2 W + 0,9 T$$

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,5 W + 1,35 Q_c + 0,9 T$$

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,5 T + 1,35 Q_c + 1,2 W$$

Phase d'exploitation :

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,5 Q_r + 0,9 W + 0,9 T$$

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,5 W + 0,9 T$$

$$0,9 G_{min} + 1,1 G_{max} + 1,5 T + 0,9 W$$

- G_{max} : la charge permanente défavorable,
- G_{min} : la charge permanente favorable,
- Q_c : la charge de chantier,
- Q_r : la charge A ou B + la charge générale du trottoir,
- W : Effet du vent,
- T : Effet de température (si elle est défavorable).

➤ Stabilité au renversement

$$MS/Mr \geq 1,5$$

M_s : moment stabilisant par rapport au point « C » de renversement

M_r : moment renversant par rapport au point « C » de renversement

➤ **Stabilité au glissement :**

Le fût est calculé comme une pièce soumise à la flexion composée en utilisant les Procédés de la résistance des matériaux.

I.3.4. les critères de choix des piles

I.3.4.1. Piles encastrées dans le tablier ou avec appareils d'appui

Une pile ne peut être encastrée dans le tablier que si elle peut supporter les efforts de flexion que le tablier va lui transmettre du fait notamment : des surcharges routières, des variations thermiques ; Si cet encastrement est structurellement facile à réaliser.

Ces conditions excluent les piles des ponts poussés en béton, les piles des ponts mixtes et un grand nombre de piles dont la hauteur est trop faible eu égard à leur distance au point fixe des variations thermiques. Dans la pratique, seuls quelques grands ponts en béton construits par encorbellements comportent des piles encastrées dans le tablier [1].



Figure I. 13: Pile encastrée dans le tablier [1]

Les principaux avantages d'une pile encastrée sont l'absence d'appareils d'appui à entretenir, une esthétique souvent jugée meilleure et, quand on construit par encorbellements successifs, l'absence de dispositif de stabilisation des fléaux.

2-Piles pleines ou piles creuses :

Les piles creuses doivent avoir des dimensions minimales importantes et ne concernent donc que des ouvrages importants, bipoutres ou caissons et tous les autres ponts ont des piles pleines. Dans le contexte du développement durable et de l'économie des ressources, des piles creuses non visitables sont de plus en plus souvent projetées.

3-Pile d'un ou plusieurs fûts :

La majorité des ouvrages comporte des piles à un ou deux fûts ; Par le passé, on a construit des passages supérieurs dont les piles étaient composées d'une série de colonnes mais ce type de piles est peu esthétique et résiste mal aux chocs de camions[1].

4-Pile avec ou sans chevêtre

Les dimensions minimales en plan d'une pile sont très souvent plus importantes sous le tablier qu'au niveau du TN. En effet, en tête de pile, on a besoin d'espace pour placer, en plus des appareils d'appui, des vérins des appareils d'appui de poussage ou des cales de stabilisation.

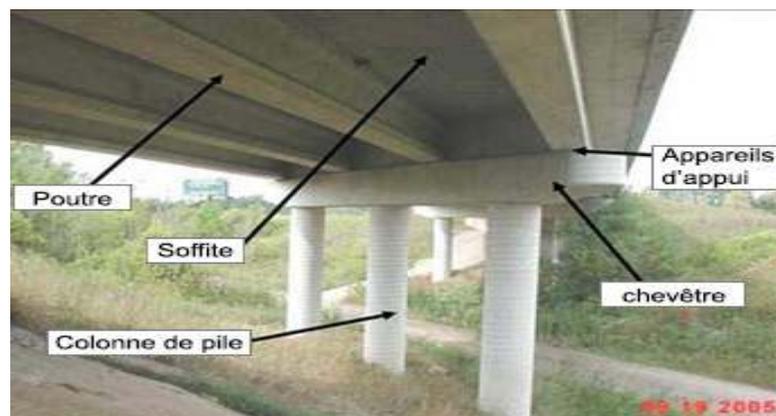


Figure I. 14: Pont avec chevêtre.

Il est très fréquent qu'on élargisse le fût sous le tablier sur une hauteur de 1 à 2m. Cet élargissement localisé, qu'on appelle chevêtre, permet de donner aux fûts les dimensions minimales évoquées ci-dessus. Lorsque le chevêtre est beaucoup plus large que le fût, on parle de marteau. Cette pièce est souvent précontrainte.



Figure I. 15: Pile avec chevêtre.



Figure I. 16: Pile sans chevêtre.

I.4. Statistiques des oueds dans la wilaya de Blida

Le secteur hydraulique en Algérie compte des milliers de cours d'eau (principalement des oueds) répartis sur tout le territoire national, qui relèvent du ministère des Ressources en eau (MRE). Ces cours d'eau dépendent des 58 directions de wilayas des ressources en eau et de l'hydraulique en Algérie ; ils sont gérés par l'Agence nationale des ressources hydriques. [17]

Le secteur hydraulique de wilaya de Blida appartenir à La plaine de la Mitidja ; Elle est traversée par six importants oueds qui assurent le drainage des bassins versants montagneux de la chaîne de l'Atlas. Nous rencontrons d'Est en Ouest les oueds : Hamiz, Djemaa, El Harrach, Chiffa, Bouroumi, Djer. En aval de la plaine de la Mitidja, l'oued Bouroumi et l'oued Chiffa confluent pour former l'oued Mazafran. L'oued Harrach rencontre l'oued Djemaa dans les environs de Baba Ali. A l'Est de l'oued Hamiz, s'écoule l'oued Reghaia qui est considéré comme secondaire.

Les oueds mentionnés ci-dessus sont en grande partie en liaison hydraulique avec la nappe de la Mitidja puisque leurs eaux peuvent s'infiltrer ou inversement drainer la nappe. La plaine est

partagée en quatre bassins fluviaux : celui de l'oued Nador, de l'oued Mazafran, de l'oued Harrach et du Hamiz. Alors que la plaine s'allonge dans une direction d'Est - Ouest, ces derniers la traversent perpendiculairement selon des directions méridiennes. Ces oueds côtiers présentent un certain nombre de caractéristiques communes :

- Tous présentent un profil longitudinal divisé en deux parties très distinctes.
- Leur pente est très forte en montagne.
- Dans un passé récent elles ont été constamment maintenues par le jeu tectonique.
- Ce sont des oueds aux vallées étroites, profondes, encaissées.
- Ils prennent tous naissance dans l'Atlas et sont tous de dimensions restreintes. [17]

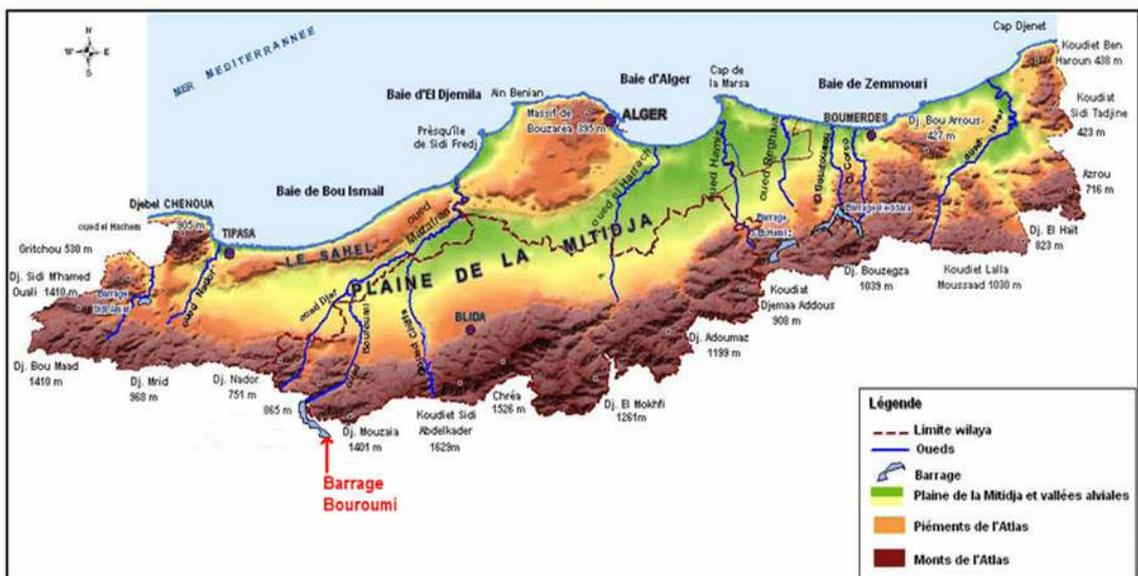


Figure I. 17: Positionnement géographique de la plaine de la Mitidja [3].

Oued El-Harrach :

L'oued El-Harrach est un fleuve algérien qui prend naissance dans l'Atlas blidéen près de Hammam Melouane. Il est long de 67 kilomètres et se jette dans la Méditerranée, en plein milieu de la baie d'Alger.[2]

Plus à l'Est l'oued EL HARACH draine la partie centrale de la plaine de la Mitidja et se jette dans la baie d'Alger en son centre. L'oued EL HAMIZ quant à lui de moindre importance, descend du mont de Larbatache et se jette à l'Est de la baie bassin de la Mitidja :

Le MAZAFRAN, l'oued le plus important de la Mitidja, dont le cours d'eau une quinzaine kilomètre, est formé par la réunion des oueds DJER, BOU ROUMI et CHIFFA.

La wilaya de Blida elle est comprend les cours d'eau suivants :

- ✓ Oued Djer ou niveau de Affron,
- ✓ Oued Bouroumi ou niveau de Attatba,
- ✓ Oued Chiffa ou niveau d'el Hamdania,
- ✓ Oued el Harrach au niveau de Hamam meloine,
- ✓ Oued djemaa au niveau de larebaa,
- ✓ Oued Sidi El Kébir. (ANRH).

Tableau I. 1: Principaux sous bassins versants de Blida. [17]

Bassins Versants (BV)	Principaux Oueds
Mazafran (premier sous BV central)	Djer, Bou Roumi, Chiffa
El Harrach (deuxième sous BV central)	Djemaa, hamam meloine



Figure I. 18: Vue de Oued Chiffa

Figure I. 19: Vue des crues d'oued Djer

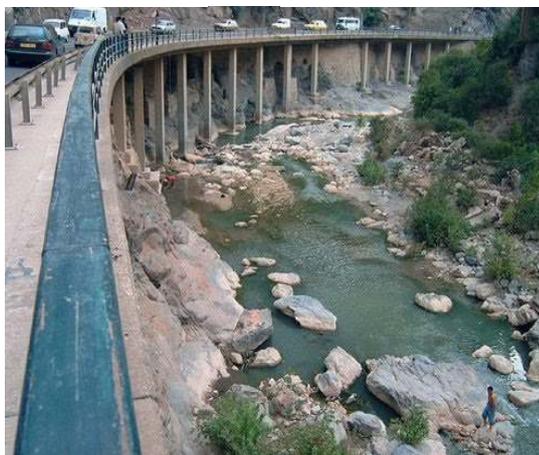


Tableau I. 2: Les débits maximums des oueds de willaya de Blida. [17]

Oueds	Les débits max	Année d'étude
Oueds Bouroumi	325.0 m ³ /s	1982 à 1994
Oued chiffa	730.0 m ³ /s	1969 à 2017
Oued el harrach	820.0 m ³ /s	1973 à 2013
Oued Djer	340.0 m ³ /s	1969 à 1993

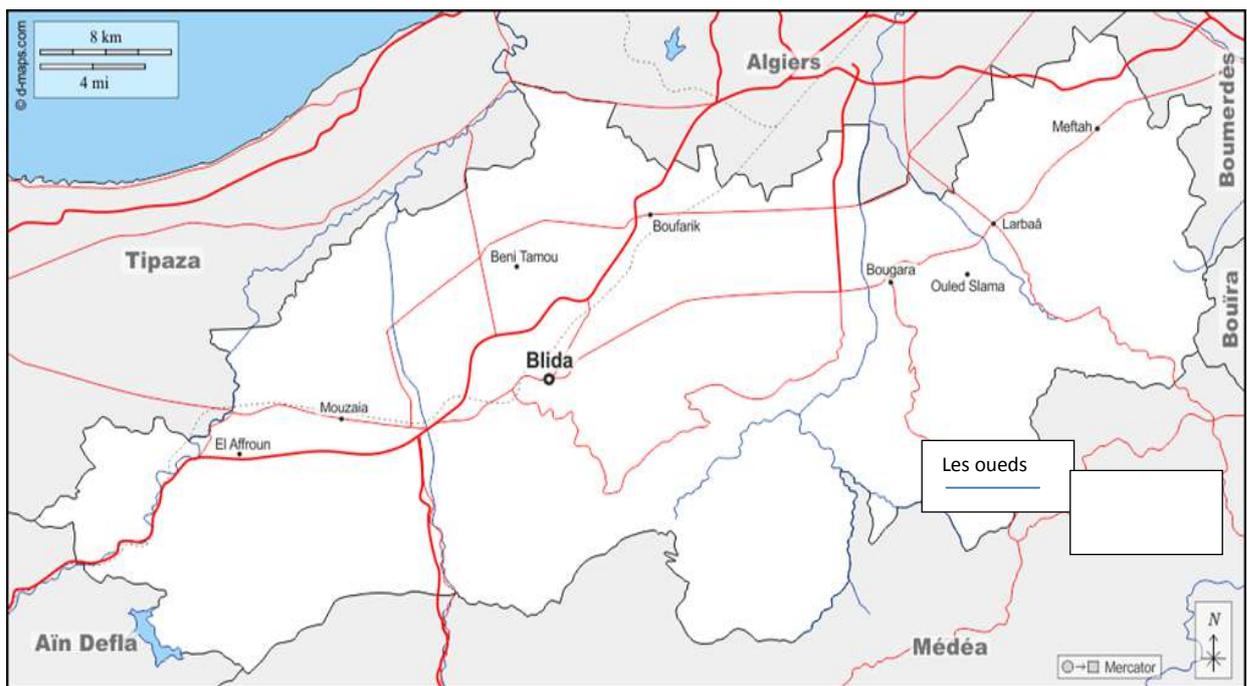


Figure I. 20: Carte présent les oueds dans la willaya de Blida. [4]

I.5. Effet des courants d'eaux sur les appuis de ponts

I.5.1.L'eau et la sécurité des ouvrages hydrauliques

Lors de la conception des ouvrages franchissant les cours d'eau ou les canaux, un certain nombre d'informations hydrauliques sont nécessaires. En plus du niveau des plus hautes eaux, il convient aussi de connaître les débouchés susceptibles d'évacuer les masses d'eau transitant par ces ouvrages. En fait, le problème hydraulique doit être considéré à une large échelle. L'ouvrage projeté ne doit pas provoquer, par des remblais d'accès trop rapprochés, une réduction inacceptable du débouché hydraulique du cours d'eau. Par ailleurs, il convient de s'assurer du niveau maximal des crues qui se sont produites au siècle précédent. Or, en l'espace d'un siècle, le régime hydraulique du cours d'eau a probablement évolué à la suite de certains aménagements (barrages, endiguement, rectifications de cours d'eau, etc.) ou de

condition de gestion particulières (extractions massives de matériaux ayant provoqué un abaissement graduel du lit).

L'interaction entre l'eau et le sol environnant est un phénomène naturel. Cet équilibre a déstabilisé les pratiques quotidiennes de l'homme. Ainsi dans le cas de l'érosion par exemple, elle passe d'une érosion géologique à faibles taux à une érosion accélérée avec des pertes de sols considérables. La connaissance des caractéristiques hydrauliques au niveau des ouvrages enjambant les cours d'eau n'est généralement pas suffisante. D'autres caractéristiques géotechniques des sols d'assises ainsi que la nature des appuis sont d'une importance capitale pour pouvoir déterminer les fonds de fouilles. En effet, lorsque les fondations ne sont pas suffisamment ancrées, il peut se produire un phénomène qui représente un danger réel pour la stabilité des ouvrages qu'est l'affouillement. Ce phénomène, quoique responsable d'un grand nombre de ruines d'ouvrages, demeure négligé par les concepteurs car mal connu [4].



Figure I. 21: Effondrement du pont a cause du cours d'eau [4]

I.5.2.L'eau et la sécurité des ponts hydrauliques

L'action mécanique de l'eau sur les ponts recouvre les phénomènes d'affouillement et d'abrasion qui se produisent sur le périmètre et contre les parois des appuis intermédiaires des ponts (piles) franchissant des rivières ou des oueds. En effet pendant les fortes crues les cours d'eau charrient des sédiments qui peuvent avoir un effetabrasif sur les piles et leurs fondations.

Les crues provoquent également l'affouillement du sol autour des appuis, d'où la nécessité de les protéger par l'ancrage de rideaux (palplanche par exemple).



Figure I. 22: Affouillement des remblais d'accès d'un dalot en Algérie [3]

L'affouillement représente un problème grave pour les ponts construits sur les cours d'eau à fonds mobiles, en effet ce phénomène à causer beaucoup de détériorations, et parfois même des destructions des ponts causant de dégâts humains et matériels dans le monde.

I.5.2.1. Action de l'eau sur les piles

L'eau agit de diverses façons. L'eau exerce une poussée hydrostatique sur la pile et le courant exerce une action hydrodynamique sur les parties immergées, donc un mouvement de renversement pour les piles avec avants becs arrondis ou autres. L'eau des rivières tend à dissoudre la chaux des libres des mortiers et des bétons. C'est pourquoi, il faut protéger les armatures des piles contre la corrosion, et de mouilles (fortes hauteur d'eau, faible vitesse de courant, sédimentation dominante).

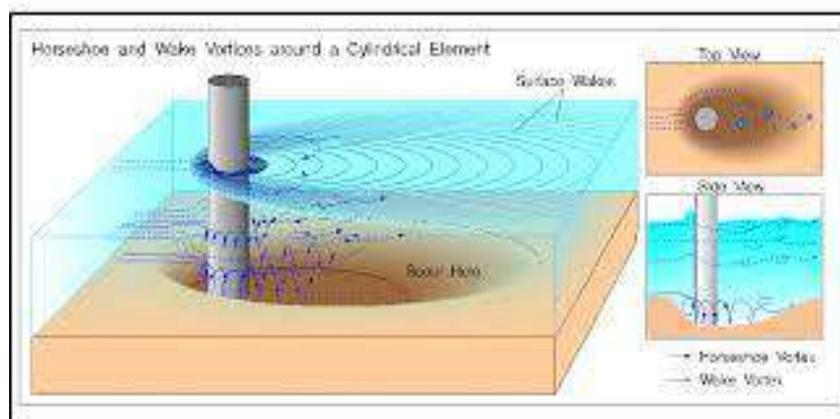


Figure I. 23: Schéma illustrant l'action de l'eau autour des piles de pont. [4]

I.5.2.2. Effet des courants d'eaux sur les appuis de ponts

1- Affouillement :

Ont défini l'affouillement comme étant un phénomène provoqué par l'écoulement de l'eau dans les fleuves et les jets. C'est la conséquence de l'action érosive de l'eau, ce qui enlève et érode le matériau du lit et également de la proximité des piles et des Culées de pont) : c'est l'abaissement du niveau du lit d'un fleuve par l'érosion de l'eau tels qu'il y a une tendance à exposer les bases des structures riveraines telles que les ponts. L'affouillement peut être provoqué par les événements d'écoulement normal ou exceptionnels (d'inondation). L'écoulement normal peut abaisser le lit de canal mais l'affouillement est plus accéléré pendant le débit de pointe dans lequel la vitesse d'écoulement est très importante.



Figure I. 24: Un exemple d'affouillement autour des piles de pont.

En d'autres termes, l'affouillement peut se produire dans n'importe quelle condition d'écoulement qui fait éroder le lit à proximité de l'obstruction mais le taux d'affouillement est beaucoup plus prononcé lors de plus grands événements d'écoulement.

L'épaisseur du sol érodé au-dessous d'un niveau normal (généralement le niveau du lit du cours d'eau avant le commencement d'affouillement) est appelée la profondeur de l'affouillement. La fouille ou la dépression est définie comme le vide créé quand le sédiment est enlevé d'un lit. L'affouillement est le résultat de l'érosion du lit d'un oued ou de ces berges. La vitesse de l'eau qui augmente résulte en une augmentation dans les contraintes de cisaillement sur les matériaux au fond du lit créant ainsi une fouille.

Lorsque les contraintes de cisaillement deviennent suffisamment élevées, les matériaux sont soulevés du fond du lit et transportés plus loin avec le flux. L'affouillement c'est le résultat de l'action érosive de l'eau, qui creuse et transporte les matériaux du lit et des berges des cours d'eau autour des piles et des culées des ponts. [5]



Figure I. 25: Un exemple d'affouillement autour d'un culé de pont. [3]

L'affouillement autour des piles et des culées peut avoir comme conséquence l'effondrement des ouvrages et éventuellement des pertes humaines. La détermination du potentiel de l'affouillement est compliquée par la nature cyclique du processus. Les concepteurs et les inspecteurs doivent évaluer soigneusement le potentiel d'affouillement d'un cours d'eau.

Types de l'affouillement :

L'affouillement a été pour longtemps reconnu comme un risque grave vis-à-vis de la performance et de la stabilité des ouvrages. L'affouillement se compose de trois composantes qui, généralement, peuvent être mobilisées ensemble (Richardson et Davies 1995). Elles incluent l'affouillement général, l'affouillement de contraction et l'affouillement local.

a) L'affouillement Général

Ce type d'affouillement traite les changements de l'altitude de lit de fleuve dus à des causes induites naturelles - humaines avec l'effet de causer un abaissement global du profil longitudinal du canal. Il se traduit par un changement du régime de fleuve ayant pour résultat la dégradation générale du niveau de lit. L'affouillement général se développe indépendamment de l'existence d'un pont. Il peut être divisé en dégradation à long et à court terme, où les deux types sont différenciés par le développement temporel. (Cheremisinoff et al. 1987).[4]

L'affouillement général à court-terme se produit en réponse à des inondations, tandis que l'affouillement général à long terme se développe sur une période sensiblement plus longue de temps, habituellement de l'ordre de plusieurs années, et inclut la dégradation progressive et l'érosion latérale des rives.

C'est la diminution générale de l'altitude du lit de la rivière. Il se produit indépendamment de l'existence du pont.



Figure I. 26: L'affouillement général de la rivière de Sg. Jeniang, Kedah [4]

b) L'affouillement localisé

Contrairement à l'affouillement général, l'affouillement localisé est directement attribuable à l'existence d'un pont ou d'autres structures riveraines. L'affouillement localisé peut être divisé en contraction et affouillement local.

c) L'affouillement de contraction

Par convention un rétrécissement est dit local lorsque sa longueur n'excède pas la largeur du lit. Le "pincement" d'un lit entre les culées d'un pont rentre dans cette catégorie. L'affouillement Total.

Ce type d'affouillement se produit en raison de la contraction d'un canal ou d'une voie d'eau, due soit aux moyens naturels ou intervention humaine de la plaine d'inondation. L'effet d'une telle contraction est une diminution de la section d'écoulement et une augmentation de la vitesse moyenne d'écoulement, qui cause par conséquent une augmentation des forces érosives exercées sur le lit du canal, l'effet global de ce phénomène est l'abaissement du lit de canal. Un pont sur un cours d'eau est un exemple de l'affouillement de contraction.

Dans un canal normal où à un croisement de pont, qui comporte le déplacement des matériaux du lit où le domaine d'écoulement est réduit par une contraction normale du canal ou par un pont. [5]

d) L'affouillement local

Il comporte le déplacement du matériau du lit autour d'une structure située dans l'eau. C'est le résultat des changements de champ d'écoulement dus à la présence d'un obstacle. Il est provoqué par l'écoulement turbulent tridimensionnel autour des piles et des culées de pont, par une accélération des vortex d'écoulement résultant de l'obstruction du chemin d'écoulement. Il est caractérisé par la formation des trous d'affouillement autour de la base du pont. [4]



Figure I. 27: Phénomène d'affouillement sur fondation profonde. [4]

Chaque culée, formant une sorte d'obstruction dans le lit de la rivière, crée un obstacle à l'écoulement. Il se forme un ensemble tourbillonnaire responsable de la création d'une fosse d'affouillement de forme approximativement conique et située en amont au droit de l'arête verticale de la culée. L'affouillement local peut se produire en tant qu'affouillement de Clear-water ou affouillement de Live-bed. L'affouillement de Clear-water qui se produit lorsqu'aucun sédiment n'est fourni de l'amont dans la zone d'affouillement.

2- L'érosion du sol :

Parmi les phénomènes qui en résultent, l'érosion des sols sous toutes ses formes représente un enjeu majeur à comprendre, maîtriser et empêcher. L'érosion du sol par l'eau est un grand problème pour les ingénieurs. se produit autour, à l'aval, à l'intérieur ou à la surface des ouvrages hydrauliques. Il conduit à la perte du sol, la vulnérabilité ou même la destruction des constructions hydrauliques en béton (les ponts) ou en terre (les barrages) [5].



Figure I. 28: L'érosion du sol.

3- Abrasion du béton :

Abrasion du béton et fissuration de surface Situation En pied de pile d'un pont franchissant une rivière Cause L'abrasion du béton est essentiellement due à un manque de compacité du béton à la mise en œuvre La fissuration de surface résulte d'un manque d'étanchéité au niveau des joints de coffrage ou de la reprise de bétonnage.



Figure I. 29: Désordre à la base des piles du pont sur Oued Allala (Ténès). [3]

4- L'attaque des Sulfates

Parmi les plus graves pathologies du béton, celle engendrée par la réaction sulfatique interne (RSI) ou externe (RSE). Dans la RSI, la réaction est provoquée par la forte chaleur d'hydratation du ciment dans les pièces massives (semelle, raidisseur de pile, chevêtre...), accélérée par un bétonnage par temps chaud ($T > 35^{\circ}$). Dans la RSE, les sulfates provenant de sources externes au béton, telles que les eaux de mer et eaux séléniteuses, entrent en réaction chimiques avec les autres composants du béton et forment l'anhydrite ; produit qui s'hydrate en gypse secondaire et réagit avec les aluminates de calcium pour former l'ettringite¹⁵ dont, la cristallisation développe des pressions considérables pouvant conduire à la ruine du béton.

Ces pressions engendrent la fissuration du béton ce qui permet à d'autres agents agressifs d'y pénétrer.



Figure I. 30: L'attaque des sulfates sur la pile d'un pont [4]

Il à souligner qu'afin d'éviter la réaction chimique entre les sulfates provenant du sol et les composants du ciment, il faut que des analyses chimiques de l'eau contenue dans le sol d'implantation de l'ouvrage soit entreprise au stade de l'étude. Dans le cas où une présence des sulfates dépassant le taux fixé par les normes est confirmée¹⁶, un ciment résistant aux sulfates doit être utilisé. Cependant, afin d'éviter la RSE, le bétonnage des pièces massives par temps chaud est à proscrire et l'utilisation d'un ciment à faible taux d'aluminate tricalcique ($C3A < 10\%$) est fortement recommandée [4].

I.6. Conception géotechnique des semelles de fondation

I.6.1. Généralités sur les fondations

Une fondation est destinée à assurer la stabilité d'un ouvrage sur le terrain et à transmettre au sol toutes les sollicitations de manière permanente et uniforme. Il existe deux grands modes de transmission des charges des constructions aux couches de sols.

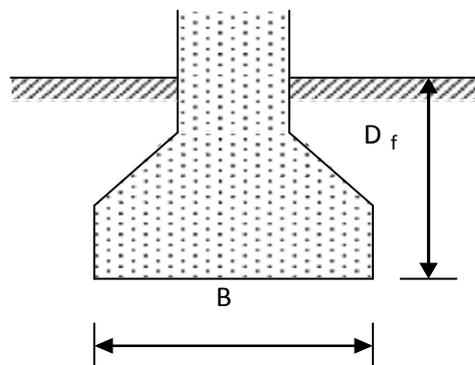


Figure II. 1: Schéma de fondation.

- $\frac{Df}{B} < 4$ Fondation superficielle (semelles filantes ou isolées, radiers).
- $4 < \frac{Df}{B} < 10$ Fondations semi-profondes (puits).
- $\frac{Df}{B} \geq 10$ Fondations profondes (pieux).

Avec :

- ✓ **B** : largeur de la semelle ou la plus petite dimension.
- ✓ **Df** : la profondeur de fondation.

I.6.2. Choix type de fondation

Lors du choix le type de fondation, l'ingénieur d'études doit exécuter cinq étapes successives :

- Obtenir la nature de la superstructure et les charges à transmettre à la fondation,
- Obtenir les informations nécessaires du terrain d'assise (les coupes géologiques, les paramètres géotechniques : l'angle de frottement interne, la cohésion c , le poids propre),

Explorer la possibilité de construire sur n'importe quel type de fondations (superficielles ou profondes) dans les conditions existantes en tenant compte : la capacité portante du sol de

- supporter les charges transmises et les effets nuisibles sur la structure due aux tassements différentiels.
- Une fois qu'un ou deux types de fondations sont choisis sur la base des études préliminaires, effectuer des études plus détaillées. Ces études peuvent exiger la détermination plus précise des charges, des paramètres géotechniques et les dimensions des fondations. Il est nécessaire aussi d'évaluer le tassement afin d'assurer la stabilité de la structure.
- Estimer le coût de chacun des types des fondations, et choisir le type qui représente le plus acceptable entre l'exécution et le coût.

I.6.3. Les principaux types de fondation

➤ **Les fondations superficielles** : ce sont des types de fondation utilisés lors d'une construction sur un terrain ; On distingue trois catégories de fondations superficielles :

1. Les semelles isolées, de section carrée, circulaire ou rectangulaire et supportant des charges ponctuelles.

2. Les semelles filantes dont la longueur est très grande par rapport à la largeur et supportant un mur ou une paroi.
3. Les radiers ou dallage, de grandes dimensions et occupant la totalité de la surface de la structure. Ils ont une épaisseur h dictée par la descente des charges et le calcul béton armé.

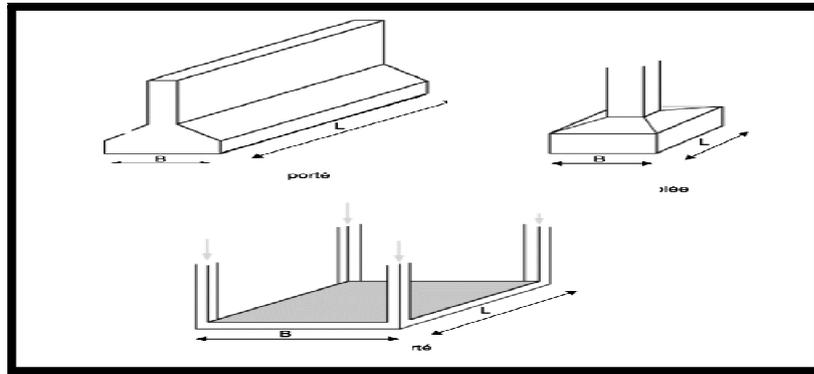


Figure II. 2: Type de fondation superficielle.

- **Les fondations profondes :** Lorsque le sol en surface n'a pas les propriétés mécaniques suffisantes pour supporter les charges par l'intermédiaire de fondations superficielles, soit que sa résistance soit trop faible, soit que les tassements prévus soient préjudiciables à la construction, on fait appel à des fondations profondes ou semi-profondes

- Les Puits :

Pour un sol d'assise stable en faible profondeur compris entre 3 et 8 m, les puits sont la technique de fondation recommandée. Les puits se placent en limite des deux domaines de fondations. Ils se rattachent, par le principe de réalisation, aux fondations profondes, mais sont généralement calculés suivant les règles des fondations superficielles.

Les puits sont creusés à l'aide d'une pelle mécanique ou d'une benne preneuse, pour le réglage du fond il est nécessaire de procéder à une intervention manuelle. Selon la qualité des sols le blindage peut être prévu, provisoire (bois ou cercle métallique) ou définitifs (viroles en béton) pour soutenir les parois de forage.

- Les barrettes :

Les barrettes sont des parois moulées porteuses qui bien que de forme différente et faisant appel à une technique particulière, ont un mode d'exécution et un comportement, généralement comparable à ceux des pieux forés.

Ce dispositif permet de reporter les charges de fondations directement sur un bon sol exactement suivant le schéma des puits. La totalité de la charge est transmise par la base de la barrette.

- Les pieux :

Un pieu est un élément de construction en béton, acier, bois ou mixte permettant de fonder un bâtiment ou un ouvrage. Ils sont utilisés lorsque le terrain ne peut pas supporter superficiellement les contraintes dues à la masse de l'ouvrage. Il est également possible d'utiliser des pieux pour renforcer des fondations existantes

Les pieux peuvent être :

- Préfabriqués battus
- Moulés par tubes battus
- Forés moulés dans le sol.[5]

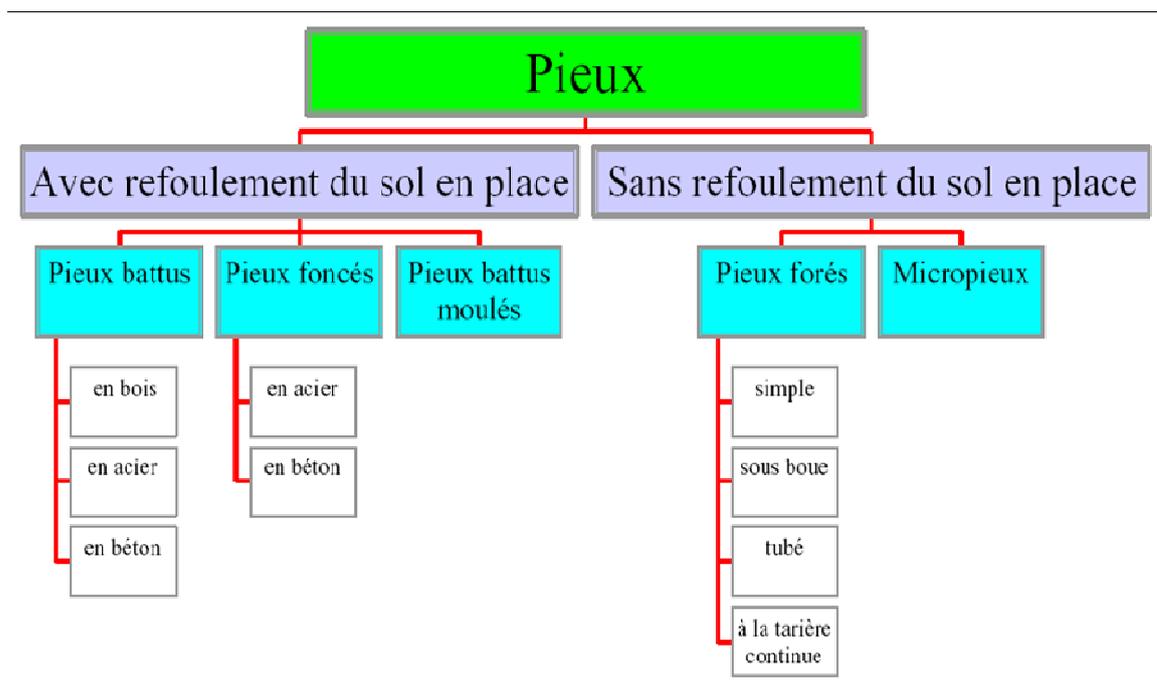


Figure II. 3: Classification des pieux. [5]

1) Pieux battus :

Les principaux types de pieux battus sont les suivant :

- Pieu battu préfabriqué,
- Pieu en métal battu Pieux en béton foncé,

- Pieu tubulaire précontraint Pieu vissé moulé.
- 2) **Pieux forés :**
 - Pieu foré,
 - Pieu foré à la boue et barrette,
 - Pieu foré tubé Micropieux.

On appelle micropieux les pieux forés de diamètre inférieur à 30 cm ou les pieux à refoulement de sol de diamètre inférieur à 15 cm.

3) Longrines

Les longrines, sont en quelque sorte l'équivalent des semelles filantes que l'on applique au cas des fondations profondes. Il s'agit plus précisément de poutres (ou d'un réseau de poutres) en béton armé qui reprennent les charges de la construction et les répartissent sur les fondations profondes en s'appuyant sur les puits et les pieux qu'elles relient entre eux.

➤ Les fondations semi-profondes :

Entre les deux extrêmes, fondations superficielles et fondations profondes, on distingue les fondations semi-profondes dont la base se trouve relativement près de la surface, 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. Il n'y a pas de méthode de calcul propre à cette catégorie de fondations qui ne constituent que des cas particuliers ; il faudra adapter, suivant les cas, les méthodes retenues pour les fondations superficielles ou pour les fondations profondes. On sera notamment guidé par le mode d'exécution ou de mise en œuvre, proche de celui d'une fondation superficielle ou de celui d'une fondation profonde.

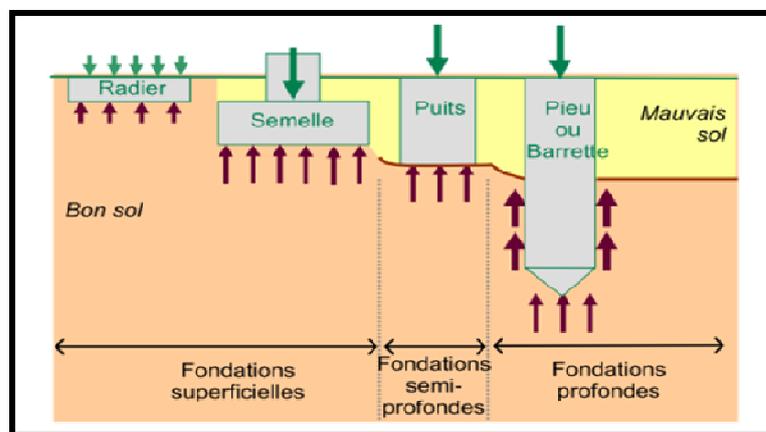


Figure II. 4: Choix le type de fondation.

I.6.4. Le choix des fondations des ponts

Le choix des fondations des ponts s'effectue à partir des critères suivants :

- Les charges transmises au sol par le pont (calculées par la descente de charge) en MN
- La nature du sol caractérisé par sa force portante en MPa,
- Portance du sol : c'est la pression que le sol peut supporter en respectant les valeurs de tassements admissibles pour le pont considéré,
- La contrainte de compression admissible sur le sol,
- Les risques d'affouillements dans le cas d'ouvrage en site aquatique,
- Les phénomènes de tassements qui doivent être compatibles avec l'intégrité des superstructures,
- Les fondations adoptées peuvent être superficielles ou profondes en fonction de la proximité ou de l'éloignement du « bon sol » par rapport au niveau du terrain naturel.

Les particularités naturelles et artificielles du site, la topographie, la structure, le sol, les eaux souterraines, les ouvrages voisins.

I.6.5. Conception des semelles de fondation

La conception des fondations est dictée principalement par la capacité portante de sol en fonction des résultats des essais fait sur site. On dimensionne une fondation adéquate qui peut supporter l'ouvrage en question. Nous commençons par un choix de fondations superficielles de dimensions (a x b). Ou on vérifie la capacité portante, (q_{adm} en fonction de $q_{ouvrage}$). Si la capacité portante n'est pas vérifiée on passe au choix d'un radier au quel on vérifie aussi sa capacité portante. La non vérification mène au choix inévitable de fondation profondes généralement en forme de micropieux et pieux. En cas de vérification de la capacité portante par l'un de trois choix possibles on procède à vérifier le tassement de ces fondations en fonction d'un tassement admissible donnée. Si les fondations choisies sont des pieux on calcule le nombre requis de pieux pour chaque rangée des piles et culées, vérifié le tassement de ces pieux ainsi que la vérification du poinçonnement et soulèvement.

Finalement, on détermine le ferrailage nécessaire pour les fondations choisies en fonction de moment max et N correspondant. [1]

I.6.5.1. Reconnaissance la zone de l'ouvrage

1) Règlements appliqués Pour la conception de pont :

Les règlements appliqués pour la conception de cet ouvrage, il a été pris en compte les normes et les règlements suivants :

- Règles Parasismiques des Ouvrages d'Art (RPOA 2008) ;
- Règles BAEL 91 Rév 99 « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et des constructions en béton armé suivant la méthode des états limites » (*France*) ;
- Fascicule N°62 titre V : règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil ;
- Règles définissant les charges à appliquer pour le calcul et les épreuves des ponts routes(RCPR) ;
- Eurocode7. [5]

2) Sismicité :

Le règlement parasismique algérien des ouvrages d'Art (R.P.O. A2008) a établi des règles, qui sont fonctions de l'intensité de l'action parasismique d'une région, pour tenir compte de la probabilité d'occurrence d'un séisme dans une région d'étude. Ces règles divisent le territoire algérien en cinq (05) zones sismiques :

- ✓ ZONE 0 : sismicité négligeable
- ✓ ZONE I : sismicité faible
- ✓ ZONE IIa : sismicité moyenne
- ✓ ZONE IIb : sismicité élevée
- ✓ ZONE III : sismicité très élevée. [5]

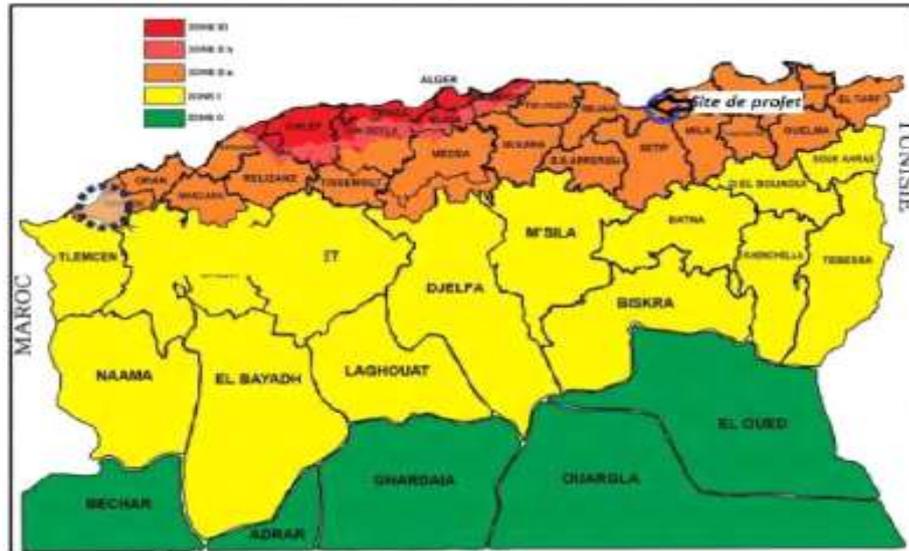


Figure II. 5: Carte de zonage sismique du territoire national. [5]

I.6.5.2. Travaux sur terrain

➤ **Reconnaissance des sols de fondation :**

La reconnaissance des sols de fondation dont le programme est défini par l'ingénieur géotechnicien doit comporter un certain nombre de sondages.

Ces sondages comprennent des forages, des essais in situ et des prélèvements d'échantillons pour examens ou analyses en laboratoire. La profondeur des sondages doit être supérieure à la profondeur des sols sur lesquels les fondations engendrent encore des efforts susceptibles de provoquer à terme des déformations préjudiciables à la bonne tenue de la construction.

Indépendamment des risques d'existence d'accidents naturels ou artificiels (cavités, zones décomprimées, effondrées ou remblayées, etc.), cette profondeur doit être supérieure à celle des surfaces de glissement de masse les plus probables qui pourraient se manifester du fait des modifications temporaires ou définitives apportées par les travaux à la topographie et aux conditions hydrauliques naturelles du site.

➤ **Etude de sol :**

Pour étudier le sol de l'ouvrage on étudie les étapes suivantes :

1- La reconnaissance visuelle. La reconnaissance visuelle peut se faire à l'aide d'une tractopelle ou d'une tarière. Cette reconnaissance permet de rechercher la nature du sous-sol, l'homogénéité du terrain, et d'observer les venues d'eau.

2 - Le forage avec essais pressiométriques. L'essai pressiométrique permet d'obtenir une relation contrainte-déformation traduisant le comportement mécanique du sol en place. Cette technique s'emploie pour connaître la déformation du sous-sol. Elle est recommandée pour les sols cohérents.

3- La mesure de la résistance du sol. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un pénétromètre dynamique. Les sondages de pénétration dynamique permettent de déterminer la résistance dynamique apparente des terrains traversés. Cet appareil convient parfaitement pour les sols sains et les projets de petites tailles.

4- La mesure de frottement et de calcul de tassement. En fonction de la nature du sous-sol du terrain et du projet, un pénétromètre statique sera employé. Les sondages de pénétration statique permettent de déterminer la résistance de pointe et le frottement latéral unitaire des terrains traversés qui conduisent au calcul de tassement.

5- Les essais en laboratoire. Ils permettent de caractériser la nature et la teneur en eau des sols rencontrés et plus particulièrement de préciser leur argilosité.

6 - la consultation des personnes et des documents susceptibles de fournir des informations sur le site, son environnement et sur le mode de fondation des ouvrages existants situés à proximité. [1]

➤ **Environnement des fondations :**

L'étude de l'environnement des fondations, doit être menée en parallèle à celle de la reconnaissance des sols ou du projet proprement dit de l'ouvrage. Elle a pour but de bien définir cet environnement car celui-ci peut avoir une influence non négligeable en ce qui concerne :

- La conception pérenne des fondations de l'ouvrage et de sa structure ;
- Les conditions de réalisation des travaux ;
- L'organisation future du chantier.

➤ **Topographie**

L'établissement d'un relevé topographique le plus précis possible est la première étape. La zone relevée doit être suffisamment large pour d'une part envisager toutes les possibilités

d'ouvrages, et d'autre part définir les possibilités d'accès, les aires disponibles pour les installations du chantier, les stockages ou toute autre installation annexe.

➤ **Dispositions à prendre lors de l'exécution**

Lors de l'exécution des semelles superficielles de fondation, certaines précautions contre l'eau sont prises, essentiellement pour ne pas modifier les caractéristiques du sol d'assise. Il est impératif de protéger le terrain contre les accumulations d'eau lors de l'ouverture de la fouille, par épuisement direct avec rigoles latérales ou par rabattement de la nappe. Il est nécessaire de prévoir entre la semelle de fondation et le terrain d'assise un béton de propreté (béton dosé à environ 150 kg/m³ de ciment) de 5 à 10 cm d'épaisseur. Ce béton permet, d'une part de régler définitivement la surface d'assise, et d'autre part de ménager une surface de travail propre pour le ferrailage et le coffrage de l'élément de fondation.

➤ **La géophysique ou l'étude des profondeurs :**

Son objectif : donner le maximum d'informations pour que les forages soient entrepris ensuite avec le maximum de chance de succès. Il s'agit essentiellement d'accumuler des données sismiques riches en informations, grâce à une sorte d'échographie du sous-sol ou "sismique réflexion". Ces données sont obtenues à l'aide de vibreurs pneumatiques (ou autres) qui génèrent de mini-ébranlements du sous-sol. Les signaux recueillis en surface sont traités par de puissants logiciels de calcul qui reconstituent l'image du sous-sol. Les pièges possibles mis en évidence sont classés selon leur probabilité d'existence et leur volume prévisionnel. Cette étape représente 15 % du budget consacré à la prospection.

I.6.6. Bases de calcul géotechnique

I.6.6.1. Actions à prendre en compte

Les charges d'un pont, On peut classer les charges d'un pont selon 3 catégories :

1- Les charges permanentes : dues au poids propre de la structure du pont et de ses équipements, le poids et la poussée des terres, la précontrainte, le tassement des appuis, variation linéaire du tablier du au retrait et au fluage du béton, etc.

2- Les charges dues au trafic :

A- Variables : camions, trains, piétons, etc.

B- Accidentelles : franchissement du trottoir par un camion, déraillement d'un train.

3- Les charges hors trafic :

A- Variables : effet de la température, de l'eau, du vent, etc.

B- Accidentelles : séisme, incendie, etc.

4- Autres charges :

- Sur remblai
- Neige
- Vent
- Température

Généralement, les fondations sont destinées à supporter deux types d'efforts :

I. Ceux dus à la superstructure : on distingue principalement :

- Les forces verticales (charges et surcharges).
- Les forces horizontales (efforts dus au vent, séisme...).
- Les moments de flexion ou de torsion (exemple : moment d'encastrement au pied du poteau).

II. Ceux dus au sol de fondation :

- Les forces verticales ascendantes ou descendantes,
- Les forces horizontales et obliques (poussées, frottements...etc.),
- Les forces hydrostatiques (poussées hydrostatiques).

1.6.6.2. Propriétés des terrains

Les actions dues au sol peuvent être distinguées en des :

- Actions d'origine pondérale (terrains en place ou matériaux rapportés) qui sont considérées comme permanentes dans les combinaisons et dont les valeurs ;
- Actions de poussée et de butée, qui sont considérées comme permanentes ;
- Les pressions du sol agissant sur une semelle superficielle, sont traitées comme une action et évaluées selon des modèles de calcul appropriés ;
- Les actions transmises par le sol sont considérées comme permanentes ou variables selon leur durée d'occurrence par rapport à la situation de projet en cause ;
- Les actions dues à l'eau du sol ;
- Et les actions provenant des structures enterrées avoisinantes.
- Les actions issues d'un déplacement d'ensemble du sol (tassement, gonflement ou retrait),

Les actions géotechniques peuvent changer pendant les calculs, considérer alors une première approximation pour commencer l'étude. Toute interaction entre la structure et le terrain doit être prise en compte. La durée des actions est jugée par comparaison avec les effets du temps sur les propriétés mécaniques des sols, notamment les propriétés de drainage et de compressibilité des sols fins.

Le choix des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques, doit s'appuyer sur les valeurs mesurées et les valeurs dérivées des essais en place et/ou en laboratoire, complétées par les enseignements de l'expérience. La valeur caractéristique d'un paramètre géotechnique, doit être une estimation prudente de la valeur qui influence l'occurrence de l'état limite.

I.6.6.3. Données géométriques

Les facteurs partiels sur les actions et les propriétés des matériaux tiennent compte des variations mineures des données géométriques. La cote et la pente de la surface du terrain, les niveaux d'eau, les niveaux des interfaces entre les couches, les niveaux des excavations et les dimensions des structures géotechniques, doivent être traités comme des données géométriques.

Chapitre II :
Approche géotechnique et donnée
hydrologique

Approche géotechnique et donnée hydrologique

II.1. Etude hydrologique et hydro gramme des crues

II.1.1. Généralités sur les crues

L'hydrologie est la science qui traite de la présence et de la distribution des eaux sur la terre, avec leurs propriétés chimiques, biologiques et physiques, et de leur interaction avec l'environnement physique. Chow et al. (1988) déclare que l'hydrologie est un sujet de grande importance pour la santé humaine et l'environnement, qui traite toutes les phases de l'eau terrestre.

Il a de nombreuses utilisations pratiques telles que la conception et le fonctionnement de la structure hydraulique, l'approvisionnement en eau, les eaux usées, l'irrigation, lutte contre les inondations, l'érosion et la sédimentation, réduction de la pollution et ainsi de suite. L'estimation de débit de crue d'un cours d'eau a toujours été un problème central en hydrologie et demeure à ce jour.

L'analyse des principaux processus de formation des crues est très importante pour une évaluation fiable des crues. Il a été reconnu que l'écoulement de l'eau dans le milieu naturel est un processus très complexe et difficile à comprendre. Cela est dû à la variété et l'hétérogénéité des milieux dans lesquels l'eau se déplace. Dans les régions arides, l'étude des débits de crues est de très grande importance de fait que les ressources hydriques sont vulnérables et les crues sont généralement rares mais souvent catastrophiques. La formation d'une crue provient de deux phénomènes successifs : la précipitation puis le transfert de ces précipitations de l'ensemble de bassin versant vers les réseaux hydrographiques par différents processus hydrologiques. [9]

II.1.2. Définition de crue

En général, une crue est définie comme une ou plusieurs augmentation rapide et exceptionnelle du débit de cours d'eau pendant une durée déterminée durant laquelle le débit dépasse un certain multiple du débit moyen annuel, suivie d'une décrue jusqu'à un niveau de débit voisin de celui de départ. La crue est simple si elle présente une seule pointe et complexe si elle présente plusieurs pointes. La crue doit être distinguée de l'inondation. L'inondation correspond au débordement des eaux hors du lit mineur en rivière ou des berges d'un lac. Une crue ne conduit pas nécessairement à une inondation.

II.1.3. Caractéristiques d'une crue

Les crues représentent une quantité d'eau "extraordinaire" qui est transportée par un système hydraulique (lacs et cours d'eau). La notion d'extraordinaire est définie à partir de différentes caractéristiques. La crue s'identifie et se détermine lorsque le débit (ou la hauteur d'eau) au droit d'une ou de plusieurs sections spécifiques de la rivière dépasse un seuil donné, en général un quantile nettement supérieur à la valeur moyenne (75%, 80%, 90%...). Un hydro-gramme de crue n'est pas caractérisé seulement par la valeur de son débit de pointe mais aussi par la valeur du volume de pointe ainsi que saturée. Les principales caractéristiques d'une crue sont représentées dans la figure ci-après :

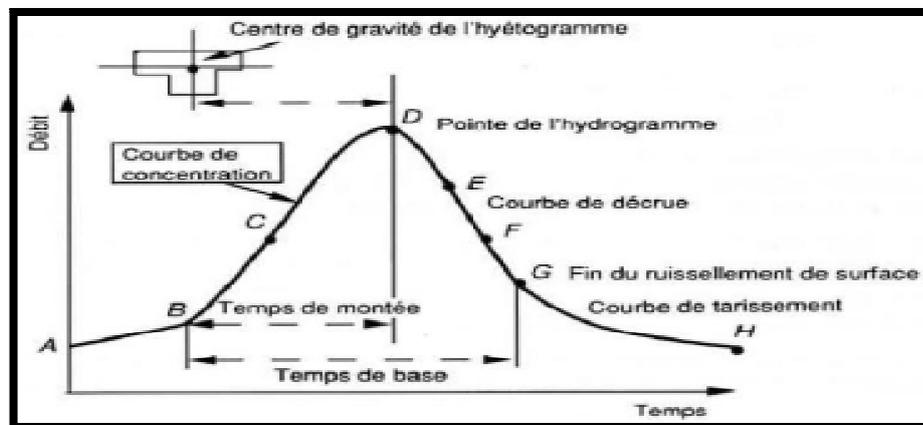


Figure II. 6: Caractéristiques d'un hydro-gramme de crues. [9]

Pour caractériser un épisode de crue, il existe un grand nombre de variables-clefs dont les valeurs conditionnent la sévérité des crues :

1. Le débit de pointe de crue Q_p (m^3/s) ;
 2. La durée caractéristique D durant laquelle le débit reste supérieur à $Q_p/2$;
 3. Le volume V ruisselé ;
 4. La vitesse d'écoulement (m/s) ;
 5. La fréquence d'apparition.
- ✓ Hydro-gramme de type 1 : ce hydro-gramme est caractérisé par une seule pointe annuelle nette ;
 - ✓ Hydro-gramme de type 2 : Ce hydro-gramme est caractérisé par deux pointes annuelles nettes ;
 - ✓ Hydro-gramme de type 3 : C'est un type complexe d'hydro-gramme, ou on peut observer plusieurs pointes annuelles nettes

Les différents paramètres cités plus haut peuvent être définis comme suit :

1. Le débit de pointe : appelé aussi débit maximal d'une crue, il caractérise l'intensité d'une crue pour une probabilité donnée, c'est un débit instantané difficile à déterminer.
2. La durée de la crue : c'est le temps pendant lequel le débit du cours d'eau dépasse un seuil fixé (débit de base).
3. Le temps de montée de la crue : c'est le temps nécessaire pour atteindre le débit de pointe, c'est un temps assez rapide.
4. Le temps de base de l'hydro-gramme : il comprend le temps de montée et le temps de décrue, c'est le temps entre le début de la crue jusqu'au retour vers le débit de base.
5. Le volume de crue : c'est le volume d'eau transitée par un cours d'eau pendant toute la durée de la crue, il représente l'intégrale de l'hydro-gramme de crue.
6. La courbe de montée de la crue : c'est la partie représentée par le segment A-B qui est l'augmentation du débit, elle est aussi appelée courbe de concentration et correspond au temps de montée de la crue ;
7. La courbe de décrue : elle représente la diminution progressive de débit et le retour vers le débit de base

II.1.4. Origine de la formation des crues

Plusieurs origines des crues sont possibles issues de différentes situations :

✓ **Événements hydrométéorologiques intrinsèques ou combinés :**

Précipitations extraordinaires (liquides ou solides) en intensité et/ou en durée. Fonte extraordinaire de neige ou de glace (due à des températures tout aussi extraordinaires), ou fonte « normale » mais combinée avec d'autres événements (précipitations).

✓ **Embâcle ou débâcle de glace, de matériaux flottants (bois) :**

Les crues d'embâcle ou de débâcle de glace sont provoquées par le dégel printanier dans les régions où les cours d'eau gèlent durant l'hiver. Cette situation est caractéristique des régions froides comme la Sibérie ou le Canada mais est également possible en Suisse. Le dégel entraîne la mise en mouvement de blocs de glace qui peuvent s'accumuler au droit d'un obstacle. La retenue ainsi formée peut entraîner d'une part une élévation du niveau de l'eau à l'amont et des inondations par débordement. D'autre part, il est possible que la retenue serompe brusquement, impliquant une crue brutale

II.1.5. Typologie des crues

Nous avons retenu deux sortes de classification pratiques : la première basée sur les conditions d'écoulement de la crue et la seconde basée sur les évènements générateurs.

1- Classification selon les conditions d'écoulement :

- Les crues lentes : cette lenteur est à la fois celle de la variation des côtes et débits en un point donné et celle de la propagation de l'onde de crue. Elles touchent la partie aval des cours d'eau où les pentes sont faibles et sont appelées par fois crues de plaine.
- Les crues torrentielles : à l'apposé des précédentes, elles se caractérisent par de fortes variations de côtes et de débit, avec notamment une croissance des débits en quelques heures. On distingue :
 - Les crues rapides ;
 - Les laves.
- Les crues-éclair : provoquées par des précipitations particulièrement intenses, orageuses et des conditions favorisant le ruissellement et la concentration des volumes précipités, sont souvent d'autant plus violentes que la taille du bassin versant concerné est limitée. Parmi ces crues qui ont un temps de montée très court (une à quelques heures), on distingue :
 - Rouleau ondes ;
 - Les crues éclair de plaine ;
 - Les crues éclairs torrentiels ;
 - Les crues éclair urbaines ou périurbaines.

2- Classification selon les évènements générateurs :

- Les crues océaniques : générées par le passage de grandes dépressions en provenance de l'Atlantique, peuvent survenir de façon isolée (crue simple), mais également par train de perturbations successives créant des pics multiples en débit (crue double, crue multiples) et couvrir de très grande surface.
- Les crues méditerranéennes : peuvent toucher de grands espaces (crues méditerranéennes extensives) intéressantes ou être moins étendues, mais violentes notamment sur les reliefs (crues cévenoles). Elles sont favorisées par le phénomène de « goutte froide » qui renforce les instabilités provoquées par les masses d'air froides et chaudes qui entrent en contact.

—

II.1.6. Les processus de formation des crues

Cette section présente un aperçu des principaux processus pouvant être impliqués dans les crues rapides méditerranéennes.

1- La pluie :

Les précipitations constituent théoriquement l'unique apport d'eau du bassin versant ;
On distingue généralement deux types de précipitations :

- Les précipitations stratiformes de faible intensité et longue durée touchant de vastes étendues,
- Les précipitations convectives de forte intensité et faible durée touchant de plus petites surfaces.
- Contrairement aux précipitations stratiformes, les précipitations convectives sont caractérisées par une variabilité spatiale et temporelle importante.

2- Le ruissellement direct :

Etant donnée la rapidité des crues méditerranéennes, un ruissellement direct (ou ruissellement de surface) sur une grande partie du bassin peut être considéré pour expliquer la formation de ces crues.

Le ruissellement hortonien (Hortonien ou infiltration excess runoff) se produit lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration des sols. On parle de saturation par le haut ou de refus à l'infiltration. Ce type de ruissellement se forme pour des intensités de pluies importantes et sur des sols imperméables ou très peu perméables.

Le ruissellement hortonien a longtemps été invoqué pour expliquer la formation des crues rapides méditerranéennes, compte tenu des intensités importantes des précipitations

II.1.7 Période de retour d'une crue

L'une des plus importantes caractéristiques d'une crue est bien la période de retour. Il est donc nécessaire de l'introduire dans cette partie du travail. La période de retour notée T est définie comme étant l'intervalle de temps moyen, entre deux événements dont l'intensité a atteint ou a dépassé un seuil donné noté s . La période de retour T , est comptée dans une unité de temps arbitraire, dans l'hydrologie, c'est le plus souvent l'année. Pour un événement de période de retour T , la probabilité de cet événement de se produire chaque année est $1/T$. [9]

II.2. Etude de la pluviométrie pour wilaya de Blida

II.2.1. Généralité sur la pluviométrie

II.2.1.1. Définition

La pluviométrie est l'évaluation quantitative des précipitations, de leur nature (pluie, neige, grésil, brouillard) et distribution. Elle est calculée par diverses techniques. Plusieurs instruments sont utilisés à cette fin, dont le pluviomètre/pluviographe est le plus connu. L'unité de mesure varie selon que le type de précipitations est solide ou liquide, mais elle est ramenée en millimètre d'équivalence en eau par mètre carré de surface afin de comparaisons. Toute précipitation de moins de 0,1 mm est qualifiée de « trace ». La pluviométrie, avec la répartition de la température terrestre, conditionne les climats terrestres, la nature et le fonctionnement des écosystèmes ainsi que leur productivité primaire. Elle est l'un des facteurs conditionnant le développement des sociétés humaines et donc un enjeu géopolitique.

II.2.1.2. Mesure de la pluviométrie

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation.

On exprime généralement les précipitations en hauteur ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale (mm), Un millimètre équivaut à un litre dans un espace d'1m² ; on utilise cette unité parce qu'elle permet de mesurer la pluviométrie dans n'importe quelle surface. Si on rapporte cette hauteur d'eau à l'unité de temps, il s'agit d'une intensité (mm/h). La précision de la mesure est au mieux de l'ordre de 0,1 mm. L'enregistrement des pluies en général, et des averses en particulier, se fait au moyen de divers appareils de mesure. Les plus classiques sont les pluviomètres et les pluviographes, enregistrement mécanographique ou digital. Au contraire de ces approches ponctuelles, il existe aussi des méthodes de mesures globales fondées sur les méthodes radar et la télédétection.

On mesure la pluviométrie par un instrument appelé " pluviomètre", qui est l'instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la pluie globale précipitée dans l'intervalle de temps séparant deux relevés. Le pluviomètre est généralement relevé une fois par jour (en Suisse, tous les matins à 7h30). La hauteur de pluie lue le jour j est attribuée au jour j-1 et constitue sa "pluie journalière" ou "pluie en 24 heures". Si la station

pluviométrique est éloignée ou difficile d'accès, il est recommandé de recourir au pluviomètre totalisateur. Cet appareil reçoit les précipitations sur une longue période et la lecture se fait par mesure de la hauteur d'eau recueillie ou par pesée. En cas de neige ou de grêle on procède à une fusion avant mesure. Un pluviomètre se compose d'une bague à arête chanfreinée, l'orifice qui surmonte un entonnoir conduisant au récepteur (seau). Pour uniformiser les méthodes et minimiser les erreurs, chaque pays a dû fixer les dimensions des appareils et les conditions d'installation. Chaque pays a pourtant son type de pluviomètre, dont les caractéristiques sont toutefois peu différentes. En France, c'est le type SPIEA qui est utilisé (surface réceptrice de 400 cm²) ; en Suisse, nous utilisons le pluviomètre de type Hellman, d'une surface de 200 cm². La quantité d'eau recueillie est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée. Le choix du site du pluviomètre est très important. Les normes standards sont basées sur le principe qu'un site est représentatif et caractérisé par l'absence d'obstacles à proximité.

La hauteur au-dessus du sol de la bague du pluviomètre est également déterminante pour une mesure correcte de la pluie. En effet, les effets du vent créent un déficit en eau, dans le cas où le pluviomètre serait en position élevée. Aussi, malgré les erreurs de captation, les normes préconisent que la surface réceptrice des pluviomètres (et pluviographes) soit horizontale et située à 1,50 m au-dessus du sol ; cette hauteur permet de placer facilement l'appareil et évite les rejaillissements. [9]



Figure II. 7: Le Pluviomètre [9]

II.2.1.3 Contraintes de mesure des précipitations :

Les principaux problèmes rencontrés pour la mesure des précipitations concernant

- Perturbation des mesures par la circulation atmosphérique : Les obstacles (végétation, construction, le pluviomètre lui-même, ...) à la circulation de l'air perturbent les trajectoires des précipitations lorsque le vent est violent. Par exemple, lors

d'averses violentes, les mesures de pluies sont affectées par l'inclinaison globale des filets de pluie (angle d'incidence) et par les turbulences de l'atmosphère au voisinage de l'impluvium. Parfois, seule une faible proportion de l'eau tombant au sol est captée par le pluviomètre. En effet, il a été montré que l'angle d'incidence de la pluie est une fonction croissante de la vitesse et du caractère ascendant du vent. Par ailleurs, cet angle est d'autant plus important que le diamètre des gouttes de pluie est faible.

- S'il on plaçait le pluviomètre au niveau du sol (enterré), le rebond des gouttes ou fragment de gouttes d'eau sur la modénature pouvant changer au cours de l'averse perturberait aussi la mesure. De plus sur une longue période de la croissance de la végétation pourrait porter atteinte à l'uniformité des conditions de mesures. La fragilité du système de mesure serait aussi accrue vu l'accessibilité des appareils pour les animaux par exemple.
- Pour les systèmes à mesure totale des précipitations, il faut prendre garde à ce que le cumul de précipitation ne soit pas évaporé entre les mesures.
- Nécessite d'enregistrer les données.
- Choix de la localisation pour assurer la fiabilité, la reproductibilité, et une certaine homogénéité des mesures d'un point à l'autre.

II.2.1.4. Variabilité spatio-temporelle des précipitations

Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte. D'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

a/ Variabilité temporelle des précipitations :

Les précipitations n'ont cessé de fluctuer à toutes les échelles de temps. L'étude de variabilité des précipitations est importante pour toute étude hydrologique. Également, elle est d'un apport considérable dans l'étude des changements climatiques. Le climat et plus exactement les précipitations ont connus des variations importantes ; un réchauffement et une baisse des précipitations sont observés depuis la moitié des années 1970 à l'échelle globale et à l'échelle régionale « méditerranée ». La circulation atmosphérique générale joue un rôle déterminant dans la variation du climat méditerranéen (notre zone d'étude) qui se trouve plus influencée par l'oscillation nord atlantique. Pour détecter d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, peut être déterminé par un certain nombre de tests statistiques :

- Indices pluviométriques : Les outils non statistiques, comme les indices pluviométriques, permettent d'étudier la variabilité climatique. Les indices les plus utilisés pour la caractérisation du régime pluviométrique et qui font l'objet de plusieurs études, notamment dans le suivi de la sécheresse qui sont :

- Indice de sécheresse de Palmer (PDI) :

Cet indice mesure la différence d'approvisionnement en humidité pour les phases sèches et pour les phases humides. Il est calculé pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales. Étant donné que ces indicateurs sont normalisés, il est possible de comparer différentes régions.

b/ Indice pluviométrique standardisé

L'indice pluviométrique est un outil très intéressant pour caractériser les années sèches et les années humides. Il met en évidence la répartition temporelle de ces années. L'indice standardisé de précipitation « SPI » (standardized precipitation index) a été développé en 1993 en vue de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée. Il reflète l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Cet indice est calculé surtout lorsque la précipitation n'est pas normalement distribuée, notamment pour des périodes inférieures à 12 mois.

Le SPI fait ressortir deux périodes bien distinctes : une période excédentaire (1936,1975), suivie d'une période déficitaire (1976,2001), la décennie 1966-1976 apparaît la plus excédentaire et la décennie 1986-1996 la plus déficitaire. La période (2002,2008) apparaît comme excédentaire à l'est du nord Algérien, par contre, elle indique un retour vers la normale à l'Ouest et au centre de la zone d'étude.

II.2.2. Présentation de la zone d'étude

II.2.2.5. Situation géographique

Situé à environ 182,8 m au-dessus de la mer Méditerranée, elle se trouve au sud de l'Atlas, sous la montagne de Chrea. Les montagnes de l'Atlas tellien sont un ensemble de montagnes reliées situées au nord de l'Afrique, s'étendant sur 1500 km du Maroc en passant à travers l'Algérie jusqu'à la Tunisie. La mer Méditerranée est située en face des montagnes de l'Atlas. Blida se trouve au cœur de la vaste plaine fertile Mitidja et à 22,5 km du bord de mer méditerranéen le plus proche. Les vastes montagnes de l'Atlas protègent la ville des vents secs

du sud des hauts plateaux de l'Algérie. Blida et ses villes et villages voisins bénéficient du climat méditerranéen, propice à l'agriculture tout au long de l'année.

II.2.2.2. Situation climatique

Tableau II. 1: Tableau climatique Blida. [6]

	jan	Fév	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	déc.
Température Moyenne°C	9.5	9.8	12.4	14.8	18.1	22.4	25.8	26	22.7	19.3	13.7	10.7
Température Min °C	5.9	5.9	8.1	10.1	13	15.8	20	20.7	18	14.9	10.2	7.4
Température max°C	13.8	14.2	17	19.6	22.9	27.7	31.4	31.7	28	24.4	17.9	14.8
Humidité	76%	74%	72%	71%	69%	61%	56%	57%	64%	67%	73%	76%
Jour de pluie	8	7	7	7	5	2	0	2	5	6	9	8

Commentaire :

Data : 1991 - 2021 Température minimale moyenne (°C), Température maximale (°C), Précipitations (mm), Humidité, Jours de pluie. Data : 1999 - 2019 : Heures de soleil.

Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 82 mm. Entre la température la plus basse et la plus élevée de l'année, la différence est de 16.5 °C.

II.2.2.3. Données pluviométriques et hydrométriques

Les données pluviométriques et hydrométriques sont données selon le tableau suivant :

Tableau II. 2: Historique de pluviométrie de Blida (2014-2021). [8]

	jan	fév	Mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	dec	année
2014	21	40	129	19	32	83	8	11	37	29	32	55	496mm
2015	71	173	102	12	22	5	1	26	41	110	42	7	612mm
2016	70	59	211	96	48	19	9	2	20	30	54	139	757mm
2017	199	24	52	12	26	40	1	11	17	42	92	107	623mm
2018	40	95	134	207	92	73	3	1	22	71	95	197	1030mm
2019	129	28	65	99	35	19	9	10	83	28	186	26	627mm

2020	39	1	120	153	24	7	1	3	71	29	82	165	555mm
2021	56	16	144	84	74	21	1	5	5	4	137	16	563mm

II.2.2.4.Pluviométrie mensuelle moyenne à Blida

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Blida connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles. La période pluvieuse de l'année dure 9,4 mois, du 30 août au 11 juin, avec une chute de pluie d'au moins 13 millimètres sur une période glissante de 31 jours. Le mois le plus pluvieux à Blida est décembre, avec une chute de pluie moyenne de 59 millimètres.

La période sèche de l'année dure 2,6 mois, du 11 juin au 30 août. Le mois le moins pluvieux à Blida est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 3 millimètres. [8]

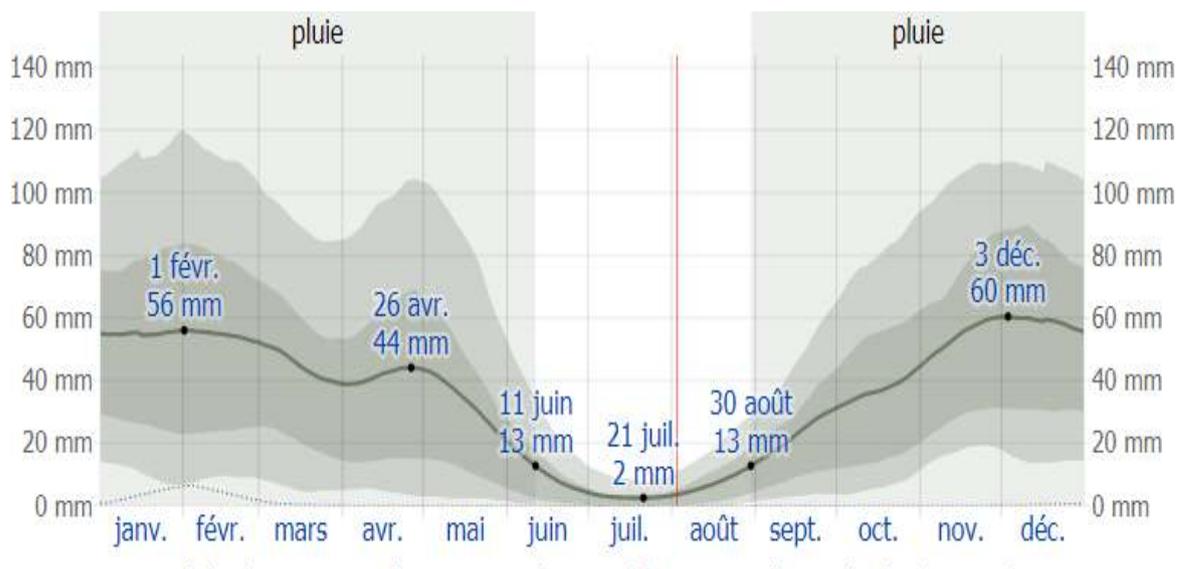


Figure II. 8: Pluviométrie mensuelle moyenne à Blida. [8]

Commentaire :

La quantité de pluie moyenne (ligne continue) accumulée au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur le jour en question ; La fine ligne pointillée représente la chute de neige moyenne correspondante. Le bassin versant de la Chiffa fait partie du bassin côtier du centre "Mitidja" (grand bassin Côtier Algérois), il s'inscrit entre les latitudes 36° 15' et 36° 25' Nord et entre les longitudes 2° 40' et 3° Est , ayant une superficie totale de 309 km2. [8]

II.3. Etude des débits maximaux pour oued Chiffa

II.3.1. Présentation du bassin versant de la Chiffa

II.3.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Chiffa fait partie du bassin côtier du centre "Mitidja" (grand bassin Côtier Algérois), il s'inscrit entre les latitudes $36^{\circ} 15'$ et $36^{\circ} 25'$ Nord et entre les longitudes $2^{\circ} 40'$ et 3° Est (Figure II.1), ayant une superficie totale de 309 km².

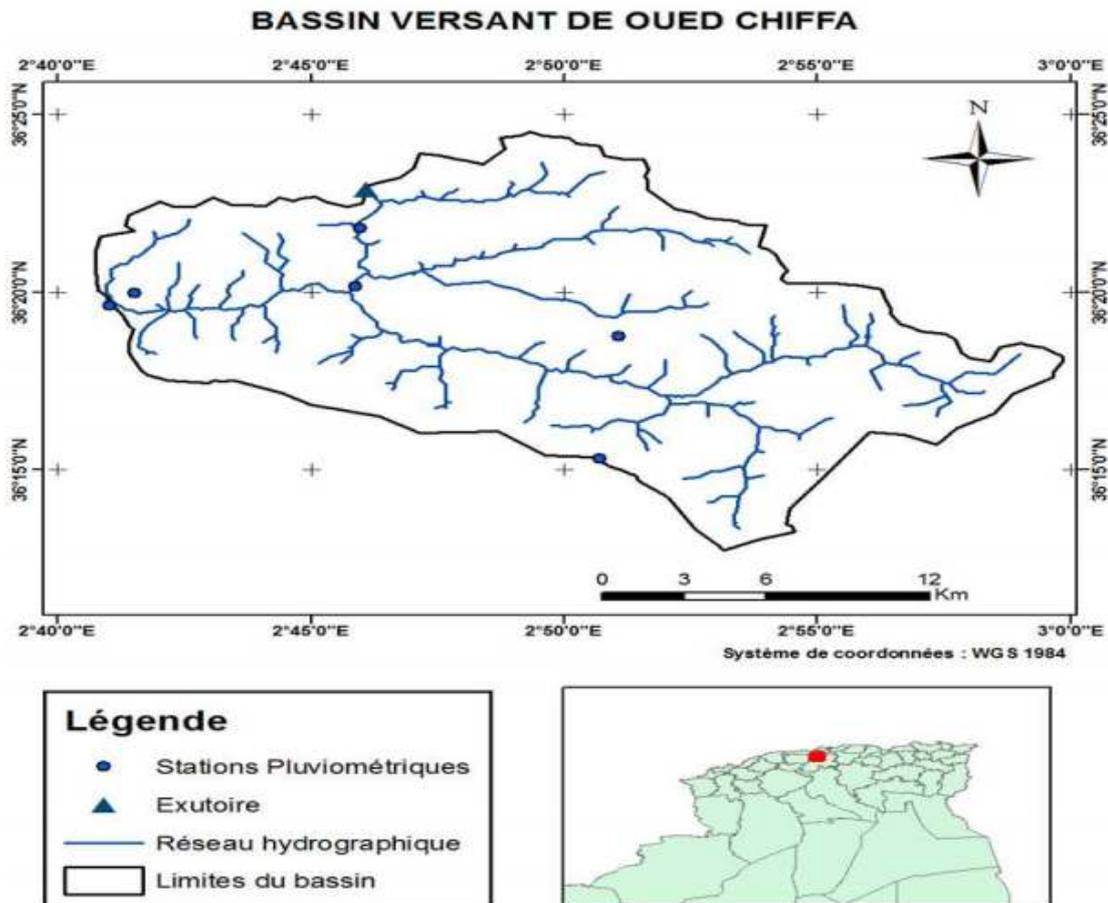


Figure II. 9: Situation géographique du bassin versant de l'Oued Chiffa. [9]

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

- Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre.

$$A=309 \text{ km}^2$$

- Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.

$$P=73 \text{ km}$$

- Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (Kc) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante :

$$Kc = ,028 \frac{p}{\sqrt{A}}$$

Kc : Indice de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre du bassin versant en km ;

A : Superficie du bassin versant en km²

$$Kc = 1.17$$

- Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même

répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau [10].

- Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (LOG) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a une confluence et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à la confluence sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

LT = 35 km

Les courbes hypsométriques sont d'une grande importance dans l'étude du relief du bassin versant la figure ci-dessous les représente :

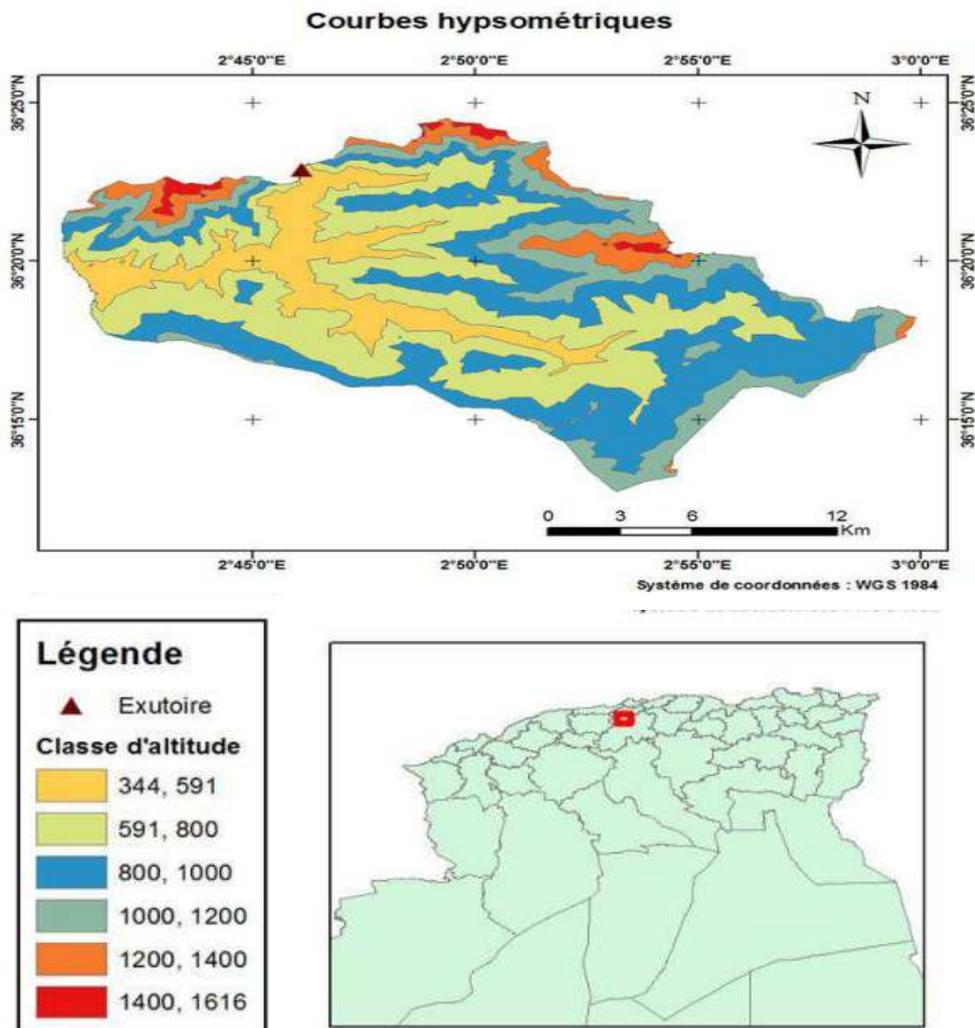


Figure II. 10: Courbes hypsométrique du bassin versant de l'Oued Chiffa [8]

II.3.2.Climat de Chiffa

La région d'étude jouie d'un climat méditerranéen avec une température moyenne d'environ 17 C° et d'un cumul de pluie qui atteint les 750 mm, la répartition des températures et des pluies seront détaillées dans ce qui suit.

-Températures : La période choisi s'étale sur 35 ans de 1979 à 2013 le tableau suivant résume la distribution interannuelle de la température.

Tableau II. 3: Répartition interannuelle des températures l'évapotranspiration bassin versant de la Chiffa. [9]

MOIS	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sept	oct	nov	déc
Température moyenne C°	8.6	8.8	11.2	13.3	17.1	22.1	26.1	26.4	23	18.9	13.5	9.8

On remarque le mois d'Aout affiche une valeur maximale de 26.4 C° par contre le mois le plus frais est celui de Janvier avec 8.6 C°.La période des observations est de 1969 jusqu'à 2013, dans le tableau cidessous ou, on trouve la répartition interannuelle de la pluie.

Tableau II. 4: Répartition interannuelle des précipitations pour le bassin versant de la Chiffa. [17]

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	déc
Précipitation interannuelles (mm)	101.2	106	93.7	48.9	52.7	13.6	6.6	10.3	35.3	63.3	95.2	120.7

La constatation qui peut être faite est que le mois le plus pluvieux est celui de Décembre avec 120.7 mm et de l'autre part on trouve juste 6.6 mm pour le mois de Juillet considéré comme le moins pluvieux.Les valeurs de la pluie ont été obtenues grâce à la méthode de Theissen qui est une méthode purement géométrique très utilisées dans la détermination de la précipitation moyennereprésentative de l'ensemble du bassin versant.Pour ce faire un nombre de 6 stations pluviométriques ont été prise en compte dans le calcul, réparties à travers notre bassin comme le montre la figure suivante [9].

II.3.3.Le débit maximum de oued Chiffa

Le débit maximum de oued Chiffa est donné par le tableau suivant.

Tableau II. 5: Débit max de oued Chiffa [18]

Le débit maximum	Année d'étude
730.0 m ³ /s	1969 à 2017

II.4. Paramètre de données hydrologique pour calcul de pont

Les avantages d'une bonne conception hydraulique sont considérables, tant sur le plan hydraulique que sur le plan économique et environnemental. En effet, une bonne conception hydraulique peut entraîner une diminution des coûts de construction de façon appréciable et une réduction des problèmes hydrauliques à long terme tels que l'érosion des berges, l'affouillement de lits de cours d'eau, les embâcles de glaces et de débris, etc. Pour plusieurs traversées de rivière, il est nécessaire de diviser la conception hydraulique en deux phases ; préliminaire et finale. Ceci parce que l'étude géotechnique pour les fondations et le relevé d'arpentage ne peuvent souvent être entrepris avant de s'être formé une bonne idée sur la localisation, la longueur et l'aménagement du futur pont. Le but de la conception préliminaire est de fournir cette information. Le stade de la conception préliminaire se termine généralement par une série de recommandations provisoires.

L'organigramme illustre la procédure de la conception préliminaire. La conception hydraulique finale est entreprise lorsque l'étude géotechnique et le plan de topographie du site sont disponibles. À ce stade, la localisation, la longueur et l'aménagement du pont sont finalisés et les détails essentiels, tels que la protection contre l'affouillement, sont déterminés. La conception hydraulique se termine par la préparation d'un rapport regroupant les recommandations finales. Plus tard, les aspects hydrauliques du plan du pont préparé par le concepteur de la structure, sont examinés à des fins de commentaires.

II.4.1. Conception préliminaire

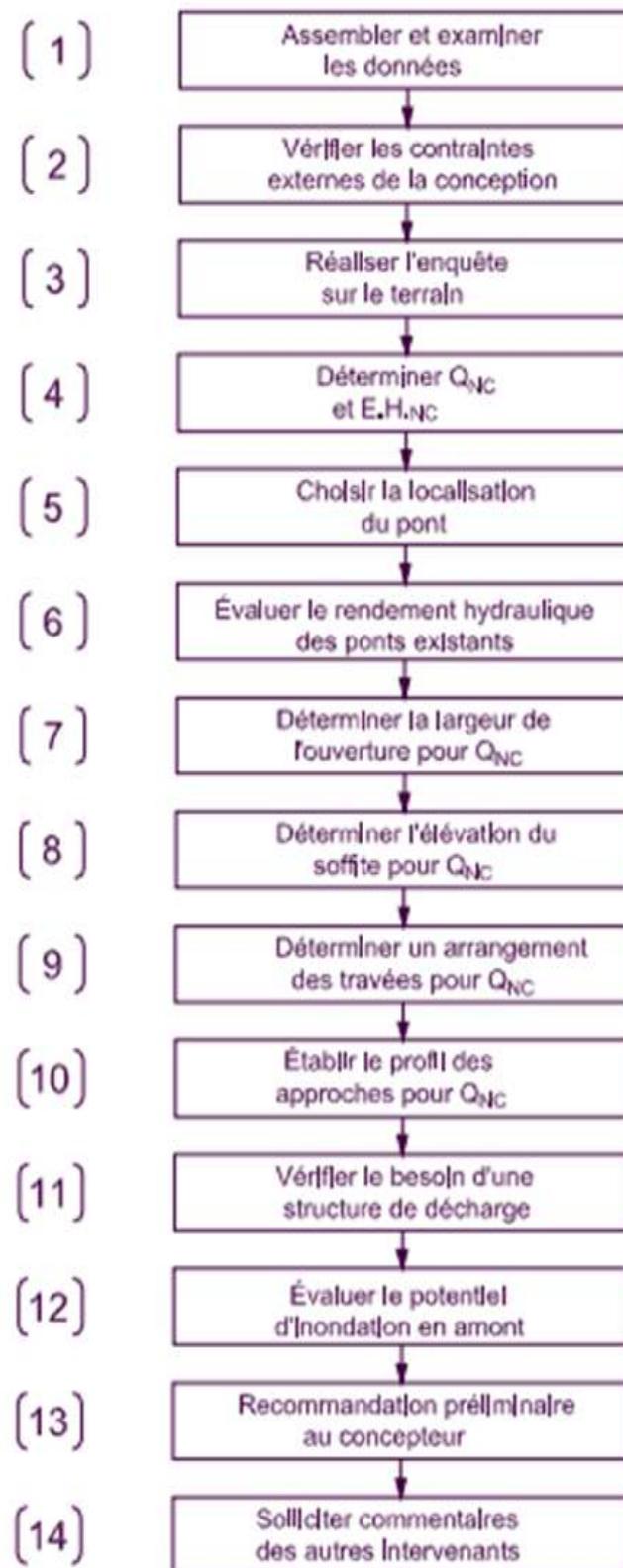


Figure II. 11: Organigramme de conception hydraulique préliminaire

II.4.2. Les données hydrauliques et environnement

Dans le cas du franchissement d'un cours d'eau, le régime hydraulique doit être parfaitement défini : fréquence et importance des crues, débit solide, charriage éventuel de corps flottants susceptibles de heurter les piles. Dans la démarche moderne de conception des ponts, une étude hydraulique est en général faite en amont. En France cette étude a pour objet d'évaluer les incidences de la réalisation de l'ouvrage sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, mais aussi d'appréhender l'impact du cours d'eau sur l'ouvrage, et de déterminer l'ensemble des données nécessaires à sa conception et à son dimensionnement et à celui des aménagements connexes. Elle doit également définir les mesures de protection des écosystèmes aquatiques et de la qualité de la ressource en eau.

La présence d'un ouvrage en travers d'un cours d'eau introduit une perte de charge singulière, portant sur la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement. Le pendant de cette dissipation d'énergie est, pour l'ouvrage, une force de traînée qui, en cas de résistance insuffisante de l'ouvrage, peut entraîner sa ruine. Les ponts en maçonnerie avaient des piles très massives. Les vides (ouïes) qui étaient pratiqués dans le tympan permettaient un écoulement aisé de l'eau et réduisaient ainsi la charge hydraulique sur l'ouvrage.

Le pont est aujourd'hui conçu pour une crue dite crue de dimensionnement, puis le projet est vérifié pour une crue supérieure. Ainsi le pont doit limiter ses impacts hydrauliques à des valeurs admissibles pour la crue de référence du risque d'inondation, à savoir, les PHEC (Plus Hautes Eaux Connues) si la valeur du débit correspond à une période de retour au moins centennial. Il doit par ailleurs être vérifié qu'aucune aggravation du risque d'inondation n'est possible par la présence de l'ouvrage ou sa défaillance lors des crues exceptionnelles dépassant la crue de dimensionnement. Une valeur de débit correspondant à une période de retour compris entre 200 et 500 ans est en général retenue pour cette vérification.

Mis à part les chocs, le plus grand danger réside pour les ponts modernes dans les affouillements, qui furent, par le passé, la cause la plus fréquente d'effondrement de ponts sur un cours d'eau, comme ce fut le cas pour le pont de Tours (France) en 1978. Les techniques modernes de fondations permettent d'éviter ce type d'accident, mais la connaissance de la hauteur d'affouillement possible au voisinage des appuis est indispensable pour dimensionner celles-ci. Pour minimiser ces risques mais également pour diminuer les coûts, les concepteurs limitent en général le nombre des appuis en eau.

Chapitre III :

Choix de logiciel

Choix de logiciel

III.1. Introduction

La résolution des équations différentielles ou plus généralement des équations aux dérivées partielles occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes. Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. On pense par exemple aux méthodes de différences finies, des éléments finis, de volumes finis, aux méthodes spectrales, etc. La méthode des différences finies est une des plus anciennes méthodes de simulation numérique qui est encore utilisée pour certaines applications, comme la propagation d'ondes sismiques ou électromagnétiques ou la mécanique) des fluides compressibles. Pour d'autres applications, comme la mécanique du solide ou celles des fluides incompressibles, on lui préfère souvent la méthode des éléments finis, ce chapitre donne une présentation de la méthode de différence finies, le logiciel de calcul.

III.2. La méthode des élément finis

L'analyse aux finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique , avec les éléments finis , ils est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes, en effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles , il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques , le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec un géométrie simple , qui peuvent être calculés avec les équations initiale connues , cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique : méthode des éléments finis , en ingénierie , la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard utilise dans plusieurs secteurs (génie mécanique ,génie civil, transport ,aéronautique ,espace ,nucléaire ,énergétique, militaire...) .

III.2.1. Domaines d'application de la MEF

- Analyse linéaire (statique et dynamique)
- Analyse non linéaire (grands déplacements, grandes déformations, contact et frottement, ...)

- Mise en forme des matériaux
- Thermique (en régime permanent et transitoire, ...)
- Mécanique des fluides
- Électromagnétisme
- Dynamique rapide (choc, impact, crash)
- Optimisation des structures.

III.2.2. Principes de la méthode des éléments finis

- La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés noeuds
- Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque noeud.
- La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.
- Les noeuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolant.

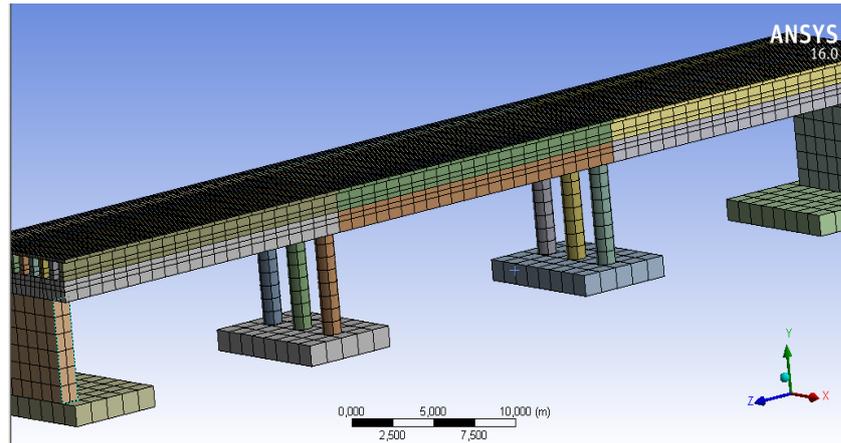


Figure III. 1: Maillage en élément finis d'un pont.

➤ Le maillage

Le solide est décomposé en éléments de formes géométriques simples ayant des côtés communs et dont les sommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations prévues par un programme d'ordinateur. Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds. Il existe deux méthodes les plus répandues pour le maillage. La première consiste à donner des numéros aux nœuds de gauche à droite (ou de bas en haut) (figure III.2). La seconde consiste à attribuer les coordonnées pour chaque nœud. (Figure III.3)

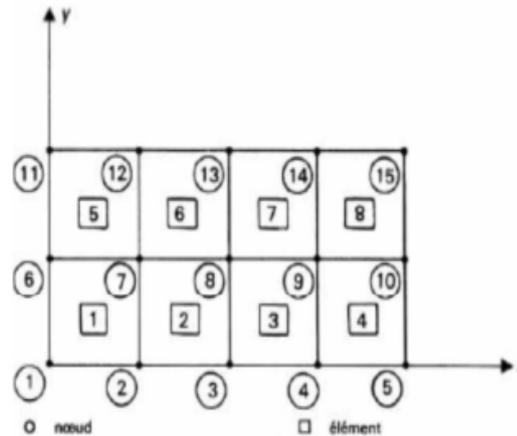


Figure III. 2: Numérotation des nœuds et des éléments pour un problème à 2 dimensions (première méthode)

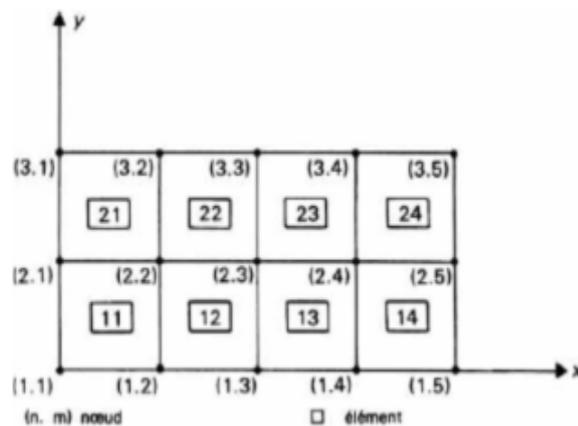


Figure III. 3: Numérotation des nœuds et des éléments pour un problème (deuxième méthode).

III.2.3. Etapes du calcul de la MEF

A- Etape logique du calcul par MEF

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[k_e]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{u_e\}$ et les forces $\{f_e\}$ appliquées aux nœuds :

$$[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
5. Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

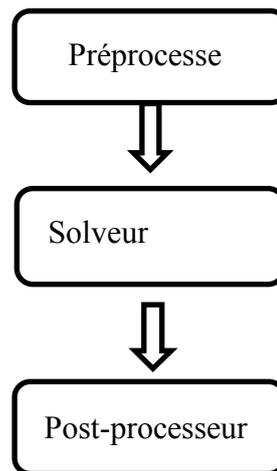


Figure III. 4: Organigramme générale de code de calcul.

1) Préprocesseur

- Choisir le type d'éléments
- Entrer les propriétés géométriques
- Entrer les paramètres physiques
- Créer le modèle géométrique
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
- Appliquer les sollicitations
- Imposer les conditions aux limites.[12]

2) Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
- Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
- Prendre en compte les conditions aux limites
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions,...)

3) Post-processeur

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique - Sous forme numérique - Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations Interpolations, animation.[12]

III.2.4 Les éléments finis et le Génie civil :

Projeter un ouvrage en génie civil nécessite plusieurs phases d'intervention. Deux phases principales peuvent être distinguées :

1. Conception et avant-projet ou phase de dimensionnement de l'ouvrage.
2. Exécution ou phase de justification de l'ouvrage. Une structure se présente comme un arrangement et/ ou une simplification de parties ou modèles (tablier de pont structuré à base de poutres, de plaques ou de coques, fondations, etc.), et elle ne permet pas de caractériser le sol sur lequel la construction s'établit.

Modéliser ne doit donc pas se limiter à la simple extraction de quelques composantes de structures ou de matière en vue d'une analyse séparée, mais cela consiste plutôt à localiser et à mesurer l'importance relative des divers paramètres significatifs et critiques du problème traité, à organiser les géométries et les diverses configurations de l'ouvrage évoluant dans le temps et à les remplacer dans un espace associant des composantes de la structure et de matière couplées entre elles. La modélisation d'un ouvrage doit essentiellement résulter de : «la recherche de la structure permettant d'approcher au mieux le fonctionnement réel de la construction, de la loi de comportement caractéristique du matériau et de la recherche des interactions structures matériaux » [15]

III.2.5 Les avantages de la méthode des éléments finis

Pour présenter la MEF, on commence souvent par exposer les problèmes physiques que la méthode peut résoudre, puis on poursuit en développant l'un ou l'autre des deux aspects suivants : les avantages pratiques de la méthode, ou ses fondements mathématiques.

- L'approche pratique : qui repose sur les notions de nœuds et éléments, met naturellement en évidence la variété des domaines d'applications couverts par la MEF, ainsi que son caractère modulaire, qui présente un grand intérêt dans la conception des outils et dans la gestion des études : c'est le côté « Lego » de la MEF. En outre, elle identifie facilement, sur divers points durs de la mise en œuvre (comme la complexité géométrique ou le coût de résolution du problème), les forces et les faiblesses de conception des outils existants.
- L'approche mathématique : basée sur la théorie de l'approximation et les espaces fonctionnels, est plus rigoureuse et beaucoup plus lourde à introduire, mais elle permet seule de juger de la pertinence de la MEF parmi l'ensemble des moyens d'analyse offerts à l'ingénieur.

III.3. Modélisation par ANSYS

III.3.1. Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les solutions logicielles proposées permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Ainsi ANSYS gère trois types principaux d'analyse structurale mécanique, auxquelles il faut ajouter les analyses de chargement thermiques et les analyses des réponses propres de la structure (flambement et modes de résonance propres en particulier) :

- **Les analyses statiques linéaires** : considèrent que les forces sont appliquées de façon statique (pas de variation au cours du temps, et aucun effet d'amortissement), sur des matériaux présentant un comportement élastique linéaire. Les forces appliquées peuvent être des forces ou des pressions (internes ou externes), des forces inertielles statiques (comme la gravité ou une vitesse de rotation), des déplacements inertiels statiques, des déplacements imposés ou encore une température. On détermine alors les déplacements occasionnés par les forces appliquées grâce au $\{u\}$. K calcul de la matrice de rigidité $[K]$, tel que : $\{F\} = [K]\{u\}$. Les analyses statiques non linéaires permettent, elles, de modéliser des situations où les chargements (contacts ou larges déformations, par exemple) et/ou les propriétés des matériaux (plasticité, écrouissage, hyper élasticité,) associés varient en fonction de la déformation ou de la contrainte imposée.
- **Les analyses statiques transitoires** : permettent de déterminer la réponse d'une structure soumise à l'action de forces dépendantes du temps, c'est-à-dire ses déplacements, déformations et contraintes en fonction du temps. Ce type d'analyse est utilisé pour des cas où les effets de l'inertie et de l'amortissement du système sont importants (si non, on procède à une analyse statique).
- **Les analyses dynamiques** : sont utilisées pour déterminer la réponse dynamique d'une structure à une contrainte causée par la propagation d'une onde, un impact ou encore le changement rapide d'une force dépendante du temps, c'est-à-dire lorsqu'on a affaire à des échanges instantanés entre des corps en mouvements et des effets inertiels. Typiquement on utilise les analyses dynamiques pour des cas où les échelles de temps considérées sont inférieures à une seconde, typiquement de l'ordre de la milliseconde (pour des échelles de

temps pour grandes, on considérera une analyse structurale transitoire). Ces analyses peuvent aussi être utilisées pour modéliser des phénomènes mécaniques fortement non linéaires, que ce soient des non linéarités induites par les matériaux (par exemple, hyper élasticité ou rupture), par des contacts (collisions à grandes vitesses ou impacts), ou encore par des déformations géométriques (flambage ou effondrement). Pour une analyse dynamique, ANSYS fait automatiquement appel au solveur dynamique explicite LS-DYNA, en exportant le modèle vers le solveur via un fichier.[14]

En effet, intégrer l'Analyse de Conception dans un bureau d'études, c'est lui permettre de décupler ses capacités d'innovation et de prendre une réelle avance technologique. L'outil de simulation se présente sous plusieurs niveaux de licences. Les logiciels de calculs par éléments finis sont généralement peu accessibles car ils nécessitent des connaissances dans le calcul.

L'interface WORKBENCH qui encapsule les différents niveaux de l'outil de simulation et ses modules a été conçue pour être utilisée sans avoir une formation basée sur les éléments finis. L'interface est très intuitive, permettant une prise en main très rapide du logiciel. Les difficultés du calcul par éléments finis sont ici gommées, notamment par l'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage. Ainsi, Ansys satisfera l'ensemble de la chaîne de conception : du concepteur du bureau d'étude qui pourra effectuer des calculs rapides de pré-dimensionnement à l'ingénieur de calcul qui réalisera des études plus précises (réponse spectrale, non linéarité...).

III.3.2. Les versions de logiciel ANSYS

- **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Paramétrique Design Language). ANSYS classique est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
: qui permet d'effectuer des simulations mécaniques sur les structures. Ses principales capacités sont : l'analyse statique ; l'analyse modale ; l'analyse harmonique (réponse forcée) ; l'analyse temporelle ou transitoire ; la gestion de différentes situations non

linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

- **ANSYS Workbench** : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.[14]

III.3.3 Organisation du logiciel ANSYS

De façon générale, une résolution par ce code d'éléments finis (ANSYS) comporte trois étapes.

- **Première étape** : Préparation des données ou pré-processing pour définir le problème. Ces étapes majeures sont données ci-dessous :
 - Définir les points clés (keypoints) /lignes/surfaces/volumes.
 - Définir le type d'élément fini, ses propriétés géométriques et les propriétés physiques des matériaux.
 - Maillage des lignes /surfaces/volumes si cela est requis.

Les données nécessaires dépendent évidemment de la dimension du problème. (1D, 2D, axisymétrique, 3D).

- **Deuxième étape** : Traitement ou processing : Assigner les charges, contraintes (conditions aux limites) et résolution. On spécifie notamment la nature des charges (localisées et/ou distribuées), contraintes ou conditions aux limites (translation et rotation) et, finalement, on résout le système d'équations.
- **Troisième étape** : Post-processing : Analyse et visualisation des résultats ; lors de cette étape, on peut examiner :
 - La liste des déplacements nodaux.
 - Les forces et les moments au niveau des éléments.
 - Tracé des déformées ; tracé des iso contours des contraintes.

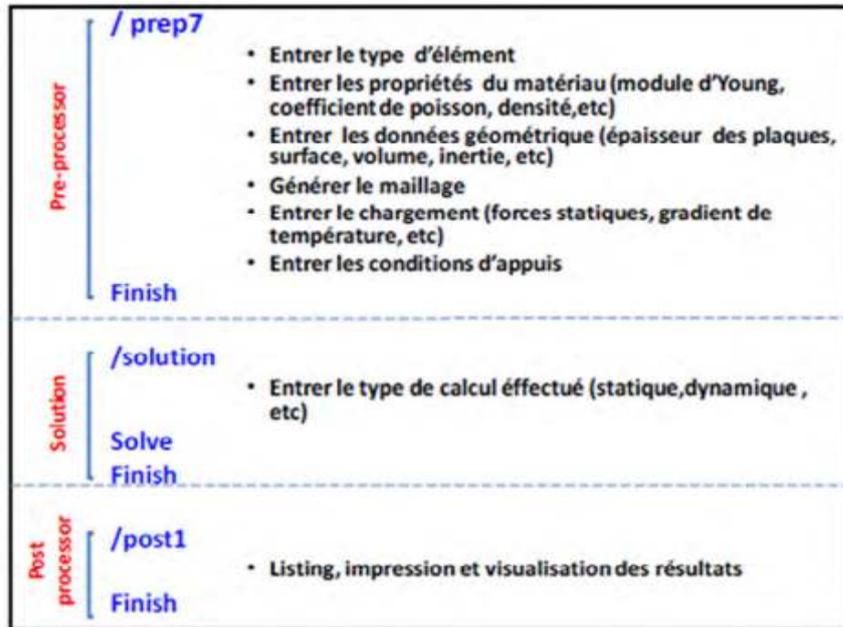


Figure III. 5: Schéma d'utilisation classique d'ANSYS.

Cette description d'ANSYS définit le cas général de modélisation.

Chapitre IV :
Analyse numérique et cas d'étude

ANALYSE NUMERIQUE ET CAS D'ETUDE

IV.1. Introduction

Dans le but de mener à terme le suivi du comportement du pont routier avec les deux variantes de conception de piles (appuis intermédiaires) et par conséquent déterminer les résultats de la modélisation faite par le logiciel de calcul " Ansys/ Workbench", avec l'utilisation de la méthode des éléments finis, on a tout d'abord défini les éléments structuraux de la pile (chevêtre, futs ou voile et ainsi la semelle). Pour cela, on a pris deux cas de figures d'écoulement des eaux d'oued. Le premier cas consiste à prendre l'exemple où l'oued est sec (comportement de la pile seule) et le deuxième cas où il y a la pression hydrostatique (effet des eaux de l'oued).

IV.2. Objectif du travail

Notre travail d'analyse numérique par la méthode des éléments finis (MEF), avec le logiciel Ansys/Workbench, consiste à prendre des cas d'étude du comportement du pont routier (sous deux variantes). Les phases de cette modélisation qu'on va prendre est celles de l'analyse statique (détermination des déplacements, contraintes et déformation) et de l'analyse modale, qui a pour objectif, la détermination des modes et fréquences propres de vibrations (au nombre de six modes). Le modèle choisi géométriquement, sera qui sera implanté dans le logiciel "Ansys", en passant par la première étape (pré-processing), consistant tout d'abord à dessiner le modèle en 3D, puis introduire les caractéristiques mécaniques (module de Young, coefficient de Poisson, la contrainte limite), et mode de comportement des éléments : béton, aciers et pressions de l'eau.

IV.3. Présentation de l'ouvrage

Il s'agit de l'étude d'un pont routier sur un oued à poutre en béton de doublement de la RN 1 du PK 294 au PK 351+500 (lot 2), section B au niveau de la wilaya de Djelfa (Figure IV.1). Le tablier de ce pont, est, composé de 2 voies de 78m et de trois (3) travées isostatiques de (26 m) de portée, dans le sens longitudinal. Notre cas d'étude se situe donc, à la wilaya de Djelfa, qui s'étale sur les vastes plaines steppiques qui rattrapent le piémont Sud de l'Atlas tellien et ses limites sont ; au Nord les wilayas de Tissemsilt et Médéa ; à l'Est les wilayas de M'Sila, Biskra à l'Ouest les wilayas de Laghouat et Tiaret et au Sud la wilaya de Ouargla et Ghardaïa.

La surface de Djelfa est 32 256,35 km² et le nombre de la population est 1 491 370 hab en 2011 (Figure IV.2). Le climat de la région est un climat semi-aride, très chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver. La pluviométrie ne dépasse pas les 300mm dans cette région en moyenne. La période des pluies apparaît dès le début de l'automne pour s'achever au printemps. Par contre la période sèche apparaît dès le début de mois de mai jusqu'à début septembre.



Figure IV. 1: Plan synoptique du l'axe d'étude de dédoublement de RN°1. [16]



Figure IV. 2: Carte de la Wilaya de Djelfa. [16]

IV.4. Hydrologie de la région et climat

La région caractérisée par l'existence de larges plaines alternant de crêtes montagneuses linéaires en direction Nord-Est, le réseau fluvial, peu développé, est représenté par des oueds qui se dessèchent pendant la période estivale. La plus grande rivière, qui ne dessèche pas, est celle de Melah ou le débit d'eau baisse d'une manière brusque en période estivale. Le climat continental avec un été torride, sec et un hiver froid et pluvieux.

Pour le contexte climatique, nous essayons de synchroniser les éléments du bilan d'eau dans le secteur d'étude, en utilisant les données d'une période récente. Les facteurs mesurés (pluviométrie, température) sont indispensables et leur connaissance permet de quantifier la ressource en eau et de déduire la fraction d'eau infiltrée qui conditionne la recharge des nappes souterraines. D'une manière générale, le climat est conditionné par :

- La température de l'air ($T^{\circ}\text{C}$), les précipitations (P mm), l'éloignement de la mer et la présence du relief. Nous tenterons dans ce chapitre de déterminer ces paramètres hydro climatologiques en se basant sur les données des deux stations météorologiques.
- Les précipitations : Nous constatons que la répartition mensuelle des précipitations (Répartition des pluies moyenne mensuelle des deux stations pluviométrique période 1969-2007/ANRH) des deux postes pluviométriques, montre que la période pluvieuse s'étale sur les mois de Septembre, Octobre et Novembre avec une période humide, Mars, Avril et Mai avec une période à pluviosité moyenne et Décembre, Janvier, Février, Juin, Juillet, et Août avec une période sèche.
- L'humidité relative : La variation saisonnière de l'humidité relative est représentée sur la figure I.5. Il apparaît que la saison froide présente une humidité relative, élevée avec un maximum de (78.2%), obtenu au mois de janvier, d'autre part, l'humidité relative ne dépasse pas (50%) durant la saison sèche (juin- août), avec un minimum pouvant atteindre (35.1%) au mois de juin (Figure IV.3).

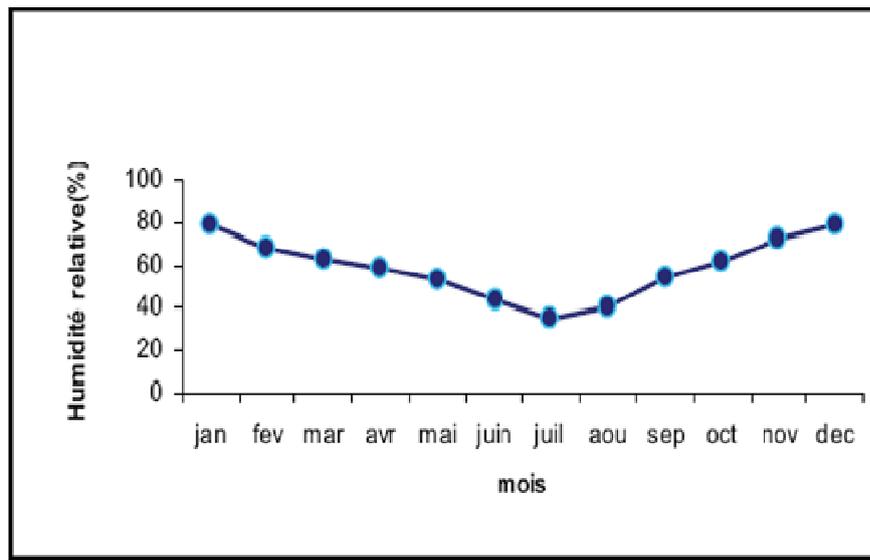


Figure IV. 3: Evolution de l'humidité relative mensuelle (période de 1995-2004). [16]

Pour les effets des vents, qui sont des facteurs climatiques, d'une importance primordiale et qui contribuent aux façonnages arides et désertiques. En jouant le rôle d'un agent d'érosion, de transport et d'accumulation, ce facteur est susceptible d'influencer les processus d'évaporation et d'évapotranspiration. La variation saisonnière de la vitesse du vent durant la période d'observation reste quasi constante. D'autre part, la valeur maximale de la vitesse du vent ne dépasse pas 4.83 m/s (Avril), tandis que la valeur minimale (3.48 m/s) est observée au mois de Septembre.

IV.5. Propriété des matériaux et maillage

IV.5.1. Béton armé

L'analyse numérique impose la définition des caractéristiques de chaque matériau. Le choix du béton dans ce cas a pris en considération l'optimisation des performances et la durabilité de la pile de l'ouvrage, vu sa localisation dans un environnement sous les effets des oueds. Cet élément ayant huit nœuds, et chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales. L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions. Pour tous les modèles de l'analyse numérique les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau IV. 1: Propriétés du béton armé.

Module d'élasticité (E_c)	3500 MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (δ)	350 Kg /m ³

IV.5.2. Maillage et conditions au limites

Le maillage est un moyen de subdiviser l'ouvrage concerné par l'étude en éléments de même taille et de mêmes propriétés, ensuite analysé chaque élément séparément. L'assemblage des éléments nous conduit à l'ouvrage initiale. La discrétisation en éléments finis est une étape de création et non pas de la solution. Le maillage se fait sur des lignes bien choisies (longueur, largeur et hauteur) du tablier, ainsi que sa densité dans toutes ses régions. L'ouvrage a été discrétiser en élément cubique de 200mm de cote. Plus le maillage est fin plus le calcul est précis et l'exactitude de la simulation est élevée.

IV.5.3. Conditions aux limites

Dans le model de notre étude l'axe X correspond à l'axe longitudinal, l'axe Y a l'axe transversale et l'axe Z est l'axe verticale. Les conditions au limite adopté pour les cas de modélisation soit sans pression des eaux ou avec sont identiques. Des appuis fixe au niveau des semelles de fondation (en bas), dans lesquelles les déplacements sont bloqués suivantes deux directions (o_x ; o_y).

IV.6. Les donné de calcule :

Notre cas d'étude est un pont de deux voit avec des piles a fute est implante dans le plnt, pour notre étude et pour facilité les calcule on prant deux variante de pile de pant, on prant la surface reale de la pile de ponte et on calcule sur une pile équivalent avec la meme surface.

Chapitre V :

Résultats et discussions

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Dans le but de mener à terme le suivi du comportement du pont routier avec les deux variantes de conception de piles (appuis intermédiaires) et par conséquent déterminer les résultats de la modélisation faite par le logiciel de calcul " Ansys/ Worbench", avec l'utilisation de la méthode des éléments finis, on a tout d'abord défini les éléments structuraux de la pile (chevêtre, futs ou voile et ainsi la semelle). Pour cela, on a pris deux cas de figures d'écoulement des eaux d'oued. Le premier cas consiste à prendre l'exemple où l'oued est sec (comportement de la pile seule) et le deuxième cas où il y a la pression hydrostatique (effet des eaux de l'oued).

V.2. Pressions d'hydrauliques appliquées

La pile est modélisée pour les deux cas en prenant une pression hydrostatique exercée par l'eau des oueds qui a une masse volumique de $\gamma=1025\text{kg/m}^3$. Cette pression est appliquée sur les deux parois latérales et les deux façades (pile à voile) et sur la périphérie circulaire (pile à futs). Cette pression est une force triangulaire.

$$P = \frac{1}{2} * K * \gamma * h^2$$

Cette pression est appliquée à un tiers de la hauteur du mur par rapport à la base. Dans notre cas la pression est surfacique et cela devient. Afin de simplifier les calculs, on considère que la pression est appliquée sur toute la paroi du fut ou voile.

$$q = p * L/h. \quad \Rightarrow q = \frac{1}{2} * k * \gamma * h \quad \text{avec} \quad \gamma = 1025\text{kg/m}^3, \quad K = 0,333 \quad \text{et} \quad h = \text{hauteur du fut ou voile.}$$

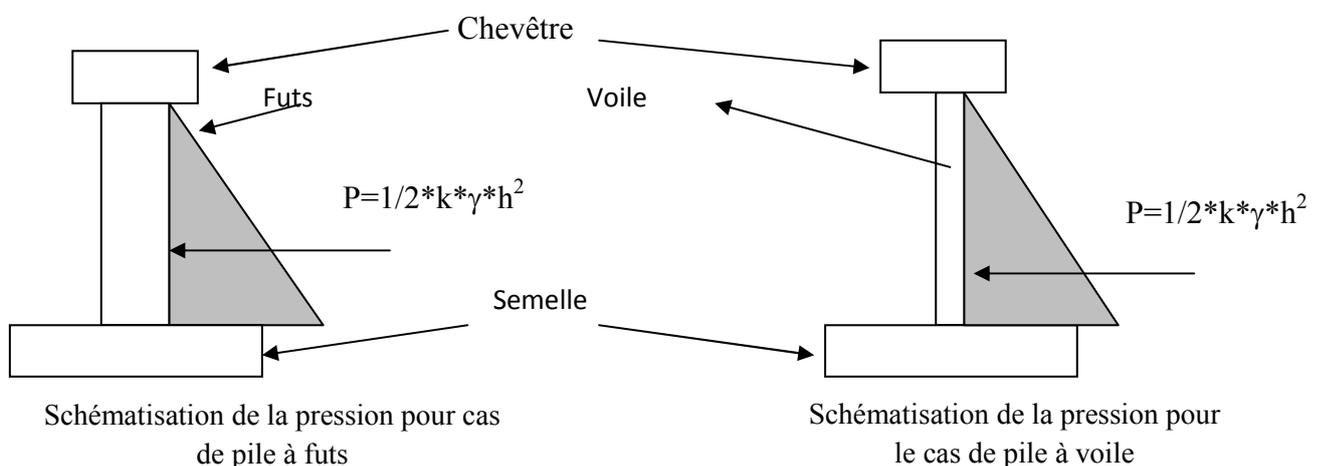


Figure V. 1: Schématisation des pressions sur pile

V.3. Modèles des variantes

Les modèles pris dans l'analyse numérique sont illustrés dans les figures V.2 et V.3, où les piles pris sont à futs ou à voiles. Ces variantes sont prises pour suivre le comportement des piles en particulier et du pont lui-même, en générale.

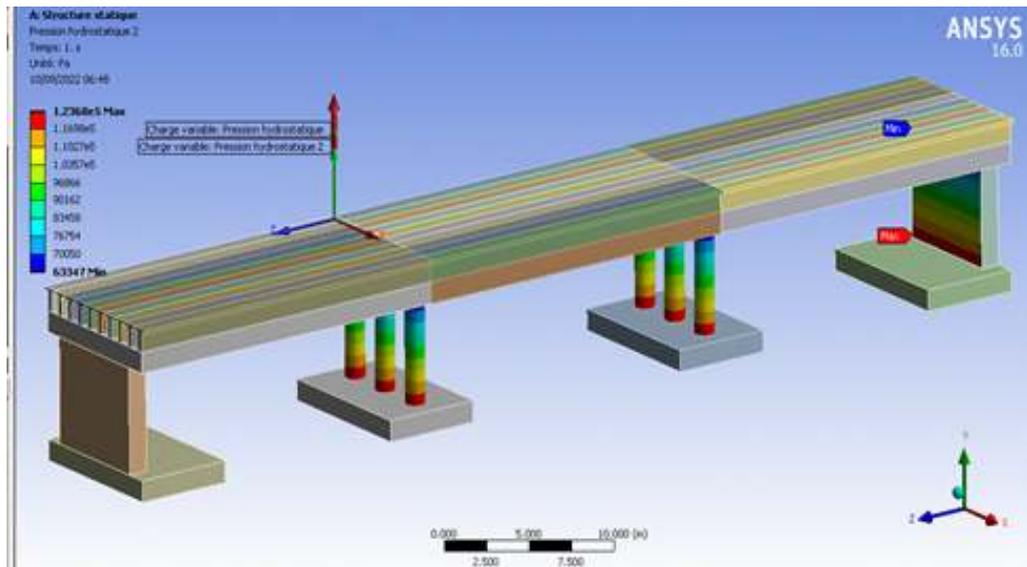


Figure V. 2: Modèle des piles du pont à futs.

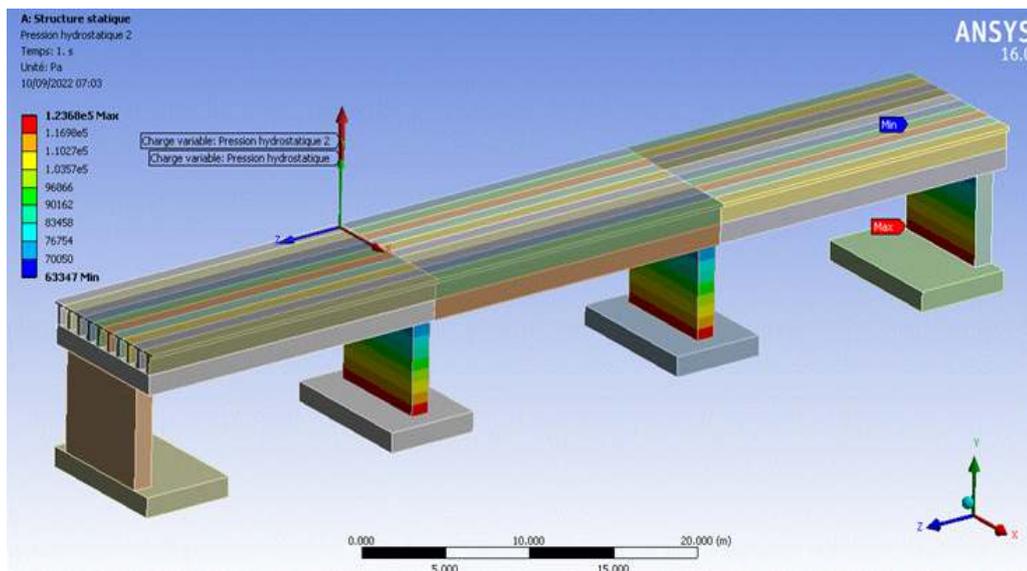


Figure V. 3: Modèle des piles du pont à voiles

V.4. Résultats trouvés de l'analyse

V.4.1. Modèle de la pile à futs

On prendra le cas de la pile sans pression des eaux (état sec) et le cas de la pile avec pression des eaux.

V.4.1.1. Pile sans pression des eaux

Pour le déplacement selon l'axe x (longitudinal), la valeur trouvée est de 0.088 mm, ce qui constitue une valeur très minime (Figure V.4). Donc le pont est très rigide et ne peut se déplacer dans ce sens. Le mode de déformation est en flexion avec des ventres au niveau des mi-travées.

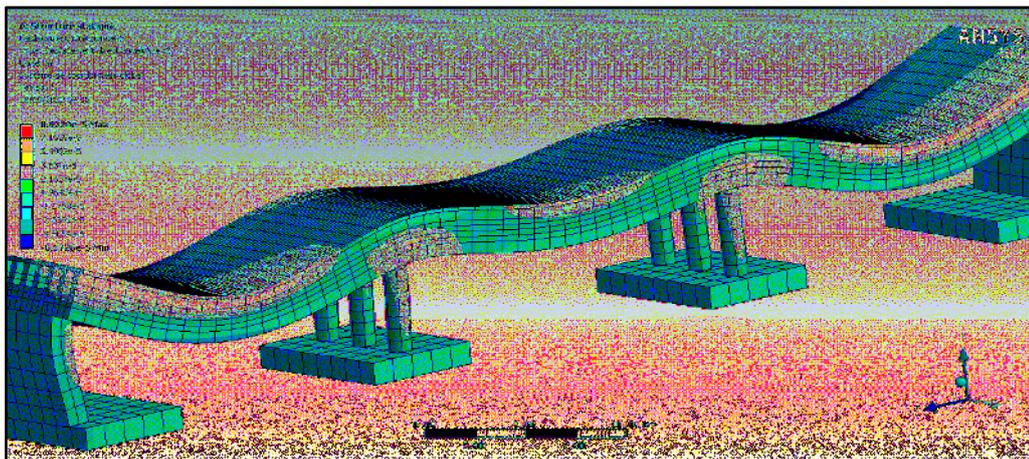


Figure V. 4: Valeurs des déplacements dans le sens x

Pour le déplacement selon l'axe y (transversal), la valeur trouvée est de 0.017 mm et qui est moins importante que celle dans le sens précédent (Figure V.5).

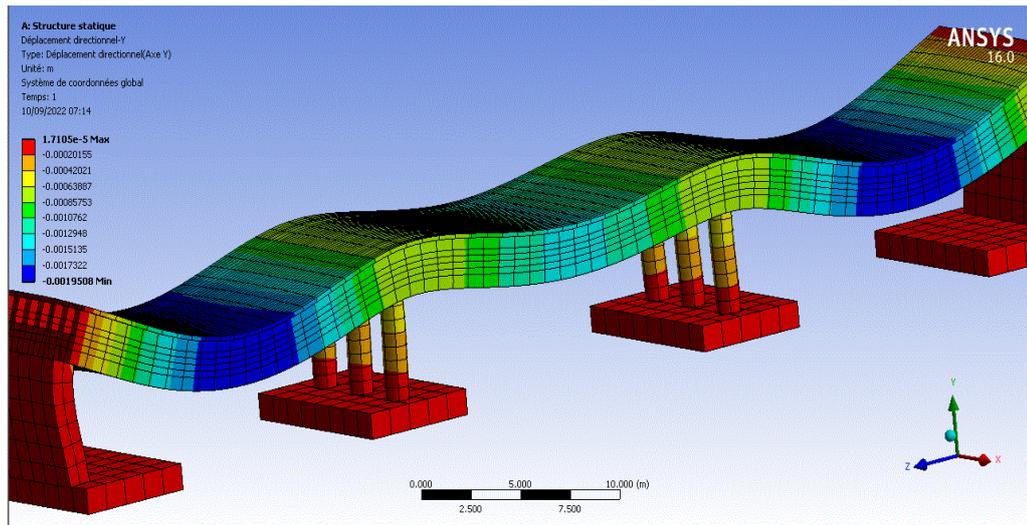


Figure V. 5: Valeurs des déplacements dans le sens transversal.

Pour les valeurs des contraintes trouvées, on constate la valeur maximale de 5.79 Pa (Figure V.6).

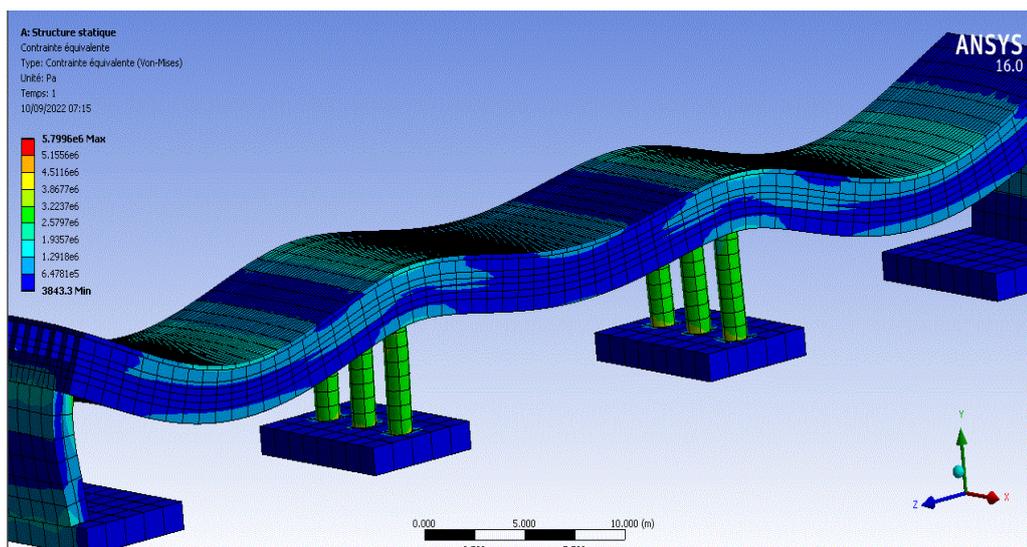


Figure V. 6: Valeurs des contraintes du pont.

V.4.1.2 Pile avec pression des eaux

De même, pour le déplacement selon l'axe x (longitudinal), on a trouvé une valeur de 0.086 mm, ce qui constitue une légère diminution par rapport à la valeur précédente (sans pression des eaux) (Figure V.7).

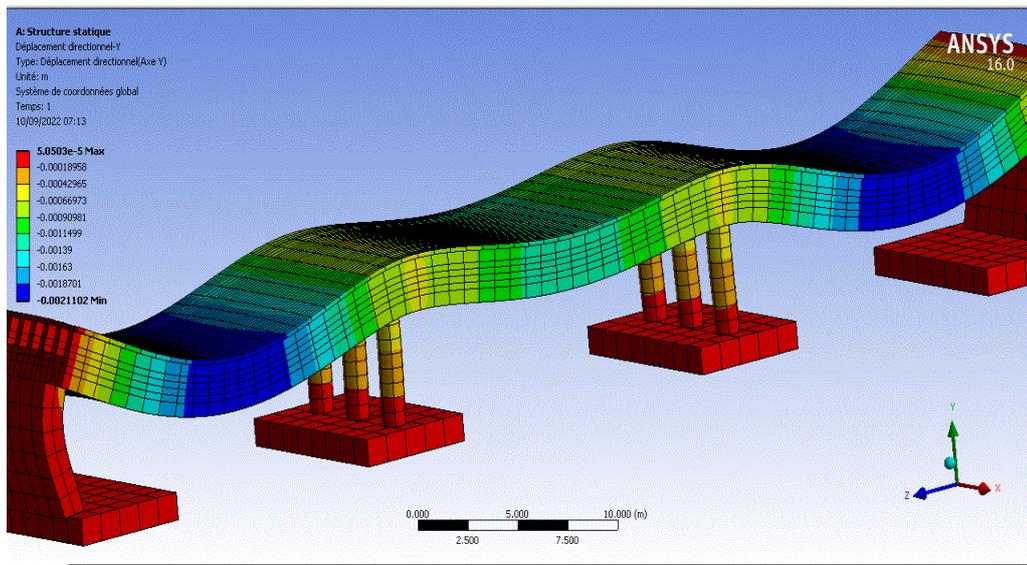


Figure V. 7: Valeurs des déplacements dans le sens longitudinal.

Pour le déplacement selon l'axe y (transversal), la valeur trouvée est plus significative (0.085 mm), donc l'influence des eaux d'écoulement (pression interstitielle) (Figure V.8).

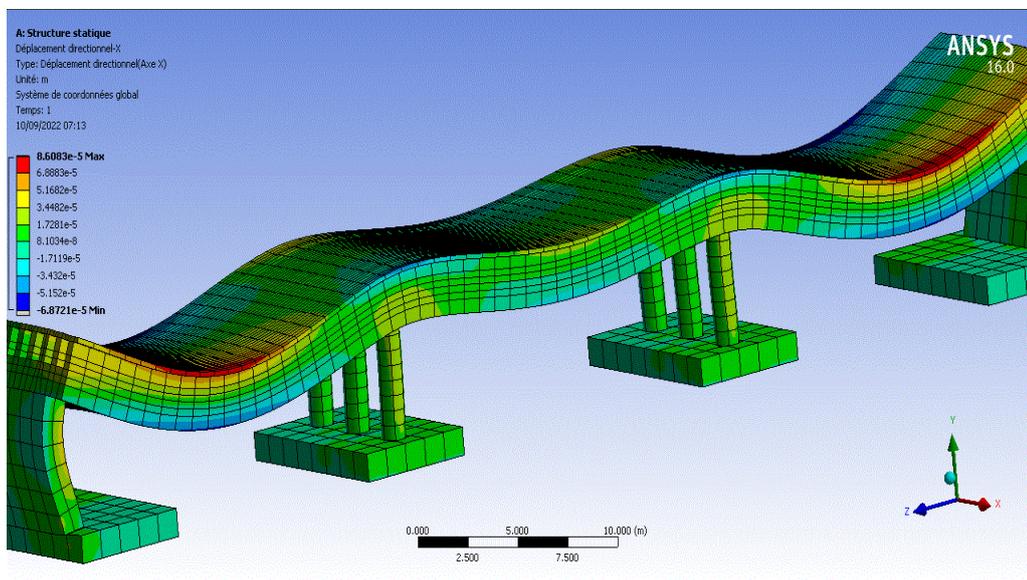


Figure V. 8: Valeurs des déplacements transversaux.

Pour les valeurs des contraintes (avec pression des eaux), sont de valeur maximale 5.91 Pa. Une nette différence par rapport au cas sans pression d'eau (Figure V.9).

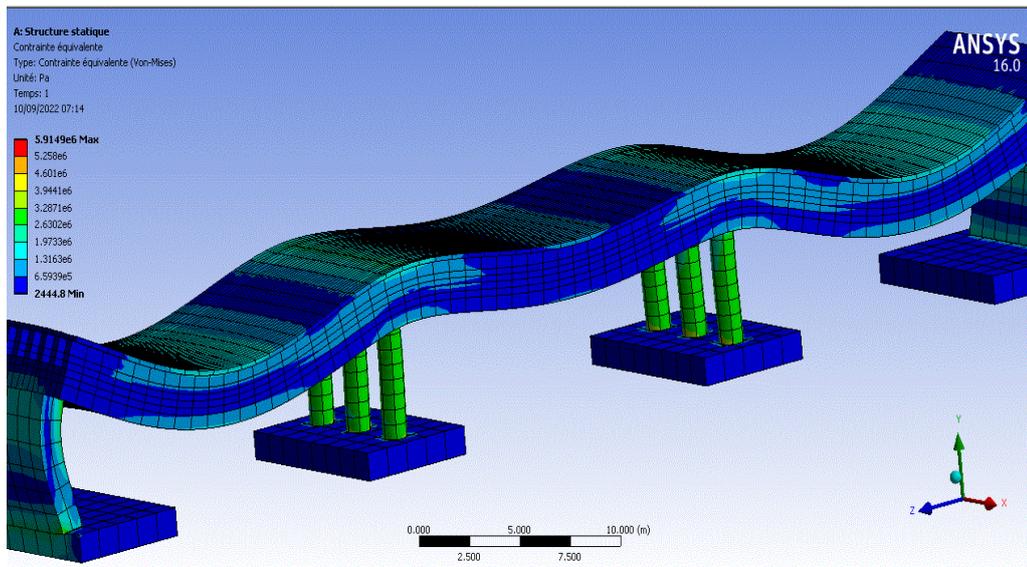


Figure V. 9: Valeurs des contraintes du pont avec pressions d'eau.

V.4.2 Modèle de la pile à voiles

Pour le deuxième cas de figure, on prendra la pile à voiles sans pression des eaux (état sec) et le cas de la pile à voiles avec pression des eaux.

V.4.2.1 Pile sans pression des eaux

Pour le déplacement selon l'axe x (longitudinal), la valeur trouvée est de 0.1049 mm, ce qui constitue une valeur significative par rapport au premier cas (avec futs) (Figure V. 10). Le pont, très rigide ne peut se déplacer librement dans ce sens. Le mode de déformation est en flexion avec des ventres au niveau des mi-travées.

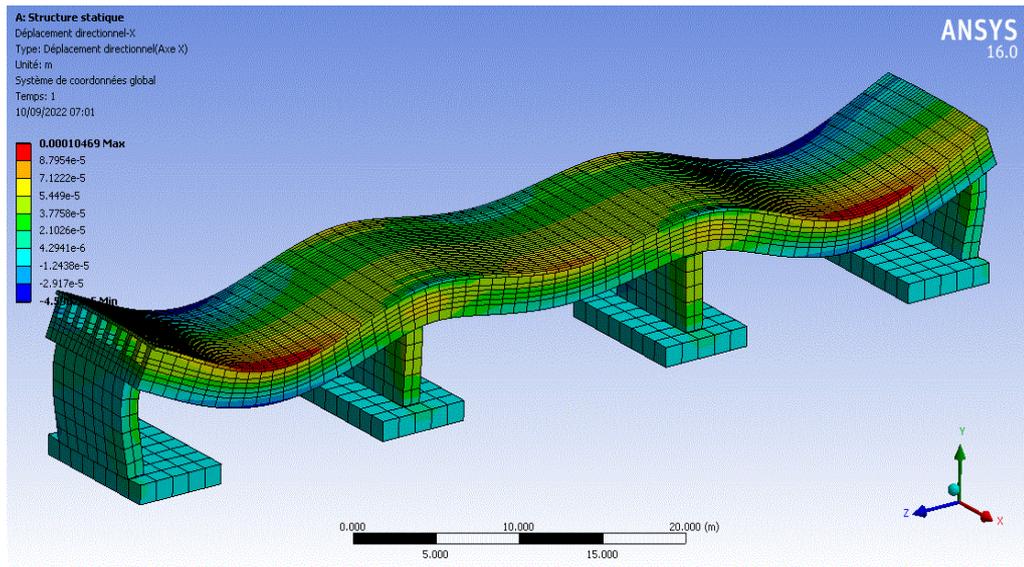


Figure V. 10: Valeurs des déplacements dans le sens x.

Pour le déplacement selon l'axe y (transversal), la valeur trouvée est plus significative (0.089 mm), donc l'influence des eaux d'écoulement (pression interstitielle) et du type de pile (Figure V.11).

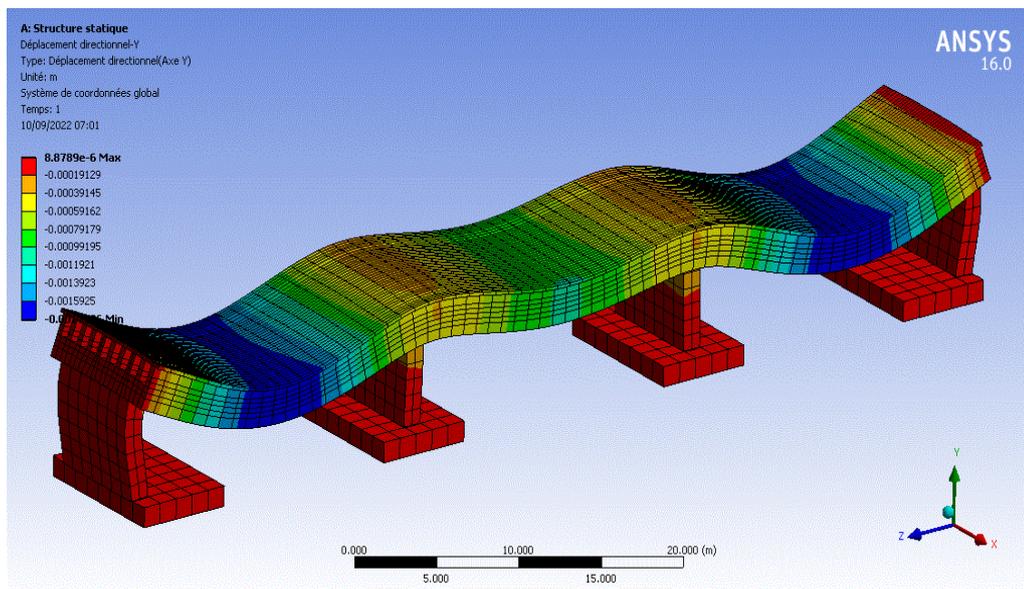


Figure V. 11: Valeurs des déplacements dans le sens y.

Pour les valeurs des contraintes (sans pression des eaux), on a la valeur maximale de 3.802 Pa. Une nette différence par rapport au cas sans pression d'eau (avec voiles (Figure V.12)).

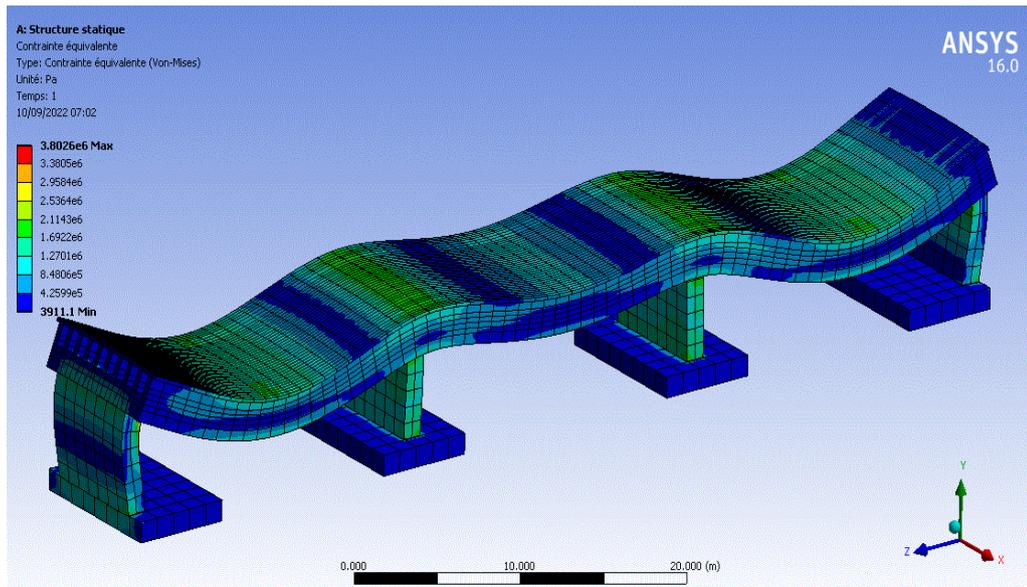


Figure V. 12: Valeurs des contraintes du pont sans pressions d'eau.

V.4.2.2 Pile à voiles avec pression des eaux

Pour le déplacement selon l'axe x (longitudinal), la valeur trouvée est de 0.1056 mm, ce qui constitue une valeur significative par rapport au premier cas (avec futs) (Figure V. 13). Le pont, très rigide ne peut se déplacer librement dans ce sens. Le mode de déformation est en flexion avec des ventres au niveau des mi-travées.

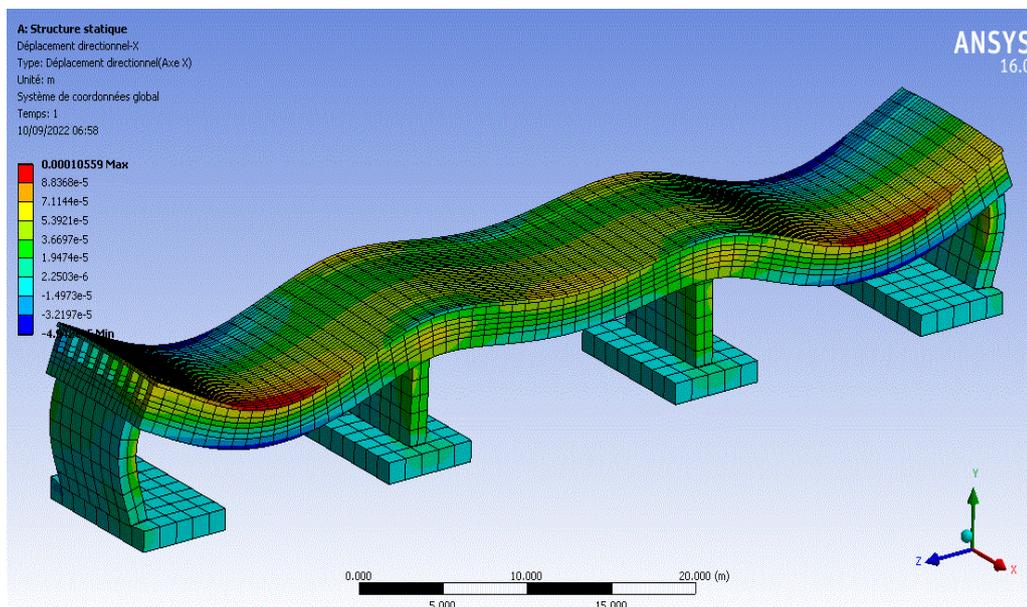


Figure V. 13: Valeurs des déplacements dans le sens x.

Pour le déplacement selon l'axe y (transversal), la valeur trouvée est plus significative (0.0486 mm), donc l'influence des eaux d'écoulement (pression interstitielle) et de la présence des voiles de la pile (Figure V.14).

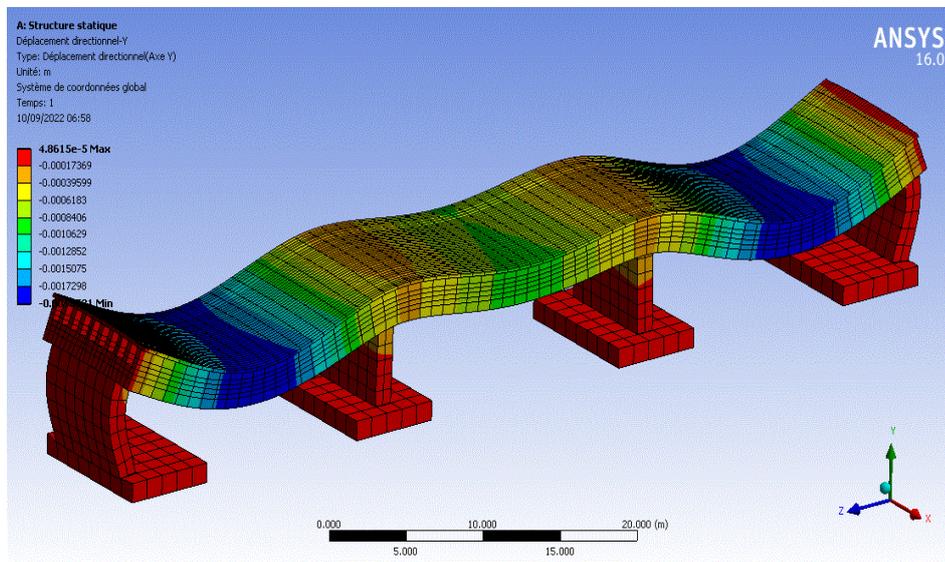


Figure V. 14: Valeurs des déplacements dans le sens y

Pour les valeurs des contraintes (avec pression des eaux), sont de valeur maximale 3.742 Pa. Une nette différence par rapport au cas sans pression d'eau (Figure V.15).

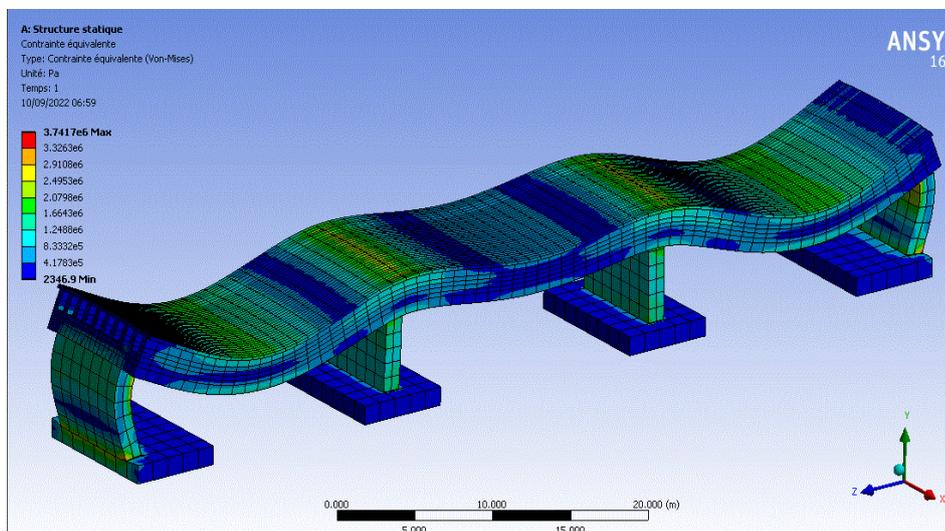


Figure V. 15: Valeurs des contraintes du pont à voiles avec pressions d'eau.

V.5. Bilan et commentaires

Sur la base de cette étude de modélisation numérique, on peut constater que le type des constituants de la pile du pont influent sur le comportement statique global du pont étudié. Ainsi donc et en lisant les valeurs du tableau V.1, on peut constater ce qui suit :

Type de pile	Influence de l'eau	Déplacement selon x (mm)	Déplacement selon y (mm)	Contraintes (Pa)
A futs	Sans pression d'eau	0.088	0.017	5.79
	Avec pression d'eau	0.086	0.085	5.91
A voiles	Sans pression d'eau	0.1049	0.089	3.802
	Avec présence d'eau	0.1056	0.0486	3.742

On constate que la pression d'eau diminue le déplacement selon l'axe x, pour le cas des piles à futs et n'influe pas dans le cas de piles à voiles. Pour le cas des piles à voiles, la pression des eaux diminue les déplacements selon y. Concernant les contraintes, il semble que la pression de l'eau influe négativement pour les piles à voiles. De ces observations, on peut dire qu'il est préférable de concevoir des piles à voiles dans les oueds.

Conclusion Générale Et Recommandations

Le travail de ce mémoire, consiste à faire une analyse numérique et prenant en compte les paramètres géotechnique et hydrogéologique d'un pont routier, comme passage supérieur sur un oued se trouvant dans la wilaya de Djelfa. On s'est intéressé au choix optimal des formes des piles afin de réduire et par conséquent éviter les effets néfastes (voire les catastrophes), lors ce passage des courants d'eaux des oueds.

L'analyse numérique, par le biais du logiciel commercial "Ansys/ Version Workbench", basée sur la méthode des éléments finis (MEF) a été élaborée. Les conclusions à tirer de cette étude, se résument à :

- Il est possible de concevoir d'une manière optimale la forme de la pile de tout pont passant sur un oued ;
- L'étude géotechnique et le paramètre hydrogéologique, sont nécessaires pour toute étude ou analyse du comportement d'un pont ;
- Le choix adéquat du logiciel approprié, comme Ansys/Workbench", donne plus de garantie et les résultats sont très près de la réalité sur terrain ;
- Les piles à voiles sont les plus adéquats pour les ponts sur oueds, vu que la pression des eaux influe peu sur les contraintes et déplacements.
- Le comportement du pont, avec ou sans pression d'eau, est plus stable dans le sens de longueur que le sens transversal, avec seulement des déplacements ne dépassant les 0.11 mm.
- Les contraintes sont de valeurs variantes entre 3.7 Pa et 5.9 Pa, que ce soit la forme des piles de pont, avec un léger avantage aux piles à voiles.

Pour les recommandations pour futurs travaux, on propose de faire des études plus poussées pour prise en compte d'autres formes de piles, comme les cas des piles marteaux, piles culées, ou autres types. Aussi, il est souhaitable, de faire des analyses dynamiques (analyse modale) en prenant un comportement de tous les matériaux constituant la pile, avec des considérations géotechniques (types de sols).

Références

- [1] Danail.m / article /conception des piles de ponts / école de ponts paris /2016.
- [2]Nicollet.G article / hydraulique des ouvrages de franchissement des vallées fluviales /direction des études et recherche – Chatou laboratoire national d’hydraulique/ France / 2019.
- [3] Boutraa.Z /mémoire master / pathologie et réhabilité des ponts /université hasiba benbouali chlef /2019.
- [4] Guemou.B /thèse / études et modélisation de l’affouillement autour des piles de pont / université aboubakaar belkaid telemesen / (2015/2016).
- [5] Chayani.M /mémoire master /étude géotechnique conception et démentions d’un pont viaduc raccordement pôle universitaire el Affron ver autoroute est ouest (pk6+047,10-pk6+180,10) /université saad dahleb Blida 0/2015.
- [6] www.clima.data.org.
- [7] d.maps.com.
- [8] historique.météo.net.
- [19] Idir.N/ mémoire master /Impact des changements climatiques sur les écoulements des Oueds en Algérie cas de deux bassins représentatifs du Nord de l’Algérie (Chiffa et Rocher des pigeons) ; école nationale supérieure d’hydraulique /2018.
- [10] Manuel de conception hydraulique des ponts /Procédure pour la réalisation des études hydrauliques / 2005.
- [11] Chelit A / mémoire master /modélisation non linéaire des poutres renforcées par des TFC (2018/2019).
- [12] Evaluation par parasismique des ponts -route existants office fédéral des route ASTRA.
- [13] Tutorial ANSYS version 12.0.1,24 février 2009.
- [14] ANSYS work bench simulation introduire 2007.
- [15] Benyamina.s / mémoire master/ comportement d’un tablier de pont a poutres multiples sous chaussée béton armé répare par matériaux composite/ université. Saad dahleb blida / 2008.
- [16]Note de calcul étude géotechnique d’un ponts /cttp/ Alger /2011.
- [17]l'Agence nationale des ressources hydriquesBlida