

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE- ARBAOUI Abdellah -  
DEPARTEMENT GENIE DE L'EAU

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique*

**Option : Conception Des Ouvrages Hydrotechniques**

**THEME :**

**ETUDE DE FAISABILITE D'UNE RETENUE  
COLLINAIRE EL BOUHAIRA (W.JIJEL)**

**Présenté par :**

**M<sup>r</sup> GASSAS ABD EL HALIM**

**DEVANT LES MEMBRES DU JURY**

| Nom et prénom                        | Grade        | Qualité      |
|--------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>M<sup>r</sup> M.K.MIHOUBI</b>     | <b>M C.A</b> | Président    |
| <b>M<sup>r</sup> M.BACHIR CHERIF</b> | <b>M A.B</b> | Examineur    |
| <b>M<sup>me</sup> N.HADJ SADOK</b>   | <b>M A.A</b> | Examinatrice |
| <b>M<sup>r</sup> M. D BENSALAH</b>   | <b>M A.A</b> | Examineur    |
| <b>M<sup>r</sup> A.HEBBOUCHE</b>     | <b>M A.A</b> | Promoteur    |

**Septembre 2012**

# Remerciements

*D'abord je remercie dieu tout puissant pour m'avoir permis  
d'accomplir dans les meilleures conditions ce travail et toutes mes études.*

*Ma reconnaissance va plus particulièrement à :*

*Mon promoteur Mr HEBBOUCHE pour sa disponibilité*

*et son aide.*

*A L'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.*

*Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier  
mon travail*

*À celui qui n'a jamais hésité le moindre instant à se tenir à mes côtés afin de me  
soutenir, m'aider, et m'encourager*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes*

*qui m'ont aidé tout au long de mon travail.*

*A.H.GASSAS*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissances et de respect :*

*A ma très chère mère et mon cher père*

*A mon frère AED SALAM (RAHIMAHO ELLAH)*

*A mes frères*

*(ISMAIL, AZZIZ, EL YAS, OUSSAMA, CHOUBAIB, YUCEF)*

*A mes sœurs*

*(MERJEM, NAWAL)*

*A MON COUSIN*

*TAREK ET SES ENFANTS ET SURTOUT*

*AKREM, DJOUHAINA, KHAOULLA*

*AUX LES FEMMES DE MES FRÈRES*

*(WASSILLA, ASSMA, FARAH)*

*A toute ma grande famille*

*A mes amis, BILLAL, A.ELMALEK, MOURAD, SDDAM, FATEH, ISMIL,*

*A. ELRHMMAH, TAREK, LAZHER,*

*A toute mes amis de l'ENSH : BILEL(RAYES), HAKOU, ZOUBIR, DJELAL,*

*DJEBER, MOUNIR(DJAAT), HATEM, MOUMEN, KHIERO, HAMZA,*

*KARIM, A. RAZAK,*

*A. H. GASSAS*

### ملخص:

إذا كان الماء هو مصدر الحياة فإن السدود تعد من أكبر خزانات المياه التي تستعمل في مختلف الميادين، ان الهدف من هذا العمل هو الدراسة التحقيقية لسد أوجانة ببلدية الطاهير ولاية جيجل من حيث الجيولوجيا الهيدرولوجيا و اقتصاديا . فكل دراسة تحقيقية قمنا بدراسة جيولوجية هيدرولوجية و دراسة امكانية انجاز هذا السد ثم قمنا بتصوير جسم السد وحساب أبعاد التجهيزات الملحقة (مفرغ الفيضانات ماخذ الماء ومفرغ القعر).

### Résumé :

Si l'eau la source de la vie car Les barrages sont les plus grands réservoirs d'accumulation des eaux qui sont utilisées dans les divers domaines. L'objectif du présent travail est l'étude de la faisabilité d'un petit barrage nommé Oudjana commune Taher wilaya de Jijel de point de vue géologie, hydrologie, et économique. Donc on a fait comme toute étude de faisabilité fait une étude géologique, hydrologique et une étude de variante pour fixer le choix du type de la digue à concevoir. Ensuite on a fait la conception de la digue et le dimensionnement des ouvrages annexes (évacuateur de crue, prise d'eau et vidange de fond).

### Summary:

If the water is the source of life there Dams are the big reserves of water wich are used in divers fields.

The purpose of this work is a study if we can realize a dam which named oudjana in the municipality of Taher district of jijel on point view geology hydrology and economic. Like for every similar work we study geology hydrology and study variants in order to repair the choice of the dam to conceive. Next we understand a dam and understand state workmanship.

# **sommaire**

## **INRODUCTION GENERALE**

### **Chapitre I : Etude Topographique**

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.1 Introduction:</b>                           | <b>01</b> |
| <b>I.2 Situation:</b>                              | <b>02</b> |
| <b>I.3 Caractéristiques morphologiques</b>         | <b>02</b> |
| <b>I.4 Climatologie:</b>                           | <b>03</b> |
| <b>I.5 Recherche et choix du site:</b>             | <b>03</b> |
| <b>I.6 Choix de l'axe de la retenue:</b>           | <b>03</b> |
| <b>I.7 Choix de l'axe de l'évacuateur de crue:</b> | <b>03</b> |

### **Chapitre II : Etude Géologique et Géotechnique**

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II. Introduction :</b>                                           | <b>05</b> |
| <b>II.1 Sismicité de la région:</b>                                 | <b>05</b> |
| <b>II.2 Géologie régionale:</b>                                     | <b>05</b> |
| <b>II.3 Géologie du site:</b>                                       | <b>05</b> |
| <b>II.4 Tectonique générale :</b>                                   | <b>05</b> |
| <b>II.5 Prospection géophysique :</b>                               | <b>06</b> |
| <b>II.6 Interprétation des sondages électriques et conclusions:</b> | <b>10</b> |
| <b>II.7 Etude géotechnique:</b>                                     | <b>10</b> |
| <b>II.7.1 Mode de prélèvement:</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>II.7.2 Essais de laboratoire:</b>                                | <b>11</b> |
| <b>II.7.3 Description et caractéristiques des sols en place:</b>    | <b>11</b> |
| <b>II.8 Perméabilité</b>                                            | <b>13</b> |
| <b>II.9 Capacité portante</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>II-10 Conclusion et recommandations :</b>                        | <b>14</b> |

### **Chapitre III : Etude Hydrologique**

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1 Introduction :</b>                             | <b>15</b> |
| <b>III.2. Caractéristiques du bassin versant:</b>       | <b>15</b> |
| <b>III.2. 1. Caractéristiques géomorphométriques:</b>   | <b>15</b> |
| <b>III.2. 2. Caractéristiques hydromorphologiques :</b> | <b>15</b> |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.2. 3. Hypsométrie du bassin versant.....</b>                                          | <b>17</b> |
| <b>III.2.3.1 Le relief : .....</b>                                                           | <b>17</b> |
| <b>III.2.3.2 Les indices : .....</b>                                                         | <b>18</b> |
| <b>III.2.4 Caractéristiques hydrographiques de bassin versant.....</b>                       | <b>19</b> |
| <b>III.2.4.1 Le réseau hydrographique : .....</b>                                            | <b>19</b> |
| <b>III.2.4.2 Profile en long de l'oued : .....</b>                                           | <b>20</b> |
| <b>III.3. Caractéristiques climatiques.....</b>                                              | <b>21</b> |
| <b>III.3.1. Stations de référence: .....</b>                                                 | <b>21</b> |
| <b>III.3.2 Température de l'air : .....</b>                                                  | <b>22</b> |
| <b>III.3.3Evaporation de la surface de l'eau.....</b>                                        | <b>22</b> |
| <b>III.3.4 La pluviométrie:.....</b>                                                         | <b>23</b> |
| <b>III.3.5 Répartition mensuelle des pluies:.....</b>                                        | <b>23</b> |
| <b>III.3.5.1. Pluies maximales journalières:.....</b>                                        | <b>24</b> |
| <b>III.3.5.2. Ajustement des pluies maximales journalières: .....</b>                        | <b>24</b> |
| <b>III.4. Choix de la loi d'ajustement : .....</b>                                           | <b>25</b> |
| <b>III.5. - Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leurs intensités:.....</b> | <b>28</b> |
| <b>III.5. 1. Etude des apports liquides : .....</b>                                          | <b>30</b> |
| <b>III.5.2. Estimation fréquentielle des apports.....</b>                                    | <b>31</b> |
| <b>III.5.2.1 Apports fréquentsiels : .....</b>                                               | <b>31</b> |
| <b>III.5.2.2. Apport solide et estimation du volume mort. ....</b>                           | <b>33</b> |
| <b>III.5.2.3.Etude de crue .....</b>                                                         | <b>33</b> |
| <b>III.6. Formules empiriques pour la détermination de la crue :.....</b>                    | <b>34</b> |
| <b>III.6.1.Hydrogramme de crue .....</b>                                                     | <b>34</b> |
| <b>III.6.2.Régularisation : .....</b>                                                        | <b>35</b> |
| <b>III.6.3.Répartition mensuel de l'apport 80%:.....</b>                                     | <b>36</b> |
| <b>III.6.4. Répartition mensuel des besoins :.....</b>                                       | <b>36</b> |
| <b>III.6.5. Courbes «Hauteurs-Capacités-Surfaces»:.....</b>                                  | <b>36</b> |
| <b>III.6.6 Calcule du volume utile :.....</b>                                                | <b>37</b> |
| <b>III.6.6. 1.Régularisation saisonnière sans tenir en compte les pertes:.....</b>           | <b>37</b> |
| <b>III.6.6. 2.Régularisation saisonnière avec pertes première approximation:.....</b>        | <b>38</b> |
| <b>III.6.6. 3.Régularisation saisonnière avec pertes deuxième approximation.....</b>         | <b>38</b> |
| <b>III.6.6.4. Estimation de l'erreur .....</b>                                               | <b>38</b> |
| <b>III.7. Laminage des crues:.....</b>                                                       | <b>39</b> |
| <b>III.7.1.Laminage des crues par la méthode de KOTCHERINE.....</b>                          | <b>39</b> |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| III.7.1.1.Estimation du débit de crue laminée:.....            | 40 |
| III.7.1. 2.Estimation de la charge au-dessus du déversoir..... | 40 |
| III.8. Etude d'optimisation :.....                             | 44 |
| III.8.1. La revanche :.....                                    | 44 |
| III.8.2. La largeur en crête: .....                            | 44 |
| III.8.3. La longueur de la crête: .....                        | 45 |
| III.8.4.Coût de la digue: .....                                | 45 |
| III.8.4.Calcul du coût de l'évacuateur de crue:.....           | 45 |
| III.8.2.2. Caractéristiques du barrage :.....                  | 48 |
| III.9.CONCLUSION:.....                                         | 48 |

## **Chapitre IV : Etude des variantes de la digue**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction .....                                               | 49 |
| IV.1.1 Avantages des barrages en terre:.....                          | 49 |
| IV.1.2 Inconvénients des barrages en terre:.....                      | 49 |
| IV.1.3 Classification des barrages en terres:.....                    | 49 |
| IV.2 Types des barrages en remblai envisage.....                      | 50 |
| IV.2.1 Barrage homogène :.....                                        | 50 |
| IV.2.2 Barrage en enrochements à noyau en argiles (Barrage zoné)..... | 50 |
| IV.2.3 Barrage en enrochement à masque en béton .....                 | 51 |
| IV.3 Le choix du site du barrage .....                                | 52 |
| IV.4 Le choix du type de barrage .....                                | 52 |
| IV.5 Fixation du choix définitif du type de barrage .....             | 53 |

## **Chapitre V : Etude du variante Retenue**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| V.1Intdodution:.....                                 | 54 |
| V.2 Classification de l'ouvrage :.....               | 54 |
| V.1.1. Hauteur de barrage :.....                     | 54 |
| V.3 Définition du profil générale de la retenue..... | 55 |
| V.3.1 Hauteur de barrage :.....                      | 55 |
| V.3.3 La longueur en crête :.....                    | 57 |
| V.3.4 Pentes des talus : .....                       | 57 |
| V.3.5 Protection de la Crête .....                   | 57 |
| V.3.6 Le volume du corps du barrage:.....            | 58 |

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>V.3.7 Variantes de la digue:</b>                                                           | <b>58</b> |
| <b>V.3.8 Protection des talus:</b>                                                            | <b>59</b> |
| <b>V.4 Drainage :</b>                                                                         | <b>64</b> |
| <b>V.4.1 Prisme de drainage :</b>                                                             | <b>64</b> |
| <b>V.4.2 Tapis de drainage :</b>                                                              | <b>65</b> |
| <b>V.5 La clé d'étanchéité:</b>                                                               | <b>65</b> |
| <b>V.6 Calcul des infiltrations à travers le corps de la digue:</b>                           | <b>66</b> |
| <b>V.6.1 Définition :</b>                                                                     | <b>66</b> |
| <b>V.6.2 Objectif de calcul d'infiltration :</b>                                              | <b>66</b> |
| <b>V.6.3 Les hypothèses de calcul de filtrations hydrauliques pour les barrages en terre:</b> | <b>66</b> |
| <b>V.6.4 Calcul du débit d'infiltration à travers le corps du barrage (débit de fuite):</b>   | <b>68</b> |
| <b>V.6.5 Calcul des fuites à travers la fondation.</b>                                        | <b>69</b> |
| <b>V.6.6 Calcul des filtres (annexes).</b>                                                    | <b>69</b> |
| <b>V.6.6.1 Règles des filtres.</b>                                                            | <b>69</b> |
| <b>V.6.6.2 Détermination de la courbe granulométrique des filtres.</b>                        | <b>70</b> |
| <b>V.7.1. Protection amont.</b>                                                               | <b>73</b> |
| <b>V.7.2. Prisme de drainage et tapis drainant.</b>                                           | <b>74</b> |
| <b>V.7.3. corps de la digue.</b>                                                              | <b>75</b> |
| <b>V.8 conclusion.</b>                                                                        | <b>75</b> |

## **Chapitre VI : Etude du Stabilité**

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>VI.1 Généralités sur l'étude de stabilité des pentes (barrage):</b>                     | <b>76</b> |
| <b>VI.2 Le glissement des talus</b>                                                        | <b>77</b> |
| <b>VI.2.1 Ordre de calcul (Méthode des tranches) :</b>                                     | <b>77</b> |
| <b>VI.2.2 Les caractéristiques géotechniques des sols</b>                                  | <b>77</b> |
| <b>VI.2.3 Calcul des forces appliquées à chaque tranche :</b>                              | <b>78</b> |
| <b>VI.2.4. Classement des forces :</b>                                                     | <b>80</b> |
| <b>VI.3 Calcul du coefficient de sécurité pour les différents types de fonctionnement.</b> | <b>80</b> |
| <b>VI.3.1 calcul de <math>K_s</math> (coefficient de sécurité)</b>                         | <b>80</b> |
| <b>VI.3.2 Calcul du <math>K_s</math> pour le cas de vidange rapide</b>                     | <b>81</b> |
| <b>VI.4.conclusion.</b>                                                                    | <b>82</b> |

## **Chapitre VII : Etude des variantes des ouvrages annexes**

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>VII.1 Introduction :</b>                               | <b>83</b> |
| <b>VII.2 Ouvrage de vidange :</b>                         | <b>83</b> |
| <b>VII.2.1 Choix de la variante</b>                       | <b>84</b> |
| <b>VII.3 Ouvrage de prise d'eau</b>                       | <b>84</b> |
| <b>VII.3.1 Type de prise :</b>                            | <b>85</b> |
| <b>VII.4 Ouvrage d'évacuateur de crues :</b>              | <b>86</b> |
| <b>VII.4.1 Différents types des évacuateurs de crues:</b> | <b>86</b> |

## **Chapitre VIII : Etude des ouvrages annexes**

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VIII.1 Introduction :</b>                                                                         | <b>88</b>  |
| <b>VIII.1.1 Synthèses de variantes de l'évacuateur de crue.....</b>                                  | <b>88</b>  |
| <b>VIII.1.1.1 Emplacement de l'évacuateur de crue :</b>                                              | <b>88</b>  |
| <b>VIII.1.1.2 Comparaison entre les rives :</b>                                                      | <b>88</b>  |
| <b>VIII.1.1.3 Constitution et choix de l'évacuateur de crue :</b>                                    | <b>88</b>  |
| <b>VIII.1.1.4 Type d'évacuateur de crue :</b>                                                        | <b>89</b>  |
| <b>VIII.1.2 Choix du tracé de l'axe :</b>                                                            | <b>89</b>  |
| <b>VIII.2 ETUDE DE LA VARIANTE RETENUE :</b>                                                         | <b>90</b>  |
| <b>VIII.2.1 Caractéristiques de l'évacuateur de crue :</b>                                           | <b>90</b>  |
| <b>VIII.2.2 Dimensionnement et calcul hydraulique de chacun des éléments de l'évacuateur de crue</b> | <b>91</b>  |
| <b>VIII.2.2.1 canal d'approche</b>                                                                   | <b>91</b>  |
| <b>VIII.2.2.2. Le déversoir :</b>                                                                    | <b>92</b>  |
| <b>VIII.2.2.3 Chenal d'écoulement</b>                                                                | <b>94</b>  |
| <b>VIII.2.2.4 Le convergent</b>                                                                      | <b>96</b>  |
| <b>VIII.2.2.5 Le coursier :</b>                                                                      | <b>97</b>  |
| <b>VIII.2.2.6 Dissipateur d'énergie</b>                                                              | <b>99</b>  |
| <b>VIII.2.2.7 Canal de restitution</b>                                                               | <b>101</b> |

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VIII.2.3 Conception de l'évacuateur de crues .....</b>                                        | <b>102</b> |
| <b>VIII.2.3.1 Hauteur des murs bajoyers_ .....</b>                                               | <b>102</b> |
| <b>VIII.2.3.2 Vérification de l'apparition des phénomènes hydrauliques dans le coursier.....</b> | <b>104</b> |
| <b>VIII.3 Dimensionnement de l'ouvrage de vidange.....</b>                                       | <b>104</b> |
| <b>VIII.3.1 Calcul du débit de vidange .....</b>                                                 | <b>104</b> |
| <b>VIII.3.2 Calcul de la section de la conduite de vidange de fond et son diamètre.....</b>      | <b>105</b> |
| <b>VIII.4 Dimensionnement de la prise d'eau .....</b>                                            | <b>106</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE</b>                                                                       |            |

## **LISTE DES TABLAUX**

### ***Chapitre II : Etude Géotechnique et géologique***

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II.01:</b> Coefficients d'accélération de zone .....                     | 05 |
| <b>Tableau II.02:</b> (S.E.V) Rive Gauche.....                                      | 07 |
| <b>Tableau II.03:</b> (S.E.V) Rive Droite.....                                      | 08 |
| <b>Tableau II.04:</b> (S.E.V) Axe de l'Oued.....                                    | 09 |
| <b>Tableau II.05:</b> Résultat des sondages .....                                   | 10 |
| <b>Tableau II.06:</b> Coefficient de perméabilité pour différents échantillons..... | 13 |

### ***Chapitre III : Etude hydrologique***

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.1 :</b> Surfaces partielles du bassin versant par tranches d'altitudes. ....       | 17 |
| <b>Tableau III.2:</b> Classification de l'O.R.S.T.O.M (type de relief). ....                      | 19 |
| <b>Tableau III.3:</b> La longueur de cours d'eau principale en chaque altitude. ....              | 20 |
| <b>Tableau III.4 :</b> Récapitulatif des caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant. | 21 |
| <b>Tableau III.5 :</b> Station pluviométriques. ....                                              | 21 |
| <b>Tableau III.6 :</b> Répartition de la température mensuelle d'air. ....                        | 22 |
| <b>Tableau III.7 :</b> Evaporation de surface. ....                                               | 23 |
| <b>Tableau III.8:</b> Répartition mensuelle des pluies. ....                                      | 24 |
| <b>Tableau III.9 :</b> Paramètres statistiques de l'échantillon. ....                             | 25 |
| <b>Tableau III.10 :</b> Les précipitations des différentes fréquences. ....                       | 26 |
| <b>Tableau III.11 :</b> Les précipitations des différentes fréquences. ....                       | 26 |
| <b>Tableau III.12 :</b> Les précipitations des différentes fréquences. ....                       | 28 |
| <b>Tableau III.14:</b> Formules et calculs de l'apport moyen annuel. ....                         | 30 |
| <b>Tableau III.15 :</b> L'apport liquide à différentes période de retour. ....                    | 31 |
| <b>Tableau III.16:</b> Détermination de la variable réduite de Gauss. ....                        | 32 |
| <b>Tableau III.17 :</b> Répartition des apports mensuels annuels. ....                            | 32 |
| <b>Tableau III.18 :</b> Apport solide en suspension. ....                                         | 33 |
| <b>Tableau III.19 :</b> Récapitulatif des débits en différentes fréquences. ....                  | 34 |
| <b>Tableau III.20:</b> Répartition mensuelle de l'apport 80%.....                                 | 36 |
| <b>Tableau III.21:</b> Répartition mensuelle des besoins. ....                                    | 36 |
| <b>Tableau III.22 :</b> Caractéristique topographique de la retenue. ....                         | 36 |
| <b>Tableau III.26 :</b> Données de départ pour la méthode de KOTCHERINE. ....                     | 42 |
| <b>Tableau III.27:</b> 2 <sup>e</sup> Etape de calcul. ....                                       | 42 |
| <b>Tableau III.28:</b> 3 <sup>e</sup> Etape de calcul. ....                                       | 42 |
| <b>Tableau III.29:</b> Calcul de la revanche. ....                                                | 44 |
| <b>Tableau III.30 :</b> Détermination de la largeur en crête. ....                                | 45 |
| <b>Tableau III.31:</b> Coût et volume de la digue. ....                                           | 45 |
| <b>Tableau III.32 :</b> Cout du déversoir. ....                                                   | 46 |
| <b>Tableau III.33:</b> Coût total de la retenue. ....                                             | 47 |
| <b>Tableau III.34:</b> Caractéristiques du barrage. ....                                          | 48 |

### ***Chapitre V : Etude de variante retenue de la digue***

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau V.01:</b> Classe de barrage en terre en fonction du type de la fondation ..... | 54 |
| <b>Tableau V.02:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de largeur en crête.....       | 56 |
| <b>Tableau V.03:</b> Valeurs indicatives des pentes des talus.....                        | 57 |
| <b>Tableau V.04:</b> Etude comparative de différentes variantes.....                      | 59 |
| <b>Tableau V.05:</b> Les valeurs de C en fonction de la pente du talus et du poids .....  | 61 |
| <b>Tableau V.06:</b> Résultats de calcul .....                                            | 62 |
| <b>Tableau VI.07:</b> Le coefficient K en fonction de la catégorie de l'ouvrage.....      | 63 |
| <b>Tableau V.08:</b> Coordonnées de la parabole de ZAMMARIN.....                          | 67 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau V.09:</b> Le gradient d'infiltration critique.....                                         | 69 |
| <b>Tableau V.10:</b> Le coefficient de sécurité en fonction de la classe de l'ouvrage.....            | 69 |
| <b>Tableau V.11:</b> Volumes des différentes couches de protection.....                               | 73 |
| <b>Tableau V.12:</b> Volumes des différents matériaux constituant le prisme et tapis de drainage..... | 74 |
| <b>Tableau V.13:</b> Volumes des différentes matériaux.....                                           | 75 |

### ***Chapitre VI : Etude de stabilité de la digue***

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau VI.01:</b> Coefficient de stabilité admissible des talus..... | 77 |
| <b>Tableau VI.03:</b> Caractéristique géotechnique .....                 | 78 |
| <b>Tableau VI.04:</b> Différentes coefficients de sécurité.....          | 82 |

### ***Chapitre VII : Etude de variante ouvrages annexes***

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau VII.01:</b> Type de vidange de fond en fonction de $H^2 \cdot \sqrt{V}$ ..... | 85 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### ***Chapitre VIII : Ouvrages Annexes***

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau VIII.01:</b> Sélection des types d'évacuateurs de crue douce..... | 89 |
| <b>Tableau VIII.02:</b> Les coordonnées du profil de déversoir.....          | 93 |
| <b>Tableau VIII.03:</b> Calcul de la ligne d'eau.....                        | 98 |
| <b>Tableau VIII.04:</b> Ligne d'eau à pas d'espace de 06 .....               | 98 |

## *LISTE DES FUGURES*

### ***Chapitre 0I : Etude topographiques***

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>FigureI.1:</b> PLAN DE SITUATION..... | 04 |
|------------------------------------------|----|

### ***Chapitre II : Etude Géotechnique et géologique***

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.02:</b> Extrait de la carte géologique générale de l'Algerie (Taher)..... | 06 |
| <b>Figure II.02:</b> Diagraphe R-Gauche.....                                           | 07 |
| <b>Figure II.03:</b> Diagraphe R-Droite.....                                           | 08 |
| <b>Figure II.04:</b> Diagraphe Axe de l'Oued.....                                      | 09 |

### ***Chapitre III : Etude hydrologique***

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.1 :</b> Bassin versant des côtières constantinois.....                                    | 16 |
| <b>Figure III.2 :</b> Courbe hypsométrique.....                                                         | 17 |
| <b>Figure III.3:</b> Profil en long du court d'eau principal.....                                       | 20 |
| <b>Figure III.4:</b> Distribution mensuelle de la température. ....                                     | 22 |
| <b>Figure III.5 :</b> Répartition mensuelle des pluies.....                                             | 24 |
| <b>Figure III.6 :</b> Ajustement à la loi Normale.....                                                  | 26 |
| <b>Figure III.7 :</b> Ajustement à la loi de GUMBEL.....                                                | 27 |
| <b>Figure III.8 :</b> Ajustement à la loi LOG-NORMALE.....                                              | 28 |
| <b>Figure III.9 :</b> Courbes des pluies courtes. ....                                                  | 29 |
| <b>Figure III.10 :</b> Courbe I-D-F. ....                                                               | 30 |
| <b>Figure III.11 :</b> Répartition des apports mensuels annuels. ....                                   | 32 |
| <b>Figure III.12 :</b> Les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour. ....                 | 35 |
| <b>Figure III.13 :</b> Courbe capacités-hauteurs. ....                                                  | 37 |
| <b>FigureIII.14 :</b> Courbes de $H= f(Q,q)$ ....                                                       | 43 |
| <b>Figure III.15 :</b> Courbes $V=f(Q,q)$ .....                                                         | 43 |
| <b>Figure.III.16:</b> La courbe d'optimisations des coûts en fonction de la largeur b du déversoir..... | 47 |

### ***Chapitre VIII : Ouvrages Annexes***

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure.VIII.1:</b> Profil du déversoir d'après Creager..... | 94 |
| <b>Figure.VIII.2:</b> Graphique de ligne d'eau de type T2..... | 99 |

## ***LISTE DES PLANCHES***

**Planche N°1 :** Plan d'aménagement.

**Planche N°2 :** Profil en long et coupe géologiques de la digue.

**Planche N°3 :** Coupes types de la digue des trois variantes.

**Planche N°4 :** Coupe type de la digue de la variante retenue.

**Planche N°5 :** Schémas de calcul de la stabilité.

**Planche N°6 :** Profil en long de l'évacuateur de crues.

# INTRODUCTION

L'eau est base de toute vie sur terre c'est pour cela que l'être humain s'y intéresse depuis la nuit des temps et veille à sa protection et sa préservation et son exploitation, c'est ainsi que la science de l'hydraulique fût créée. L'hydraulique est une science pluridisciplinaire, polyvalente qui réunit plusieurs autres spécialité notamment les sciences de génie civil, génie rural et la géologie....Etc.

Ce domaine est vivant et le domaine de recherche et de découvertes sont infinies.

C'est pour ça le gouvernement algérienne dans le cadre de la relance économique lancée, la direction de l'hydraulique de la wilaya de jijel a programmé parmi d'autres actions l'étude des autres retenues collinaires à travers la wilaya dont la zone oudjana commune taher wilaya de Jijel.

Ceci dans le but d'une utilisation rationnelle et planifiée de ce facteur vital qui est l'eau pour l'exploitation des petits périmètres d'irrigation.

Cette perspective rentre aussi dans le cadre du développement agricole qui a été basé dans les années précédentes sur l'irrégularité des pluies et qui aujourd'hui demande la mobilisation des volumes d'eau en rapport avec les besoins des superficies irriguées à une échelle locale.

L'étude de faisabilité de la retenue collinaire dans la zone oudjana commune Taher wilaya de Jijel. Aura à examiner la possibilité technique d'édifier une digue en fonction des conditions climatiques, topographiques, hydrologiques, géologiques et géotechniques existantes.

Outre le choix du type d'ouvrage et de son dimensionnement, des ouvrages annexes assureront un fonctionnement normal et une bonne sécurité de l'ouvrage.

La retenue collinaire a pour but l'irrigation des terres se trouvant en aval de la digue.

# CHAPITRE I: ETUDE TOPOGRAPHIQUE

## I.1 Introduction :

L'élaboration d'un projet d'une retenue collinaire passe nécessairement par des études préliminaires, à la base de la recherche et aux choix du site, à la bonne connaissance des conditions topographiques, géotechniques et hydrologique du site.

L'étude nous impose plusieurs variantes de choix des axes de l'implantation du barrage, pour choisir la meilleure solution de point de vue économique et technique.

Le choix du site d'emplacement d'un barrage se fait par la procédure suivante :

- ✓ Analyse des cartes topographiques;
- ✓ Reconnaissance du terrain par des études géologiques et topographiques;
- ✓ Estimation de la structure du terrain au moyen de la prospection géologique ou d'autres techniques possibles;
- ✓ Vérification de la structure du terrain au moyen du test de forage, de l'essai de perméabilité ou d'autres techniques possibles;
- ✓ Estimation du mécanisme d'écoulement des eaux à partir des résultats de l'observation des oueds;
- ✓ A cela s'ajoute au besoin, les données hydrologiques et météorologiques, telles que la pluviométrie et le débit du cours d'eau, sont également collecté pour déterminer la nécessité et la faisabilité du barrage.
- ✓ D'autre part, la gestion et l'entretien du barrage nécessitent une participation active de la communauté locale. Il faut donc mener une étude socio-économique afin de déterminer la possibilité de la participation des habitants. Une fois l'emplacement fixé, il est également important de promouvoir la participation de la communauté locale dès le stade de l'avant-projet.

## I.2 Situation :

Le site d'implantation de la retenue collinaire dite El Bohaira est situé dans la commune de Oudjana de la wilaya de Jijel, distant à 25 Km au sud Est de chef-lieu de wilaya.

Il est localisé sur la carte d'Etat Majeur de Jijel à l'échelle 1/50 000 par les coordonnées Lambert suivant :

**X= 185, 55 Km**

**Y = 383, 80 Km**

**Z = 232, 00 m (NGA)**

Cette retenue présente un lac de rétention de forme irrégulière situé au bas d'un versant d'une superficie de 0,101 Km<sup>2</sup> dont il collecte ses eaux.

✓ La localisation de la zone d'étude est présentée dans la Figure I.01

## I.3 Caractéristiques morphologiques :

Le site de la retenue collinaire sur « l'Oued Oudjana » est situé dans une zone montagneuse, qui présente un relief plus ou moins accidenté.

La pente du relief est sensiblement forte dans la partie amont du bassin versant, et sensiblement douce en amont immédiat de l'axe de la retenue.

La gorge choisie ou l'enlacement de l'axe de la retenue est l'endroit le plus fermé qui offre la plus petite distance de longueur en crête de la retenue et permet l'emplacement des ouvrages annexes dans les meilleures conditions technico-économiques.

Les fonds topographiques réalisés serviront comme support de base pour la détermination des différentes caractéristiques techniques à savoir.

-Détermination de la capacité de la retenue et sa surface en fonction de la cote du plan d'eau et de l'emplacement de la retenue.

-Evaluation du volume et d'importance des différents ouvrages et proposition de leur emplacement.

-Identification des ballastières et des zones exploitables.

-Elaboration d'un support pour le travail géologique.

-Elaboration d'un support de base pour l'étude technique approfondie.

## **I.4 Climatologie:**

Le climat régional de la retenue est caractérisé par les températures annuelles qui sont présentent ci-après :

- ✓ Température maximale absolue est de  $34,10^{\circ}\text{C}$  ;
- ✓ Température minimale peut descendre jusqu'au  $-4,30^{\circ}\text{C}$  ;
- ✓ Température moyenne annuelle est de  $17,8^{\circ}\text{C}$  ;

## **I.5 Recherche et choix du site:**

Le choix de bassin versant est basé sur les conditions géologiques et hydrologiques et une surface suffisante qui autorise le remplissage de la retenue, et un volume d'eau stockée à la retenue suffisant pour les besoins demandés.

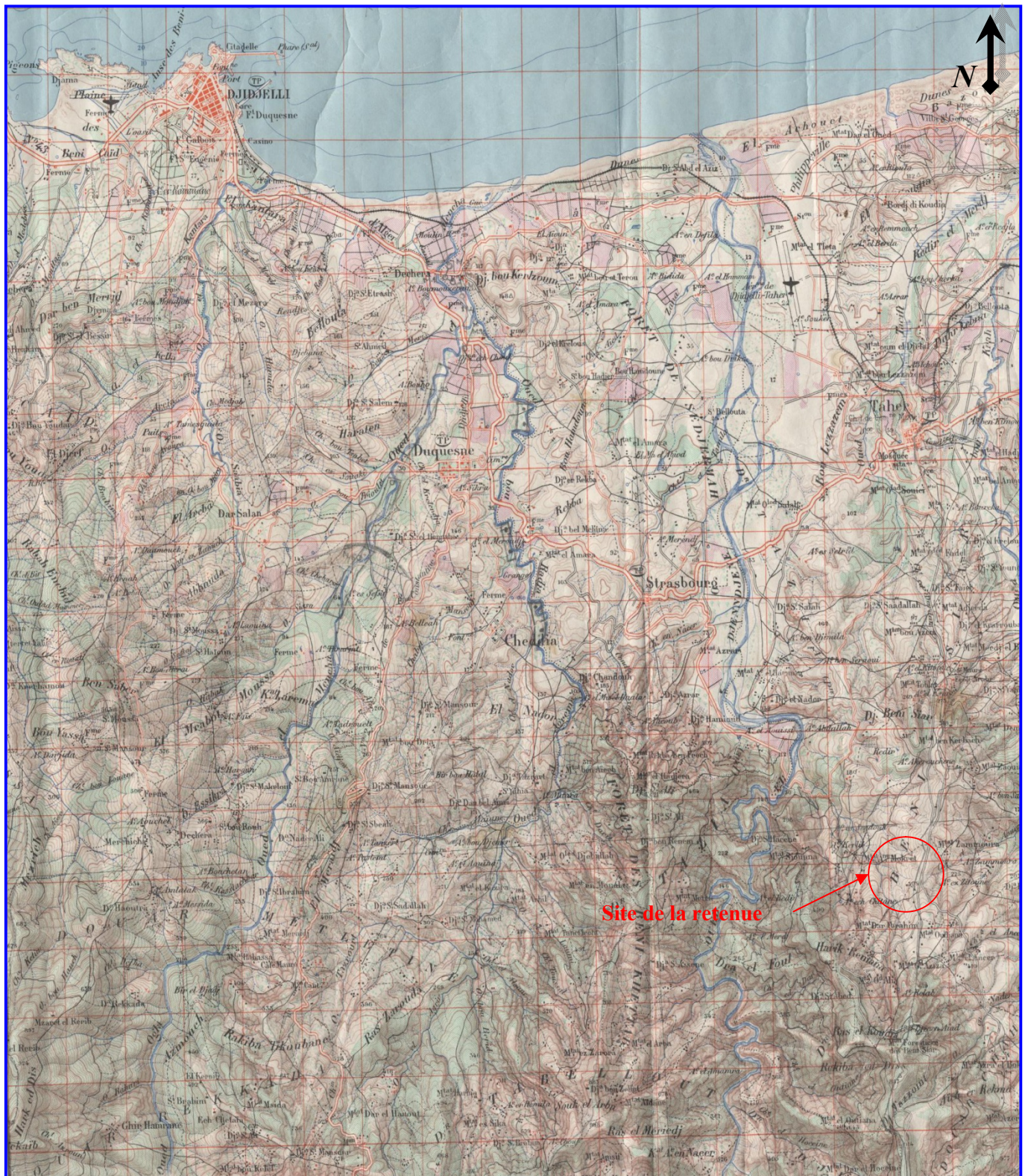
## **I.6 Choix de l'axe de la retenue :**

Pour le choix de l'axe de la retenue qui répond aux meilleures conditions techniques et économiques, on s'est basé essentiellement sur les conditions, géologiques, géotechniques et hydrauliques du site.

## **I.7 Choix de l'axe de l'évacuateur de crue :**

Le choix de l'emplacement de l'évacuateur de crues dépend des conditions topographiques.

Nous proposons que l'évacuateur de crue de surface soit implanté sur la rive gauche.



FIGI.1 PLAN DE SITUATION

EXTRAIT DE CARTE D'ETAT MAJOR

(ECHELLE 1/50 000)

**CHAPITRE II :**  
**ETUDE GEOLOGIQUE**  
**ET**  
**GEOTECHNIQUE**

## II. Introduction :

La géologie du bassin versant de la retenue collinaire de Oued OUDJANA est illustrée par l'extrait de la carte géologique ci-après dans la (figure II.1).

### II.1 Sismicité de la région :

La détermination du coefficient d'accélération de la zone d'étude destinée à la construction de notre retenue collinaire a été classé selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA.99.V2003) voir le tableauII.1 ci-après et la carte de micro zonage sismique du territoire national- RPA 99(version2003) en l'annexes I.

**Tableau II.01:** Coefficients d'accélération de zone.

| Groupe | Zone I | ZoneII-a | ZoneII-b | ZoneIII | Classification des ouvrages selon leur importance |
|--------|--------|----------|----------|---------|---------------------------------------------------|
| 1A     | 0,15   | 0,25     | 0,30     | 0,40    | Ouvrages d'importance vitale                      |
| 1B     | 0,12   | 0,20     | 0,25     | 0,30    | Ouvrages de grande importance                     |
| 2      | 0,10   | 0,15     | 0,20     | 0,25    | Ouvrages courants                                 |
| 3      | 0,07   | 0,10     | 0,14     | 0,18    | Ouvrages de faible importance                     |

RPA.99.V2003

Donc d'après la classification qui citée précédemment, on trouve que pour notre petite retenue collinaire (Ouvrages de faible importance), le coefficient d'accélération de notre zone d'étude (ZoneII-a)  $a=0,10$ .

### II.2 Géologie régionale :

Le site de la retenue collinaire constitue un lac de rétention aménagée en sorte du réservoir naturel en déblai et remblai au bas d'un versant dont il collecte ses eaux.

Ce terrain de fondation du site constitue une couverture de limons et argiles couvrant des marnes d'âge paléocène à l'intercalation de marno-calcaires.

La cuvette présente les mêmes formations suscitées avec l'accumulation des dépôts argileux et vaseux constituant les apports solides de la cuvette.

### II.3 Géologie du site :

- ✓ Notre site se situe en général sur des argiles brunes sableuses, alluvionnaires de blocs galets débris arrondis polygénique, hétérométrique donc c'est l'étagé quaternaire. Au fond de l'oued nous pouvons observer des marnes noires, sombres indurée, feuilletées par endroit gréseux et petite intercalation de grés beige et parfois des marnes ferrugineux fée avec passage de calcaire dolomitique, sombre microcristalline.

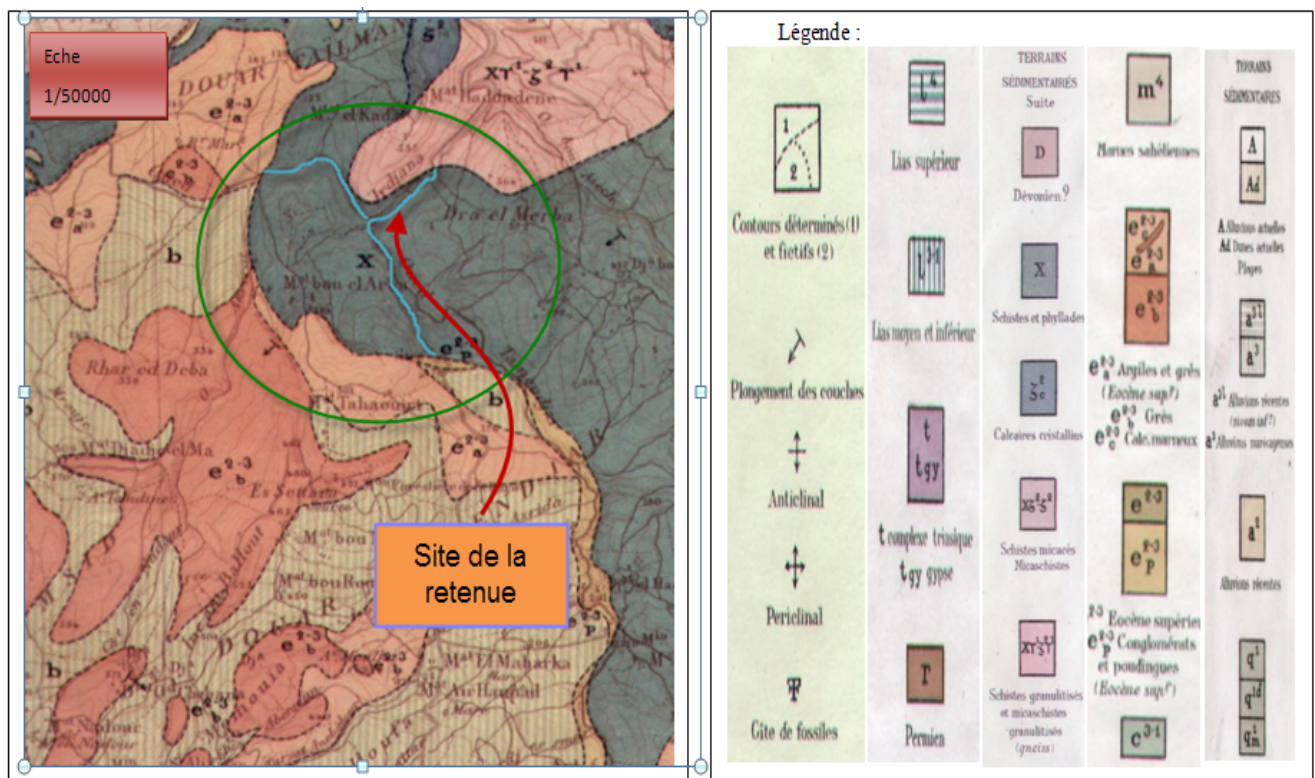
### II.4 Tectonique générale :

- ✓ Généralement la géologie structurale de la région étudiée présente un aspect trop accidenté (fissures, grandes failles principales et secondaires).
- ✓ La retenue collinaire sera implantée dans une région d'activité sismique.
- ✓ II.4 Hydrogéologie de l'assiette de la retenue :

- ✓ Du point de vue hydrogéologie nous avons remarqué la présence d'une nappe phréatique aquifère (libre) de nature très faibles dans la cuvette de part et d'autre des rives de l'oued, cette nappe est limitée; est formée de dépôt d'alluvions d'âge quaternaires. Cette nappe est alimentée directement par faible source et par pluviométrie; son substratum est formé de marnes gréseuses d'âge éocène.
- ✓ L'écoulement d'eau souterraine est du sud vers nord et de qualité chimique mauvaise (polluée).
- ✓ Le ruissellement d'eau de l'Oued est faible en hiver.

## II.5 Prospection géophysique :

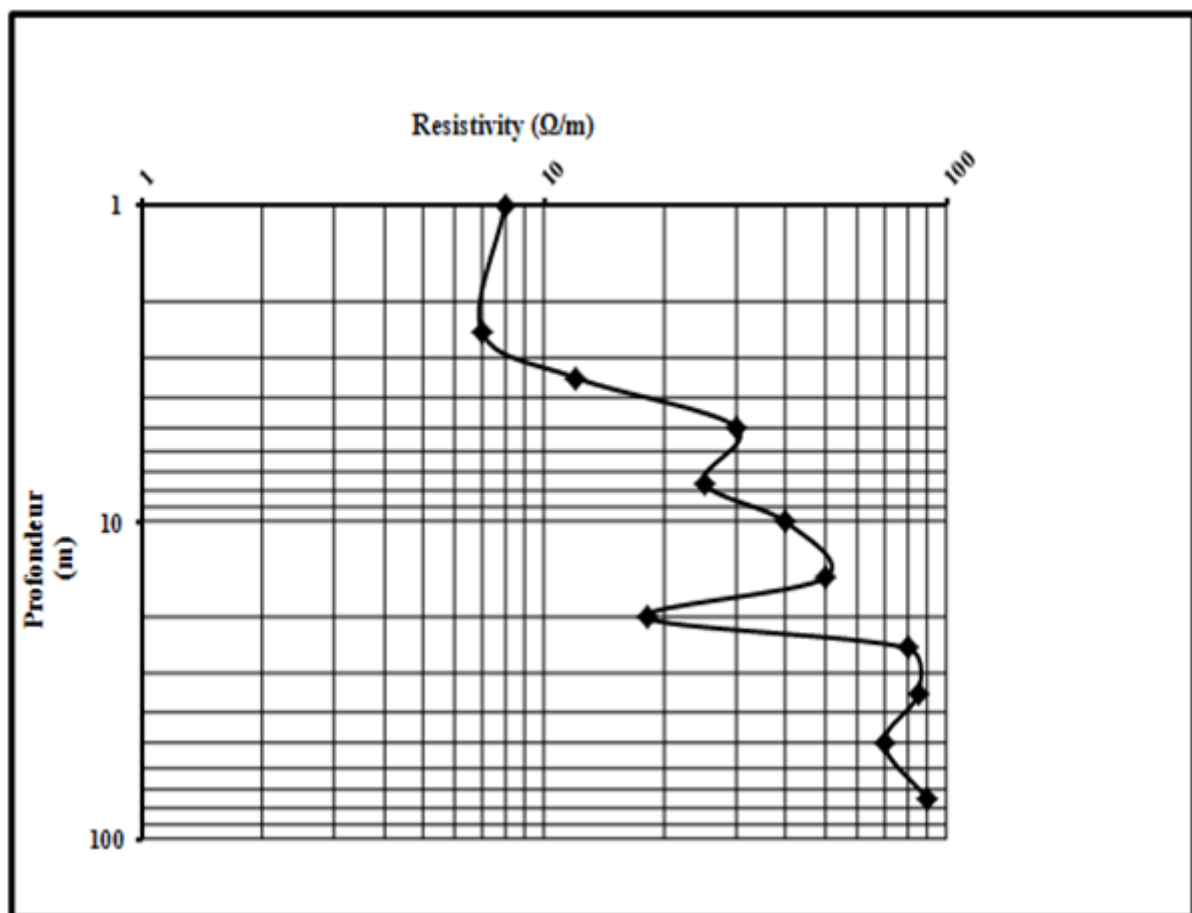
- ✓ Nous avons effectué 03 sondages électriques verticaux (03 s.e.v) AB/2=150m comme suit :
- ✓ Le premier SEV est réalisé sur la rive gauche;
- ✓ Le second SEV est réalisé sur la rive droite;
- ✓ Le troisième SEV est réalisé sur le lit de l'oued.
- ✓ Ces trois sondages nous ont permis de :
- ✓ Déterminer la présence ou l'absence de failles;
- ✓ Déterminer l'épaisseur de la formation alluvionnaire de l'oued;
- ✓ Reconnaître la formation géologique de la cuvette.
- ✓ Le principe de la prospection électrique consiste à injecter à l'aide des électrodes (A et B) un courant dans le sol et à mesurer entre (02) deux autres électrodes (M et N) La différence du potentiel D.V.
- ✓ Les résultats des sondages électriques sont représentés dans les tableaux II.01; 02



**FigureII.01:** Extrait de la carte géologique générale de l'Algérie (Taher).

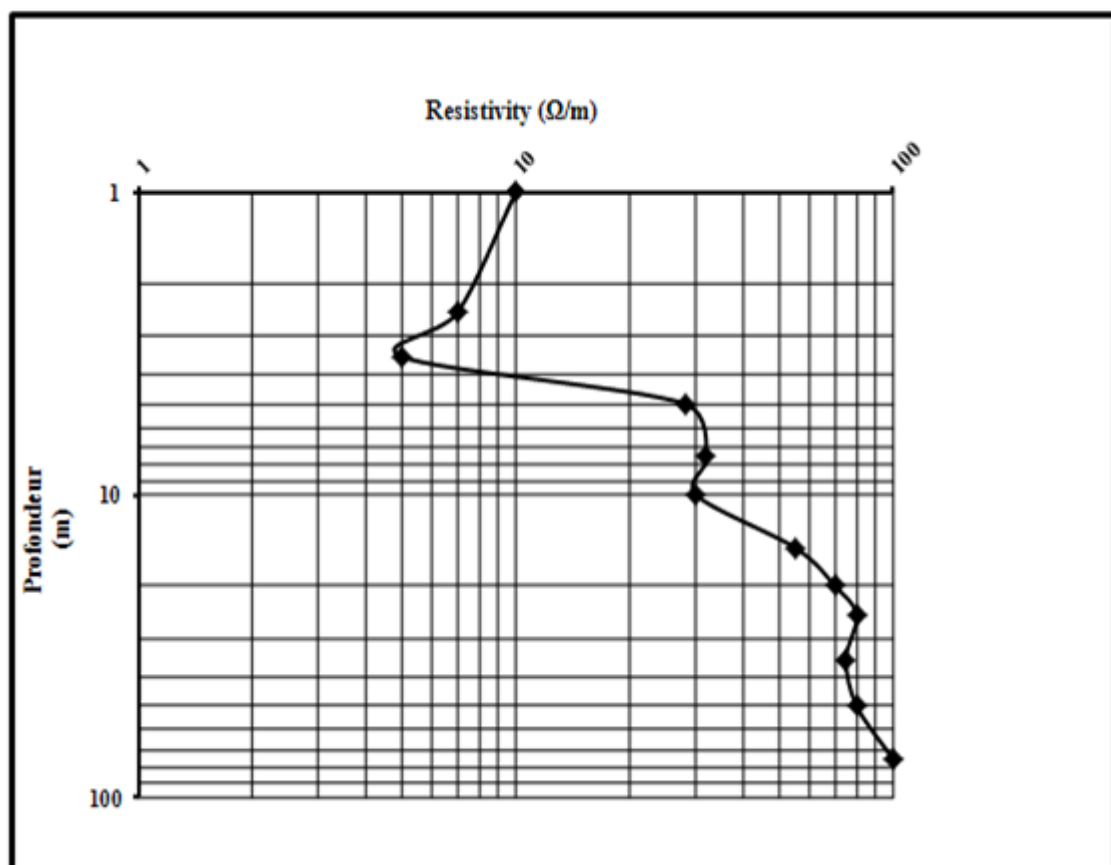
**-Tableau II.02:** (S.E.V) Rive Gauche

| N° | Mn/2 | AB/2 | Résistivité | Profondeur |
|----|------|------|-------------|------------|
|    | m    | m    | $\Omega/m$  | m          |
| 01 | 0,5  | 02   | 08          | 1,0        |
| 02 | 0,5  | 05   | 07          | 2,5        |
| 03 | 0,5  | 07   | 12          | 3,5        |
| 04 | 0,5  | 10   | 30          | 5,0        |
| 05 | 01   | 15   | 25          | 7,5        |
| 06 | 01   | 20   | 40          | 10         |
| 07 | 01   | 30   | 50          | 15         |
| 08 | 05   | 40   | 18          | 20         |
| 09 | 05   | 50   | 80          | 25         |
| 10 | 05   | 70   | 85          | 35         |
| 11 | 20   | 100  | 70          | 50         |
| 12 | 20   | 150  | 90          | 75         |

**FigureII.01 :** Diagramme rive-gauche

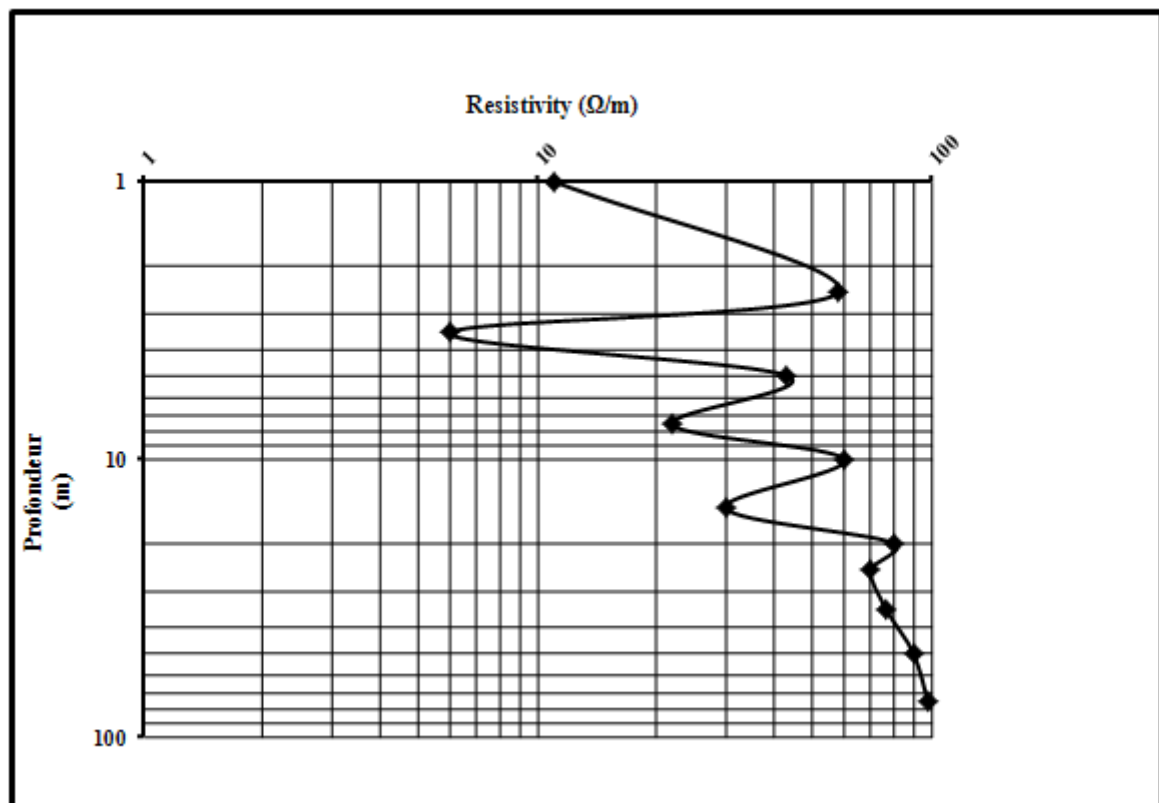
**-Tableau II.03:** (S.E.V) Rive Droite

| N° | Mn/2 | AB/2 | Résistivité | Profondeur |
|----|------|------|-------------|------------|
|    | m    | m    | $\Omega/m$  | m          |
| 1  | 0,5  | 2    | 10          | 1          |
| 2  | 0,5  | 5    | 7           | 2,5        |
| 3  | 0,5  | 7    | 5           | 3,5        |
| 4  | 0,5  | 10   | 28          | 5          |
| 5  | 1    | 15   | 32          | 7,5        |
| 6  | 1    | 20   | 30          | 10         |
| 7  | 1    | 30   | 55          | 15         |
| 8  | 5    | 40   | 70          | 20         |
| 9  | 5    | 50   | 80          | 25         |
| 10 | 5    | 70   | 75          | 35         |
| 11 | 20   | 100  | 80          | 50         |
| 12 | 20   | 150  | 100         | 75         |

**FigureII.02 :** Diagramme rive-droite

- **Tableau II.04:** (S.E.V) Axe de l'Oued

| N° | Mn/2 | AB/2 | Résistivité | Profondeur |
|----|------|------|-------------|------------|
|    | m    | m    | $\Omega/m$  | m          |
| 1  | 0,5  | 2    | 11          | 1          |
| 2  | 0,5  | 5    | 58          | 2,5        |
| 3  | 0,5  | 7    | 6           | 3,5        |
| 4  | 0,5  | 10   | 43          | 5          |
| 5  | 1    | 15   | 22          | 7,5        |
| 6  | 1    | 20   | 60          | 10         |
| 7  | 1    | 30   | 30          | 15         |
| 8  | 5    | 40   | 80          | 20         |
| 9  | 5    | 50   | 70          | 25         |
| 10 | 5    | 70   | 77          | 35         |
| 11 | 20   | 100  | 90          | 50         |
| 12 | 20   | 150  | 98          | 75         |

**FigureII.03 :** Diagramme axe de l'oued

**-Tableau II.05: Résultat des sondages**

| N°            | Résistivité | Profondeur | Symbole           | Formation Géologique                   |
|---------------|-------------|------------|-------------------|----------------------------------------|
| Rive Gauche   | 08 - 12     | 01 – 03    | $a^2 - a_{,,}$    | Alluvion perméable                     |
|               | 25 - 50     | 04 – 20    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes Gréseuses imperméables moyennes |
|               | 70 - 90     | 20 – 75    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes et grés                         |
| Rive Droite   | 05 - 10     | 01 – 02    | $a^2 - a_{,,}$    | Alluvion perméable                     |
|               | 28 - 55     | 03 – 15    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes Gréseuses imperméables moyennes |
|               | 70 - 100    | 15 – 75    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes et grés                         |
| Axe de l'oued | 06 - 08     | 01 – 04    | $a^2 - a_{,,}$    | Alluvion perméable                     |
|               | 22 - 60     | 03 – 15    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes Gréseuses imperméables moyennes |
|               | 15 - 98     | 15 – 75    | $e_{,,} - C^{9a}$ | Marnes et grés                         |

**II.6 Interprétation des sondages électriques et conclusions :**

- ✓ -Une prospection géologique a été menée sur le terrain, en plus des observations des différentes formations géologiques et des affleurements.
- ✓ -Une recherche hydrogéologique a été effectuée et une prospection géophysique dont l'interprétation des sondages électriques verticaux a été élaborée.
- ✓ Ces étapes nous mènent à la conclusion suivante :
- ✓ la présente étude conclue, la possibilité de construire la future digue sur le site étudié.
- ✓ la profondeur d'encrage varie entre (02 - 04) m à partir de la surface du terrain naturel.
- ✓ la cuvette et l'emplacement de l'axe de la digue sont caractérisés par une formation d'une imperméabilité moyenne (marne, gréseuse) par endroit qui ne cause pas un risque.
- ✓ la faille n'existe pas, mais la cuvette est formée par un synclinal.
- ✓ l'épaisseur de l'axe de digue est bon.
- ✓ la zone d'emprunt sur le site est insuffisante, mais elle est importante à l'extérieure du site à (01 km) vers le nord.
- ✓ la pente de la rivière est moyenne.

**II.7 Etude géotechnique :**

- ✓ L'étude géotechnique de la retenue collinaire sur SIDI MOUSSA est basée essentiellement sur les visites de reconnaissance de terrain au cours desquelles on a le programme suivant :
- ✓ Prospection in situ (exécution des fouilles, tranchées et sondages avec des prélèvements des échantillons de sol en différents endroits à différentes profondeurs);
- ✓ Travaux de laboratoire (essais géotechniques et chimiques du sol prélevé).

**II.7.1 Mode de prélèvement :**

- ✓ Quatre fouilles dénommées  $F_{01}$ ,  $F_{02}$ ,  $F_{03}$  et  $F_{04}$ ; ont été exécutées au moyen d'une pelle mécanique sur les rives droite et gauche et dans le lit d'oued ainsi que dans les deux zones d'emprunt. Leurs profondeurs sont comme suit :
- ✓  $F_{01}=4,00$  m rive droite;
- ✓  $F_{02}=4,00$  m rive gauche;
- ✓  $F_{03}=4,00$  m lit d'oued;
- ✓  $F_{04}=4,00$  m zone d'emprunt.
- ✓ Dimensions des puits : "1,00 \*3,00 \*4,00 "m.
- ✓ Les échantillons de sol ont été mis dans des sacs étanches afin de préserver leur teneur initiale.

**II.7.2 Essais de laboratoire :**

- ✓ Des échantillons de sol représentatifs prélevés dans les puits sont soumis aux essais physico-chimiques et mécaniques, il s'agit de :
- ✓ Analyses Granulométriques;
- ✓ Limites d'Atterberg;
- ✓ Poids volumiques apparent;
- ✓ Teneur en eau;
- ✓ Cisaillement direct UU;
- ✓ Consolidation à l'œdomètre;
- ✓ Compactage Proctor normal;
- ✓ Teneur en carbonates.

**II.7.3 Description et caractéristiques des sols en place :****♦ Rive droite :**

- ✓ Argile limoneuse noirâtre, molle à ferme avec présence de forte teneur en matière organique.
- ✓ Des essais d'identification réalisés sur ce matériau, ont donné les résultats suivants :
- ✓ Analyses Granulométriques :
  - ✓ ▪ Gravier  $G=01,90$  %;
  - ✓ ▪ Sable  $S=19,70$  %;
  - ✓ ▪ Fines  $F=78,40$  %.
- ✓ Limites d'Atterberg :
  - ✓ ▪ Limite de Liquidité  $W_L=43,00$  %;
  - ✓ ▪ Limite de Plasticité  $W_P=22,20$  %;
  - ✓ ▪ Indice de Plasticité  $I_P=20,60$  %.
- ✓ Cette formation est classée CL d'après la classification unifiée ASTM.
- ✓ ▪ Poids volumique apparent  $\gamma=1,651$  g/cm<sup>3</sup>.

**♦ Rive gauche :**

- ✓ Argile limoneuse noirâtre, molle à ferme avec présence de forte teneur en matière organique.
- ✓ Des essais d'identification réalisés sur ce matériau, ont donné les résultats suivants :
- ✓ Analyses Granulométriques :
  - ✓ ▪ Gravier  $G = 02,30 \%$ ;
  - ✓ ▪ Sable  $S = 20,80 \%$ ;
  - ✓ ▪ Fines  $F = 76,90 \%$ .
- ✓ Limites d'Atterberg :
  - ✓ ▪ Limite de Liquidité  $W_L = 42,70 \%$ ;
  - ✓ ▪ Limite de Plasticité  $W_P = 21,80 \%$ ;
  - ✓ ▪ Indice de Plasticité  $I_P = 20,90 \%$ .
- ✓ Cette formation est classée CL d'après la classification unifiée ASTM.
- ✓ ▪ Poids volumique apparent  $\gamma = 1,667 \text{ g/cm}^3$ .

**♦ Lit de l'oued :**

- ✓ Argile limoneuse noirâtre, molle à ferme avec présence de forte teneur en matière organique.
- ✓ Des essais d'identification réalisés sur ce matériau, ont donné les résultats suivants :
- ✓ Analyses Granulométriques :
  - ✓ ▪ Gravier  $G = 01,40 \%$ ;
  - ✓ ▪ Sable  $S = 18,00 \%$ ;
  - ✓ ▪ Fines  $F = 80,60 \%$ .
- ✓ Limites d'Atterberg :
  - ✓ ▪ Limite de Liquidité  $W_L = 44,20 \%$ ;
  - ✓ ▪ Limite de Plasticité  $W_P = 23,00 \%$ ;
  - ✓ ▪ Indice de Plasticité  $I_P = 22,60 \%$ .
- ✓ Cette formation est classée CL d'après la classification unifiée ASTM.
- ✓ ▪ Poids volumique apparent  $\gamma = 1,732 \text{ g/cm}^3$ .
- ✓ Un essai de cisaillement direct UU réalisé sur un échantillon représentatif, a donné un angle de frottement interne de  $12^\circ$  et une cohésion  $0,46 \text{ kg/cm}^3$ .

**♦ Zone d'emprunt :**

- ✓ Argile limoneuse avec peu de sable. Elle est constituée de plus de 88% d'éléments ayant un diamètre inférieur à  $0,080 \text{ mm}$ .
- ✓ Ce matériau est classé CL d'après la classification unifiée ASTM.
- ✓ Un essai de cisaillement direct UU réalisé sur un échantillon compacté à l'optimum Proctor (teneur en eau optimale est de  $18,95 \%$  et le poids volumique sec maximal est de  $1,676 \text{ g/cm}^3$ ) a donné un angle de frottement interne  $\phi_u$  de  $13,11^\circ$  et une cohésion  $C_u$  de  $0,400 \text{ kg/cm}^2$ .

**II.8 Perméabilité :**

Le coefficient de perméabilité a été évalué à partir de coefficient de consolidation  $C_v$ . L'essai de consolidation unidimensionnelle à l'oedomètre a été réalisé sur un échantillon reconstitué.

$$K = \frac{a_v * \gamma_w}{(1 + e_0)} * C_v \dots\dots\dots$$

(II.01)

Avec  $K$  : Coefficient de perméabilité;

- $\gamma_w$  : Poids spécifique de l'eau;
- $a_v$  : Coefficient de Compressibilité;
- $e_0$  : Indice des vides initial;
- $C_v$  : Coefficient de Consolidation.

**-TableauII.06:** Coefficient de perméabilité pour différents échantillons

| Echantillon    |                 | Perméabilité K |
|----------------|-----------------|----------------|
|                |                 | cm/sec         |
| Rive droite    | F <sub>01</sub> | 1,00 E-07      |
| Rive gauche    | F <sub>02</sub> | 2,20 E-07      |
| Lit d'oued     | F <sub>03</sub> | 1,10 E-07      |
| Zone d'emprunt | F <sub>03</sub> | 5,10 E-08      |

**II.8 Capacité portante :**

La Capacité Portante a été évaluée à partir des résultats des essais de cisaillement direct UU selon la formule suivant :

$$Q_{adm} = \gamma * D + \left[ \frac{0,5\gamma * B * N_\gamma + \gamma * D * (N_q - 1) + C * N_c}{F_s} \right] \dots\dots\dots (II.02)$$

Avec  $Q_{adm}$  : Capacité portante admissible;

- $\gamma$  : Poids volumique apparent;
- $\phi$  : Angle de frottement;
- $C$  : Cohésion;
- $B$  : Largeur de la semelle;
- $D$  : Profondeur d'encastrement;
- $F_s$  : Coefficient de sécurité;

$\left. \begin{matrix} N_\gamma \\ N_q \\ N_c \end{matrix} \right\}$  : Coefficients de Capacité portante;

AN :  $Q_{adm} = 1,90 \text{ kg/cm}^2$

**II-9 Conclusion et recommandations :**

- ✓ Sur le site objet de cette étude, il est prévu la réalisation d'une retenue collinaire.
- ✓ Les matériaux rencontrés en général sont des argiles limoneuses noirâtres, très humides.
- ✓ On notera la présence de la matière organique.
- ✓ Cette argile est moyennement imperméable ( $K > 10^{-7}$  cm/s).
- ✓ Pour garantir un bon ancrage de la digue, il est nécessaire d'exécuter une tranchée dans l'axe du barrage, assez large pour permettre l'accès aux engins, sa profondeur sera en fonction de la hauteur de la digue en général ( $1/4H$ ). Il est nécessaire de décaper les matériaux altérés en surface de la zone d'assise.
- ✓ Les ouvrages annexes seront dimensionnés pour une capacité portante admissible de 1,50 Kg/cm<sup>2</sup>
- ✓ La zone d'emprunt est localisée dans l'immédiat du site. Elle est constituée d'une argile limoneuse avec un peu de sable, sa perméabilité est de  $K < 5,1 \cdot 10^{-8}$  cm/s.
- ✓ Lors des travaux de chantier, il est nécessaire de surveiller les variations de la teneur en eau, trop sec ces sols se plastifient mal pendant le compactage, trop humide l'eau occupe un volume non réductible, donc le compactage engendre des pressions interstitielles excessives nuisible à la stabilité.
- ✓ Le choix du matériel de compactage est primordial pour une bonne exécution des travaux.
- ✓ Une planche d'essai est à prévoir pour le réglage de la teneur en eau optimale et le choix du type d'engin de compactage.

# CHAPITRE III:

## ETUDE HYDROLOGIQUE

**III.1 Introduction :**

L'étude hydrologique est indispensable pour toute mise en œuvre de projet hydrotechnique dont elle intervient et influe directement sur le dimensionnement, la sécurité et la bonne exploitation des ouvrages hydraulique, ceci fournit alors une approximation saine non seulement des débits en moyenne mais en plus des valeurs extrêmes (le volume et le débit maximal rares) qu'il faut considérer pour tous les ouvrages.

Par extension, l'étude hydrologique comprend également les informations sur le régime d'écoulement liquide d'où la régularisation sera étudiée et le transport solides de la rivière.

**III.2. Caractéristiques du bassin versant.[2,8]****III.2. 1. Caractéristiques géomorphométriques:**

- La superficie du bassin versant : La surface est obtenue par limitation du bassin versant :  $S = 0.101 \text{ Km}^2$ .
- Le périmètre du bassin versant :  $P = 1.34 \text{ Km}$ .
- Longueur du talweg principal (le plus long) :  $L_p = 54.45 \text{ Km}$ .

**III.2. 2. Caractéristiques hydromorphologiques :**

- Indice de compacité de Gravelius ( $K_c$ ) : il identifie la forme du bassin versant (allongé ou ramassé). il est déterminé par la formule suivante :

$$K_c = \frac{P}{P'} = \frac{P}{2\sqrt{S\pi}} \Rightarrow K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots (III.01)$$

A.N :  $K_c = 1.18$

- Coefficient d'allongement : il est déterminé par  $C_a = P/s$

A.N  $C_a = 1.283$

- Rectangle équivalent: Il permet de comparer les bassins versants entre eux de point de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés.

Sa longueur est donné par :

$$L = \frac{K_c \sqrt{s}}{1.128} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (III.02)$$

Sa largeur est donné par :

$$l = \frac{K_c \sqrt{s}}{1.128} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (III.03)$$

A.N :  $L = 0.430 \text{ Km}$  et  $l = 0.235 \text{ Km}$ .



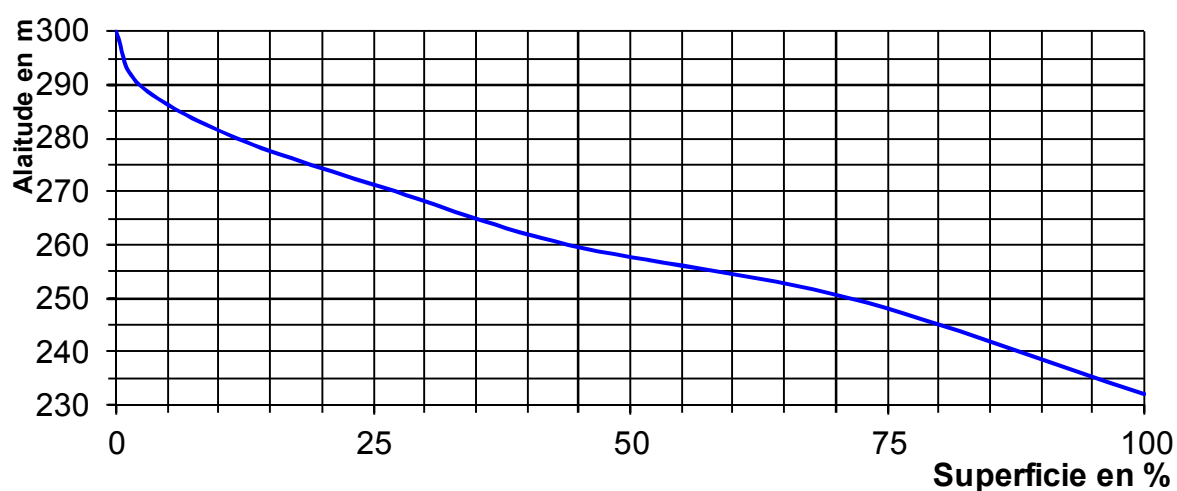
Figure III.1 : Bassin versant des côtières constantinoises

**III.2. 3. Hypsométrie du bassin versant :[2,8]****III.2.3.1 Le relief :****A- Répartition et courbe hypsométrique :**

Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses voir Figure III.2 et les différentes cotes. Voir tableau III.1

**-Tableau III.1 :** Surfaces partielles du bassin versant par tranches d'altitudes.

| Altitudes (m.NGA) | Hi (m) | Surfaces   |        |          |        | Hi.Si (m.Km2) |
|-------------------|--------|------------|--------|----------|--------|---------------|
|                   |        | Partielles |        | Cumulées |        |               |
|                   |        | Si (Km2)   | Si (%) | Si (Km2) | Si (%) |               |
| 232-233           | 295    | 0,0023     | 2.28   | 0,0023   | 2.28   | 162,23        |
| 233-234           | 2850   | 0,0094     | 9.31   | 0.0117   | 11.58  | 913,50        |
| 234-235           | 275    | 0,0155     | 15.35  | 0.0272   | 26.93  | 1707,75       |
| 235-236           | 265    | 0,0168     | 16.63  | 0.0440   | 43.56  | 7365,00       |
| 236-237           | 255    | 0,0273     | 27.03  | 0.0713   | 70.59  | 12261,30      |
| 237-238           | 241    | 0.0297     | 29.41  | 0.1010   | 100    | 18718,35      |
| somme             |        |            |        |          |        | 51664,68      |



**Figure III.2 :** Courbe hypsométrique

**B- Altitude médiane :**

L'altitude médiane correspond à celle lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique ; d'après la courbe hypsométrique :  $H_{\text{méd}} = 258 \text{ m NGA}$ .

**C -L'altitude moyenne :**

On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{S_i \cdot H_i}{S} \dots\dots\dots(\text{III.04})$$

**AN :  $H_{\text{moy}} = 258 \text{ m}$ .**

$H_{\text{moy}}$ : altitude moyenne du bassin (m).

$S_i$  : aire comprise entre deux courbes de niveau (km<sup>2</sup>).

$H_i$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

$S$  : superficie totale du bassin versant (km<sup>2</sup>).

Donc A.N  $\Rightarrow H_{\text{moy}} = 258 \text{ m NGA}$ .

**D – Altitude maximale et minimale :** Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques :  $H_{\text{max}} = 300 \text{ m NGA}$ .

$H_{\text{min}} = 232 \text{ m NGA}$ .

**III.2.3.2 Les indices :**

Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin et permettent la comparaison des bassins versant et les classer.

A- Indice de pente de ROCHE  $I_p$  :

Il est donné par la formule suivante :  $I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{A_i D_i} \dots\dots\dots(\text{III.04})$

Avec :  $L$  : longueur de rectangle équivalent (m)

$A_i$  : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives  $H_i$  et  $H_{i+1}$ .

$D_i = H_{i+1} - H_i$

On trouve  **$I_p = 3.817 \%$** .

B - Indice de pente globale  $I_g$  : (P. Dubreuil, 1974)

L'indice de pente global sera :  $I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \dots\dots\dots(\text{III.05})$

$L$  : la longueur du rectangle équivalent (km)

$D$  : Dénivelée entre  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  tel que :  $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

$H_{5\%} = 286 \text{ m}$ .

$H_{95\%} = 235 \text{ m}$ .

On trouve  $I_g = 11.86\%$ .

c- Indice de pente moyenne  $I_m$  :

Il est donné par la formule suivante :  $I = (H_{\text{max}} - H_{\text{min}})/L \dots\dots\dots(\text{III.06})$

A.N  $\Rightarrow I_m = 16.40\%$

d- Dénivelé spécifique :

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M appliquée à tous les bassins versant de déferant surface, on peut décrire la nature de relief du bassin versant.

**Tableau III.2:** Classification de l'O.R.S.T.O.M (type de relief).

| Relief | Ds (m)       |         |
|--------|--------------|---------|
| 1      | Très faible  | <10     |
| 2      | Faible       | 10-25   |
| 3      | Assez faible | 25-50   |
| 4      | Modéré       | 50-100  |
| 5      | Assez modéré | 100-250 |
| 6      | Fort         | 250-500 |
| 7      | Très fort    | >500    |

e- pente moyenne du bassin versant :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_m = \frac{\Delta H(0.5L_1 + L_2 + L_3 + \dots + 0.5L_n)}{\bar{S}} \dots \dots \dots (III.07)$$

Avec :  $\Delta H$  : dénivelée (m).

$L_i$  : longueur de la courbe de niveau d'ordre 1,2,...,n (m).

$S$  : surface du bassin versant (km<sup>2</sup>).

$$A.N \Rightarrow I_m = 16.40 \%$$

### III.2.4 Caractéristiques hydrographiques de bassin versant : [2,8]

#### III.2.4.1 Le réseau hydrographique :

$L$  : Longueur de rectangle équivalente de bassin versant

$$\text{Alors} \Rightarrow L_i = 62.95 \text{ Km.}$$

#### A-Temps de concentration du bassin versant $t_c$ :

Il est exprimé par l'expression suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{s} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{H_{lmoy} - H_{min}}} \dots \dots \dots (III.08)$$

Avec  $L_{cp}$  : longueur du cours d'eau principale..

$$\text{On trouve } t_c = 0.44 \text{ h.}$$

Nous utilisons la formule de GRIANDOTTI qui est d'emploi fréquent en Algérie parce que la formule de GRIANDOTTI tient compte plusieurs paramètres géométriques du bassin.

#### A- Vitesse de ruissellement :

Cette vitesse est déterminée par la formule suivante :

$L_p$  : Longueur du cours d'eau principal (Km)=0,36

$T_c$  : Temps de concentration (h).=0,44 heures

$$AN : V_r = 0,82 \text{ Km/h.}$$

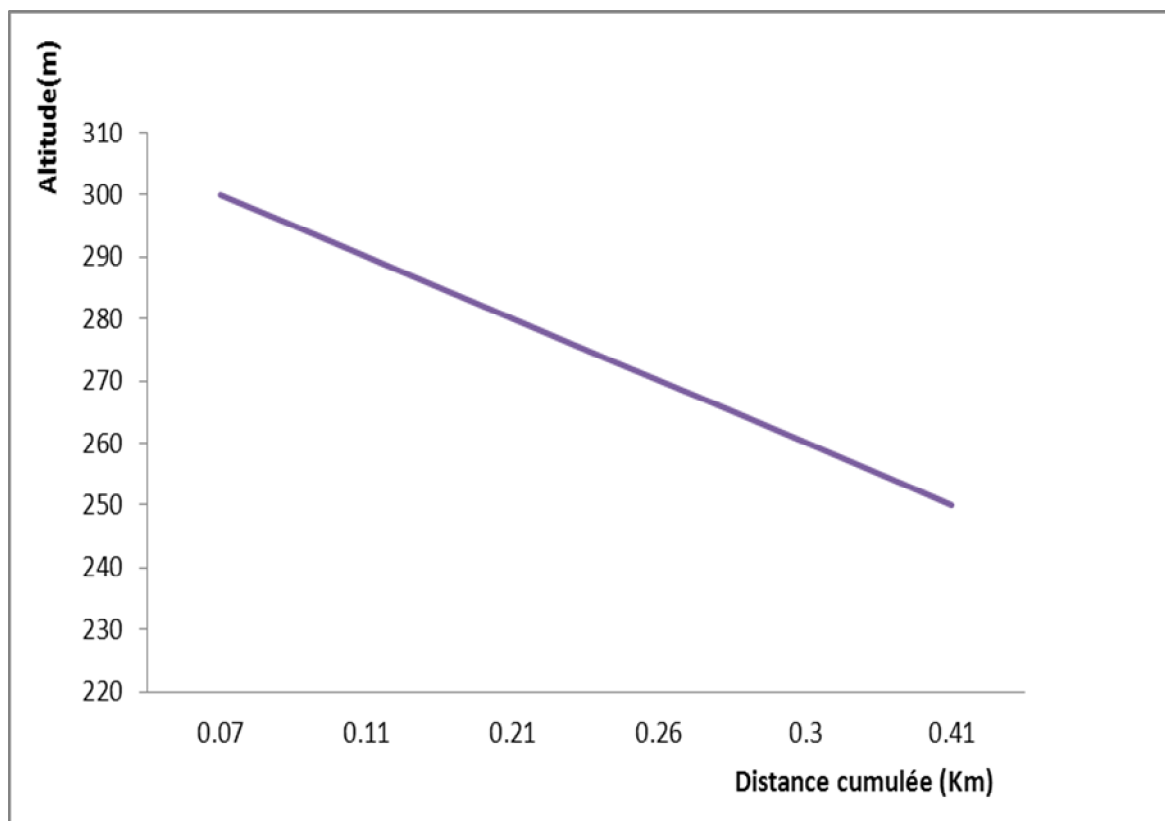
**III.2.4.2 Profil en long de l'oued :**

L'oued de Oudjana présente un profil en long assez régulier interrompu par quelques légères ruptures en pente.

Ce profil est tracé à partir des cartes topographiques à l'échelle 1/500 en tenant compte de l'altitude et de la longueur de cours d'eau jusqu' à l'exutoire.

**Tableau III.3:** La longueur de cours d'eau principale en chaque altitude.

| N° | Courbe de niveau (m) | Distance (Km) | Distance cumulée (Km) |
|----|----------------------|---------------|-----------------------|
| 1  | 232-250              | 0.07          | 0.07                  |
| 2  | 250-260              | 0.04          | 0.11                  |
| 3  | 260-270              | 0.1           | 0.21                  |
| 4  | 270-280              | 0.05          | 0.26                  |
| 5  | 280-290              | 0.04          | 0.30                  |
| 6  | 290-300              | 0.11          | 0.41                  |



**Figure III.3:** Profil en long du court d'eau principal

**Tableau III.4 :** Récapitulatif des caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant.

| <i>DESIGNATION</i>            |          | <i>SYMBOLE</i>   | <i>UNITES</i>      | <i>VALEUR</i> |
|-------------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------|
| Superficie                    |          | S                | km <sup>2</sup>    | <b>0,101</b>  |
| Périmètre                     |          | P                | km                 | <b>1,34</b>   |
| Longueur du thalweg principal |          | L                | km                 | <b>0,36</b>   |
| Pente du thalweg principal    |          | Ic               | %                  | <b>10</b>     |
| Indice de compacité           |          | K <sub>C</sub>   | -                  | <b>1,18</b>   |
| Coefficient d'allongement     |          | Ca               | -                  | <b>1,283</b>  |
| Rectangle équivalent          | longueur | L <sub>r</sub>   | km                 | <b>0,430</b>  |
|                               | largeur  | l <sub>r</sub>   | Km                 | <b>0,235</b>  |
| Altitudes                     | maximale | H <sub>max</sub> | m                  | <b>300</b>    |
|                               | moyenne  | H <sub>moy</sub> | m                  | <b>258</b>    |
|                               | médiane  | H <sub>med</sub> | m                  | <b>258</b>    |
|                               | minimale | H <sub>min</sub> | m                  | <b>232</b>    |
| Pente moyenne de B.V          |          | I <sub>m</sub>   | %                  | <b>16,40</b>  |
| Indice de pente globale       |          | I <sub>g</sub>   | %                  | <b>11,86</b>  |
| Indice de pente moyenne       |          | I <sub>m</sub>   | %                  | <b>15,81</b>  |
| Indice de pente de M Roche    |          | I <sub>p</sub>   | %                  | <b>3,817</b>  |
| Densité de drainage           |          | D <sub>d</sub>   | Km/Km <sup>2</sup> | <b>7.254</b>  |
| Temps de concentration        |          | T <sub>c</sub>   | h                  | <b>0,44</b>   |
| Vitesse de ruissellement      |          | V <sub>r</sub>   | Km/H               | <b>0,88</b>   |

**III.3.** Caractéristiques climatiques :**III.3.1.** Stations de référence:

L'objectif de l'étude climatologique est de fournir les caractéristiques climatiques au bassin étudié, données nécessaires pour la conception de la retenue et de ces ouvrages annexes.

Dans le bassin du côtier constantinois nous avons la station climatologique de **Jijel** .

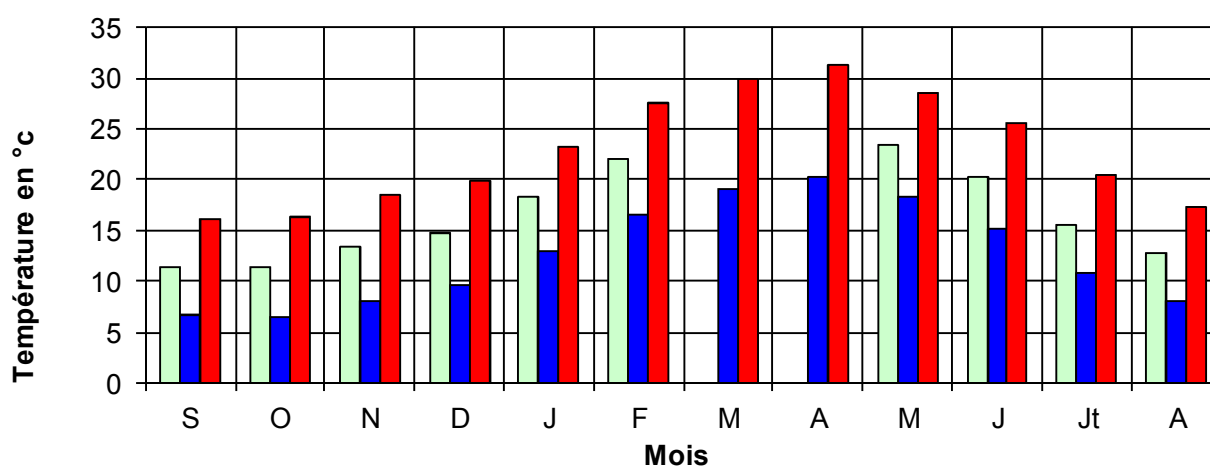
**Tableau III.5 :** Station pluviométriques.

| Nom de la station     | X (km) | Y (km) | Altitude (m)                 |
|-----------------------|--------|--------|------------------------------|
| <b>Jijel</b>          | 774.10 | 396.15 | 5.00                         |
| <b>Bassin versant</b> | 185.55 | 383.80 | 232.00 au site de la retenue |

Pour fournir les caractéristiques climatiques au bassin étudié, nous avons utilisé les données météorologiques enregistrées à la station de **Jijel** qui présente des séries de données complètes.

**III.3.2 Température de l'air :****Tableau III.6 :** Répartition de la température mensuelle d'air.

| Mois               | JAN  | FEV  | MAR  | AVR  | MAI  | JUN  | JUI  | AOU  | SEP  | OCT  | NOV  | DEC  | Année       |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| T°moyenne          | 11.4 | 11.4 | 13.3 | 14.8 | 18.2 | 22   | 24.5 | 25.8 | 23.4 | 20.3 | 15.6 | 12.7 | <b>17.8</b> |
| T°moyenne minimale | 6,7  | 6,5  | 8,1  | 9,6  | 13,0 | 16,5 | 19,0 | 20,3 | 18,3 | 15,1 | 10,8 | 8,1  | <b>12,7</b> |
| T°moyenne maximale | 16,1 | 16,3 | 18,4 | 19,9 | 23,3 | 27,5 | 30,0 | 31,3 | 28,5 | 25,5 | 20,4 | 17,3 | <b>22,9</b> |

**Figure III.4:** Distribution mensuelle de la température.

■ T°moyenne maximale

■ T°moyenne

■ T°moyenne minimale

La température la plus basse est enregistrée au mois de Janvier et est de **4.3 °C**

La température la plus élevée est enregistrée au mois d'Août et est de **34.1 °C**

Les vents sont de direction dominante Nord-Sud et Sud-Est, d'une vitesse faible de l'ordre de 1.1 m/s à 3.9 m/s.

**III.3.3 Evaporation de la surface de l'eau :**

L'évaporation en mm Bac classe A (voir tableau III.7) est mesurée selon l'ONM de Constantine à la station de Jijel pour une série s'étalant de 1988 à 2001.

**Tableau III.7 :** Evaporation de surface.

| Mois           | JAN  | FEV  | MAR  | AVR  | MAI  | JUN  | JUI   | AOU   | SEP   | OCT  | NOV  | DEC  | Année       |
|----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------------|
| <b>Evap mm</b> | 76   | 72   | 86   | 88   | 89   | 118  | 148   | 1153  | 128   | 107  | 81   | 76   | <b>1224</b> |
| <b>Evap %</b>  | 6,17 | 5,92 | 7,06 | 7,23 | 7,29 | 9,66 | 12,12 | 12,49 | 10,47 | 8,76 | 6,65 | 6,20 | <b>100</b>  |

Source: ANRH (Constantine)

**III.3.4 La pluviométrie :**

Aux alentours du bassin versant, nous avons la station de **Taher** (code 03 03 01) qui présente une série s'étalant de 1986 à 2001

Par la détermination de la pluviométrie moyenne qui tombe sur le bassin versant, nous avons utilisé la station pluviométrique de **Taher**, située au nord du bassin, (coordonnées :  $x = 785.60$   $y = 390.50$   $Z = 56$ ).

Le bassin versant se situe entre les isohyètes **1200 mm** et **1300 mm** et la valeur de la pluie moyenne annuelle enregistrée à la station pluviométrique de **Taher** d'après l'ANRH est de 1078 mm.

**III.3.5 Répartition mensuelle des pluies:**

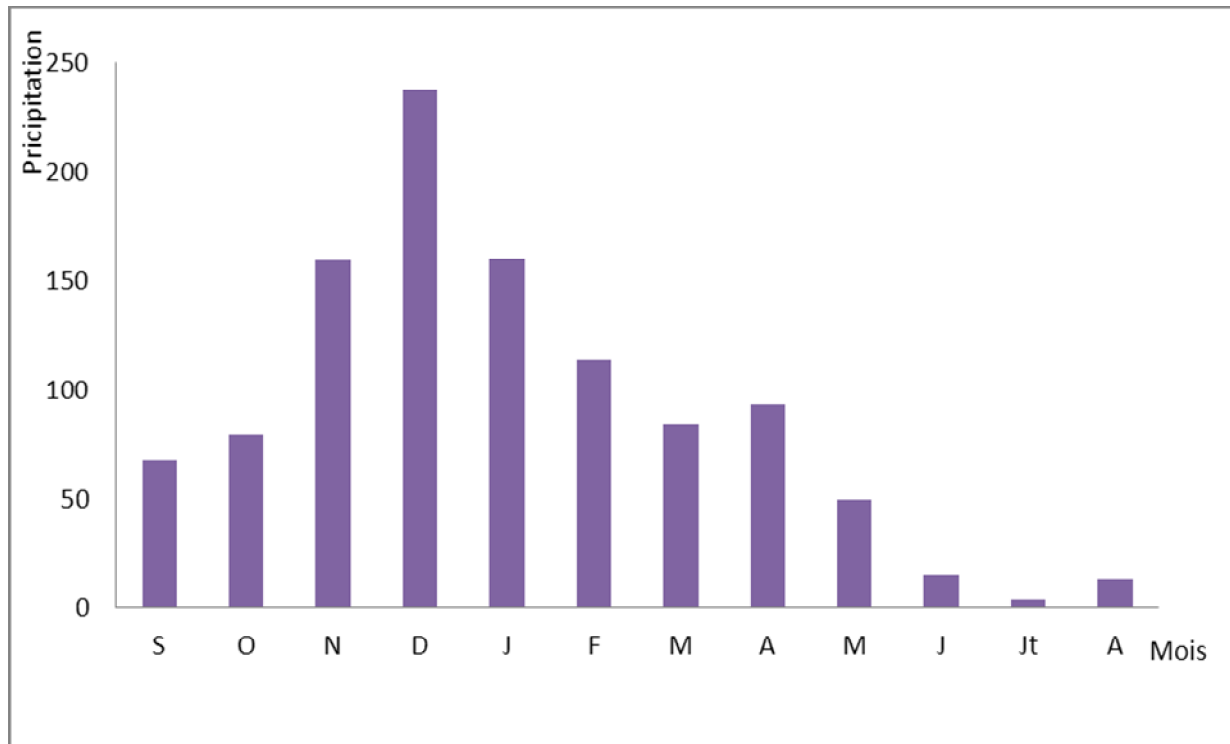
Pour la détermination de la répartition de la pluie sur la retenue, nous avons utilisé les données (homogénéisées) de la station de Constantine.

La distribution mensuelle des précipitations en mm est la suivante :

**Tableau III.8:** Répartition mensuelle des pluies.

| Année   | S     | O     | N      | D      | J      | F      | M     | A     | M     | J     | Jt   | A     | Annuel      |
|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------------|
| Moyenne | 58,54 | 68,77 | 137,70 | 205,74 | 138,44 | 98,52  | 72,92 | 80,73 | 43,21 | 13,13 | 2,99 | 11,16 | <b>932</b>  |
| %       | 6,28  | 7,38  | 14,77  | 22,07  | 14,85  | 10,57  | 7,82  | 8,66  | 4,64  | 1,41  | 0,32 | 1,20  | <b>100</b>  |
| Moyenne | 67,71 | 79,54 | 159,27 | 237,96 | 160,12 | 113,96 | 84,34 | 93,38 | 49,98 | 15,19 | 3,46 | 12,91 | <b>1078</b> |

Source: ANRH (Constantine)



**Figure III.5 :** Répartition mensuelle des pluies.

#### **III.3.5.1. Pluies maximales journalières :**

Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont des pluies génératrices des crues d'importants débits, contre lesquels il faut protéger l'ouvrage. Il faut le mettre le tableau du  $P_{max,j}$  (la série des pluies maximale journalières)

#### **III.3.5.2. Ajustement des pluies maximales journalières :**

L'ajustement des pluies maximales journalières sera effectué à l'aide du logiciel "hydrolab" .

**Tableau III.9 :** Paramètres statistiques de l'échantillon.

| caractéristiques                                | valeurs |
|-------------------------------------------------|---------|
| La somme des $P_{max,j}$ en (mm)                | 1542,2  |
| La moyenne des $P_{max,j}$ en (mm)              | 74.81   |
| L'écartype « $\bar{\sigma}$ » Pour $n < 30$ ans | 25.83   |
| Coefficient de variation « $C_v$ »              | 0,345   |
| L'exposant climatique                           | 0,41    |

**III.4. Choix de la loi d'ajustement : [2,8]**

Le choix d'une loi d'ajustement de la série pluviométriques est dépend de leur efficacité dont il est déterminé en fonction de la taille et de certaines caractéristiques de l'échantillon.

Toutefois, de nombreuses études comparatives, autant empiriques que théoriques, ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation est la plus efficace pour une loi donnée.

Les lois d'ajustement choisies sont :

- la loi de Normale.
- la loi de GALTON (log-normal).
- la loi de Gumbel

## 1) Ajustement à la loi normale :

Calcul des fréquences expérimentales (au non dépassement) :

$$q = F(x_i) = \frac{m - 0.5}{N} \dots\dots\dots (III.09)$$

et

$$T = \frac{1}{1 - q} \dots\dots\dots (III.10)$$

m : numéro d'ordre de la valeur N : taille de l'échantillon

Paramètres d'ajustement à la loi normale :

$$X_{p\%} = X_{\text{moy}} + \delta U_{p\%} \dots\dots\dots (III.11)$$

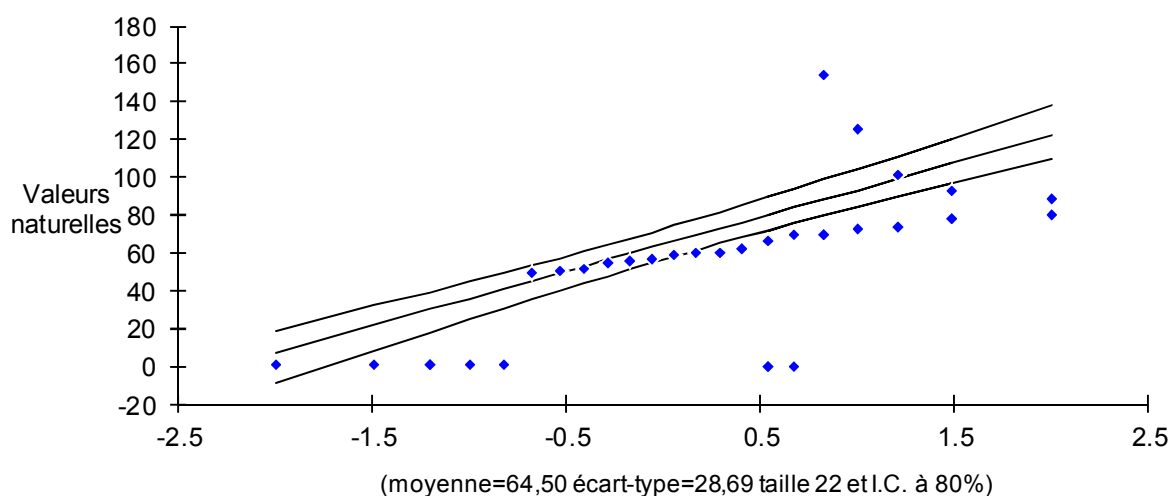
$X_{\text{moy}}$  : hauteur de pluie moyenne

$\delta$  : Ecart -type

$U_{p\%}$  : variable réduite de gauss

**Tableau III.10** : Les précipitations des différentes fréquences.

| Période de Retour (an)   | 1000           | 100            | 50             | 20            | 10            |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Fréquence                | <b>0.999</b>   | <b>0.99</b>    | <b>0.98</b>    | <b>0.95</b>   | <b>0.90</b>   |
| $P_{\text{max } j}$ (mm) | <b>134.919</b> | <b>127.877</b> | <b>117.312</b> | <b>96.549</b> | <b>74.813</b> |



**Figure III.6 :** Ajustement à la loi Normale

2) Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel avec "Hydrolab" :

C'est la loi à double exponentielle, elle est la plus utilisée pour les ajustements des pluies maximales journalières.

La répartition de la loi de Gumbel s'écrit :

$$F(x_i) = e^{-e^{-\alpha(x-x_0)}} \dots\dots\dots (III.12)$$

$$Y = -\log [-\log (F(x))] \dots\dots\dots (III.13)$$

L'équation de la droite de Gumbel s'écrit donc

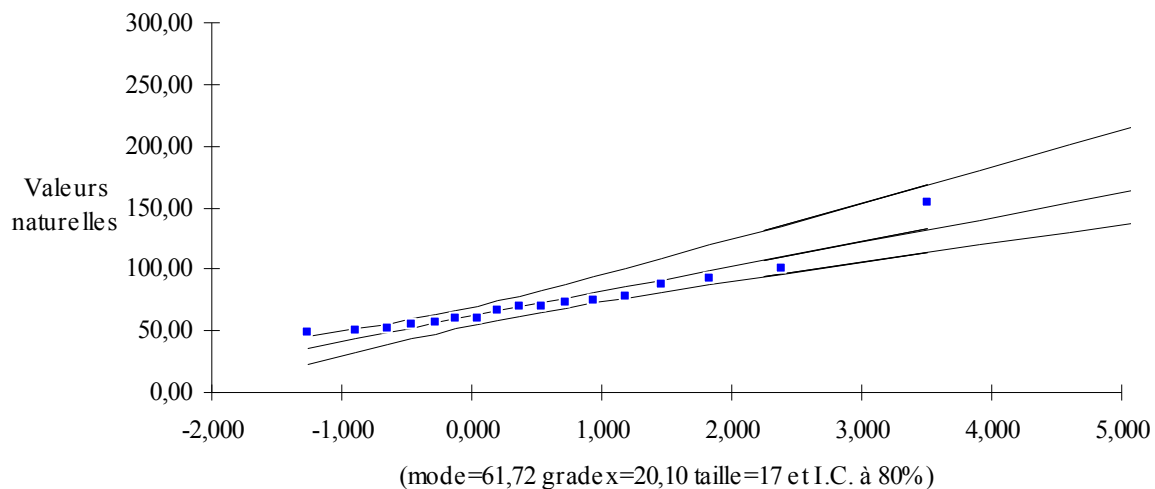
Y : Variable réduite de Gumbel;

F(x) : Fréquence au non dépassement.

Les résultats des ajustements des pluies sont présentés dans le Tableau III.11

**Tableau III.11 :** Les précipitations des différentes fréquences.

| Période de Retour (an)  | 1000           | 100            | 50             | 20            | 10            |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Fréquence               | <b>0.999</b>   | <b>0.99</b>    | <b>0.98</b>    | <b>0.95</b>   | <b>0.90</b>   |
| P <sub>max j</sub> (mm) | <b>155.876</b> | <b>141.808</b> | <b>123.034</b> | <b>93.409</b> | <b>70.571</b> |



**Figure III.7 :** Ajustement à la loi de GUMBEL.

- 1) Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Galton (loi de log-normale) "Hydrolab" :

Le procédé d'ajustement est identique à celui établi pour la loi de Gumbel, seul la représentation graphique change ou elle est faite sur papier log-normale, comme le montre la figure (II.11).

La loi de GALTON à une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad \text{..... (III.14)}$$

$$u = \frac{X_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (\text{variable réduite de GAUSS})$$

L'équation de la droite de GALTON est la suivante :

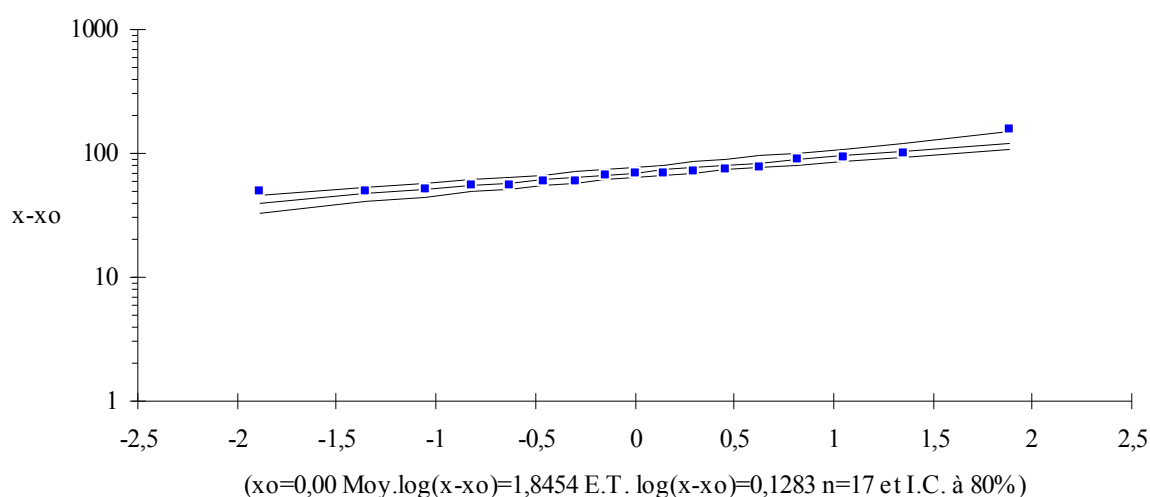
$$\text{Log } x(p\%) = \overline{\text{Log } x} + \square \text{Log } u(p\%) \quad \text{..... (III.15)}$$

$$\text{Log } X = \frac{\sum_{i=1}^{433} \text{Log } X_i}{N} \quad \text{..... (III.16)}$$

Les calculs sont faits à l'aide de logiciel HYDROLAB et les résultats de l'ajustement à la loi log normale (GALTON) sont données par mentionner dans l'annexe II.

**Tableau III.12** : Les précipitations des différentes fréquences.

| Période de Retour (an) | 1000          | 100           | 50            | 20            | 10            |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fréquence              | <b>0.999</b>  | <b>0.99</b>   | <b>0.98</b>   | <b>0.95</b>   | <b>0.90</b>   |
| $P_{\max j}$ (mm)      | <b>151,13</b> | <b>131,34</b> | <b>114,70</b> | <b>113,27</b> | <b>111,69</b> |

**Figure III.8** : Ajustement à la loi LOG-NORMALE**Conclusion :**

D'après les trois représentations graphiques ; il est à constater que la loi qui ajuste mieux la série c'est celle de la loi log normale autrement dit celle de GALTON ; les résultats donnés par celle-ci vont être considérés dans la suite de calculs.

**III.5. - Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leurs intensités:**

Pour une période donnée (24 h) et une fréquence donnée, on peut estimer les pluies de courtes durées par la formule de Montanami.

$$P_{\max,t,p\%} = P_{\max,j,p\%} \left( \frac{t}{24} \right)^b \dots\dots\dots (III.17)$$

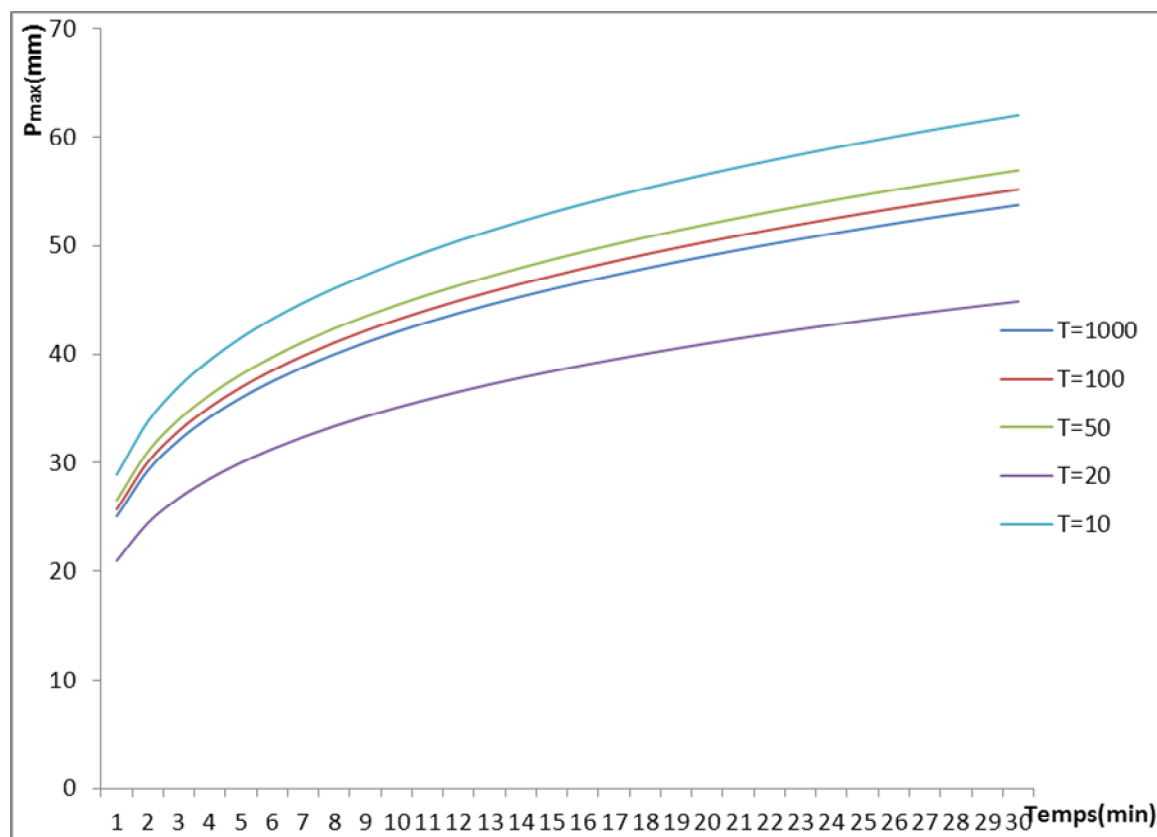
$P_{\max t p\%}$  : Pluie de courte durée de même fréquence que  $P_{\max,j,p\%}$  [mm].

$P_{\max j p\%}$  : Pluie maximale journalière pour une fréquence donnée [mm].

$t$  : Temps [heure]. = le temps de concentration

$b$  : Exposant climatique ( $b = 0,224$ ).

Les résultats de calcul de  $P_{\max,t,p\%}$  et  $I_0$  sont donnés dans (ANNEXE II)



**Figure III.9 :** Courbes des pluies courtes.

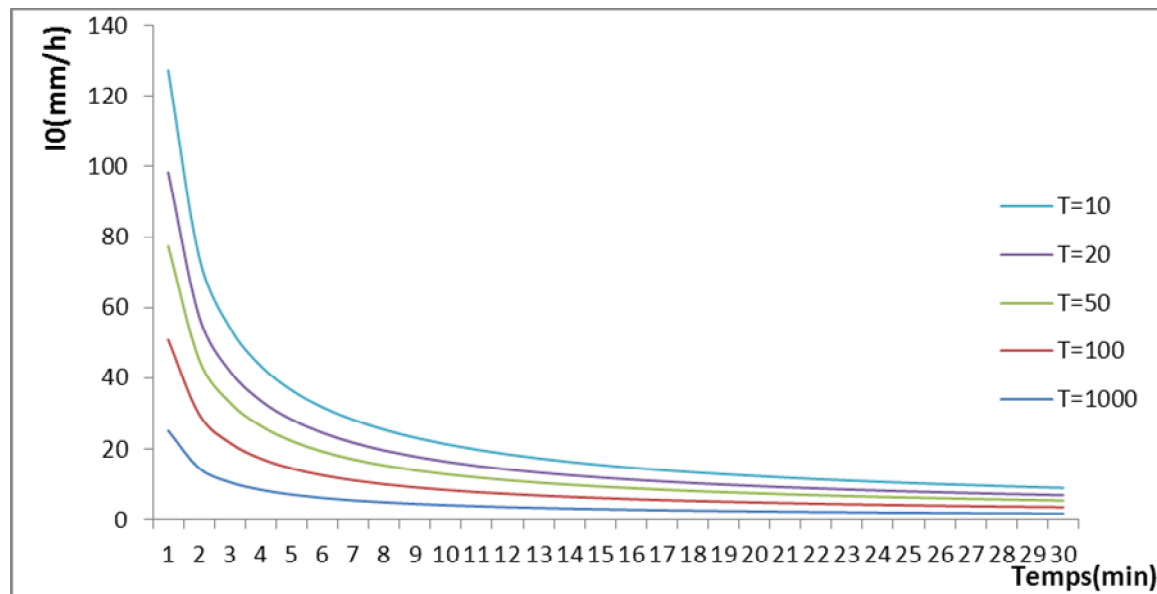


Figure III.10 : Courbe I-D-F.

### III.5. 1. Etude des apports liquides :

La détermination des apports liquides est basée sur les observations hydrométriques, quand elles existent sur le bassin versant propre du site étudié ou par analogie avec un bassin voisin. A défaut de ces dernières, des modèles et des formules empiriques basés sur la pluviométrie devront être appliqués.

Les calculs et les formules de l'apport moyen annuel sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.14: Formules et calculs de l'apport moyen annuel.

| méthode                     | Formule                                                                    | Apport=Le<br>S (Mm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Formule de SAMIE</b>     | $L_e = P_{\text{moy}}^2 (293 - 2.2\sqrt{S})$                               | 0,034                             |
| <b>Formule de MEDINGUER</b> | $L_e = 1024(P_{\text{moy}} - 0.26)^2$                                      | 0,07                              |
| <b>Mallet – Gauthier</b>    | $L_e = 0,6 \cdot P_{\text{moy}} (1 - 10^{-0,36 \cdot P_{\text{moy}}^2})$   | 0,040                             |
| <b>Formule de l'ANRH</b>    | $A_0 = 0.915 \cdot P_{\text{moy}}^{2.684} \cdot S^{0.842}$                 | 0,162                             |
| <b>Deri II</b>              | $A_0 = 0,513 \cdot P_{\text{moy}}^{2.683} \cdot D_d^{0.5} \cdot S^{0.842}$ | 0,245                             |

L'apport considéré pour le reste de l'étude est celui calculé par la formule de SAMIE parce qu'elle donne des valeurs très proches pour trois méthodes ainsi que deux valeurs voisine celle de SAMIE et ANRH a l'obligation de faire un choix des 5 méthodes en choisi Celle de Mallet – Gauthier.  $A=0,048\text{Mm}^3$

**III.5.2. Estimation fréquentielle des apports :[2]****III.5.2.1 Apports fréquents :**

Pour déterminer les apports fréquents, il est recommandé d'employer la loi Galton ou la loi log-normal exprimée en termes d'apport moyen et de sa variabilité. Le coefficient de variation de l'apport moyen  $C_v$  qui intervient dans cette formule pourra être calculé par la relation de Padoun pour des rivières à écoulement temporaires,

$$A_F = \frac{A_o}{\sqrt{(C_v^2 + 1)}} e^{u_F \sqrt{\ln(C_v^2 + 1)}} \dots\dots\dots (III.18)$$

$$C_v = \frac{0.93}{M_o^{0.23}} \dots\dots\dots (III.19)$$

Où:  $A_F$ : Apport fréquentiel, en  $\text{hm}^3$ .

$u_F$ : Variable réduite de Gauss, qui est fonction de F

$A_o$ : Apport moyen annuel, calculé auparavant, en  $\text{hm}^3$ .

$C_v$ : Coefficient de variation de l'apport moyen.

$M_o$ : Module spécifique de l'apport moyen annuel, exprimé en  $\text{l/s/km}^2$ .

On aura

$$A = 0.15 e^{U_F^{0.99}} \dots\dots\dots (III.20)$$

Les apports liquides de différentes fréquences sont portés dans le tableau

**Tableau III.15 : L'apport liquide à différentes période de retour.**

| <b>Période de retour<br/>P</b>                       | 20 ans  | 10 ans  | 5 ans   | 2 ans   | 5 ans  | 10 ans | 20 ans |
|------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| <b>Fréquence F (%)</b>                               | 5       | 10      | 20      | 50      | 80     | 90     | 95     |
| <b>Apport liquide<br/>(<math>\text{hm}^3</math>)</b> | 0,75    | 0,52    | 0,34    | 0,15    | 0,048  | 0,04   | 0,03   |
| <b>Lame d'eau<br/>ruisselée (mm)</b>                 | 7495,59 | 5236,97 | 3380,18 | 1469,46 | 641,35 | 410,69 | 286,66 |

La fréquence F en % est calculée par deux formules :

$F < 50 \%$  on a  $F = 100 / P$

$F > 50\%$  on a  $F = 100 / (100 - P)$

Dans le tableau ci joint, on donne la valeur de la variable réduite de Gauss pour la fréquence d'emploi agricole 80%.

**Tableau III.16:** Détermination de la variable réduite de Gauss.

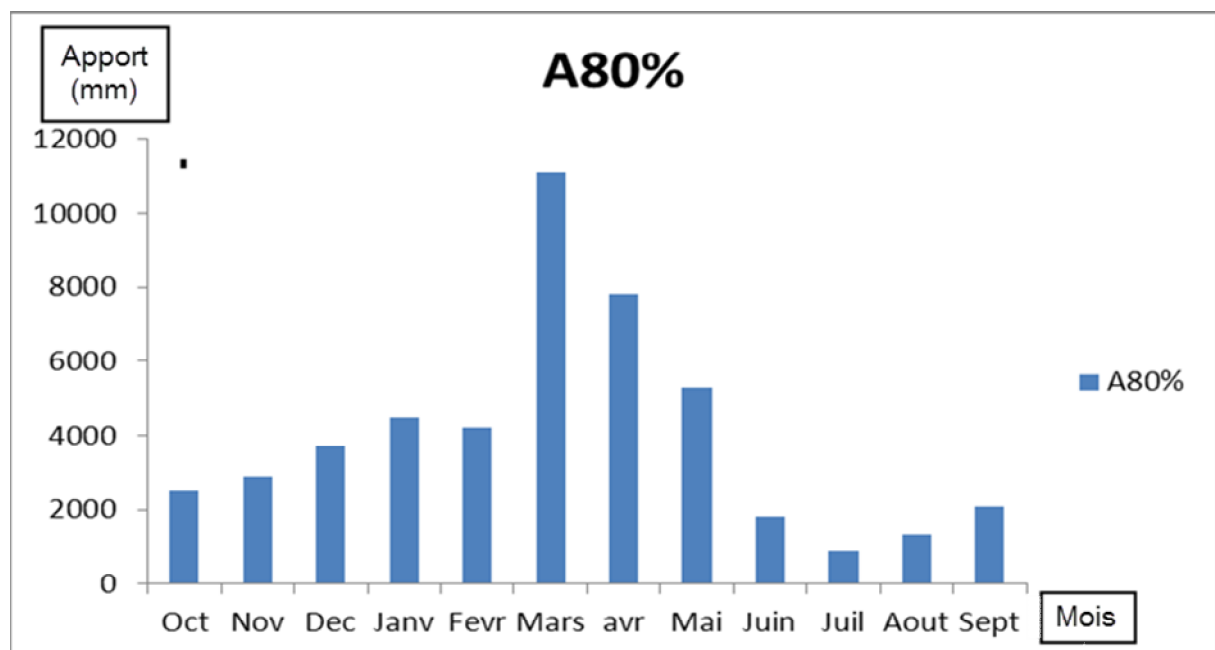
| Utilisation de l'eau | Fréquence (%) | $U_F$ | Apport liquide (hm3) | Lame d'eau ruisselée (mm)<br>$Le = \frac{A}{S} \cdot 10^3$ |
|----------------------|---------------|-------|----------------------|------------------------------------------------------------|
| Agricole             | 80            | 0.841 | 0.048                | 480                                                        |

**Répartition de l'apport moyen annuel estimé à une probabilité de 80% :**

La répartition mensuelle de l'apport moyen annuel suit la même répartition mensuelle des précipitations ; on a :  $A_{80\%} = 0,048 \text{ Mm}^3$  ; on a donc :

**Tableau III.17 :** Répartition des apports mensuels annuels.

| Mois                   | <i>Oct</i> | <i>Nov</i> | <i>Dec</i> | <i>Janv</i> | <i>Fevr</i> | <i>Mars</i> | <i>avr</i> | <i>Mai</i> | <i>Juin</i> | <i>Juil</i> | <i>Aout</i> | <i>Sept</i> | Total |
|------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| A (%)                  | 5.2        | 6          | 7.8        | 9.4         | 8.8         | 23.1        | 16.2       | 11         | 3.7         | 1.8         | 2.7         | 4.3         | 100   |
| $A_{80\%}(\text{m}^3)$ | 2500       | 2900       | 3700       | 4500        | 4200        | 1110        | 7800       | 5300       | 1800        | 900         | 1300        | 2100        | 4800  |



**Figure III.11 :** Répartition des apports mensuels annuels.

**III.5.2.2. Apport solide et estimation du volume mort :[2]**

Les apports solides dépendent de l'élément du Bassin Versant, du relief, de la nature géologique des sols et de leurs résistances à l'érosion liée elle-même à la couverture végétale et au régime des pluies.

En raison de manque des données de mesure du transport solide ; on opte des méthodes empiriques qui permet d'établir une estimation acceptable de l'écoulement solide.

**Tableau III.18** : Apport solide en suspension.

| Méthode  | Formule                                            | Taux d'abrasion                | Volume annuel moyen      |
|----------|----------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Fournier | $T_0 = 91,78 \cdot \frac{P_m^2}{P_{moy}} - 737,62$ | 1445,213.t/km <sup>2</sup> /an | 80,76 m <sup>3</sup> /an |
| Texeront | $Q_s = \alpha \cdot L_e^{0.15}$                    | 882,28 t/km <sup>2</sup> /an   | 82,74 m <sup>3</sup> /an |

Avec:

$$Van_{moy} = (1-1.1) \times Ta \times S / \delta_s \dots\dots\dots(III.21)$$

$\delta_s$  : Poids spécifiques moyen des sédiments = 1.4 t/m<sup>3</sup> ;

$P_m$  : Pluie mensuelle du mois le plus pluvieux en mm ;

$PA$  : Pluie moyenne annuelle en mm ;

$h = 45\%(H_{max} - H_{min})$  [m] ;

$S$  : Surface du bassin versant en Km<sup>2</sup>;

$Le$  : La lame écoulé en mm.

D'après les deux résultats on prend la plus défavorable et qui représente en même temps la formule la plus répandus dans les régions arides ; alors pour un délai de service de 20 ans le volume de l'apport solide en suspension seras :  $V_{ms}=82,74m^3$ .

**-Apport solide en charriage :**

En général le transport solide par charriage est estimé en Algérie de (30 % à 40%) du transport solide en suspension, donc:

Le transport solide par charriage = 35% du transport solide en suspension

Alors, Le transport solide par charriage = 73,65 m<sup>3</sup>

➤ Le volume mort total est estimé pour 20 ans  $V_m= 1273m^3$ .

**III.5.2.3.Etude de crue :[11]**

A priori, les méthodes de calcul des crues de projet ne diffèrent ni selon la taille des ouvrages, ni même selon celle des bassins versants, du moins en dessous de quelques centaines de km<sup>2</sup>. Mais en pratique, il y a deux spécificités importantes pour les petits et moyens barrages :

L'estimation des crues révèle une grande importance pour la sécurité de l'ouvrage à implanter. Les paramètres définissant une crue sont :

**1-** Le débit maximum de la crue (débit de pointe).

- 2- Le volume de la crue.
- 3- La forme de la crue (Hydrogramme de crues).
- 4- Le temps de base.

### III.6. Formules empiriques pour la détermination de la crue :

Ces méthodes d'estimation des débits sont extrêmement sommaires et ne peuvent en aucun cas se substituer à une étude hydrologique complète.

Les formules qui sont utilisées pour faire notre calcul sont :

- Formule de MALLET – GAUTHIER.
- Formule de SOKOLOVSKY.
- Formule Turraza.

**Tableau III.19 :** Récapitulatif des débits en différentes fréquences.

| Formule                                       | $Q_{0,1\%}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{1\%}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{2\%}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{5\%}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{10\%}$<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|-----------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Mallet - Gauthier</b>                      | <b>1,01</b>                        | <b>0,85</b>                      | <b>0,80</b>                      | <b>0,72</b>                      | <b>0,66</b>                       |
| <b>Sokolovsky</b>                             | <b>0,71</b>                        | <b>0,71</b>                      | <b>0,54</b>                      | <b>0,84</b>                      | <b>0,60</b>                       |
| <b>Turraza</b>                                | <b>2,64</b>                        | <b>2,34</b>                      | <b>2,22</b>                      | <b>1,62</b>                      | <b>2,04</b>                       |
| <b><math>Q_{\max}</math>(m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>1,45</b>                        | <b>1,3</b>                       | <b>1,19</b>                      | <b>1,06</b>                      | <b>1,10</b>                       |

#### III.6.1. Hydrogramme de crue : [11,5]

Détermination des hydrogrammes de crues probables par la méthode de Sokolovski qui considère que l'hydrogramme présente deux branches de courbe, l'une pour la montée et l'autre pour la décrue. Chacune d'elle a sa propre équation.

*Pour la montée :*

$$Q_m = Q_{\max} \left( \frac{t}{t_m} \right)^x \dots\dots\dots (III.22)$$

*Pour la décrue :*

$$Q_d = Q_{\max} \left[ \frac{(t_d - t)}{t_d} \right]^y \dots\dots\dots (III.23)$$

Avec :  $Q_m$  : débit instantané de la montée (m<sup>3</sup>/s).

$Q_d$  : débit instantané de la décrue (m<sup>3</sup>/s).

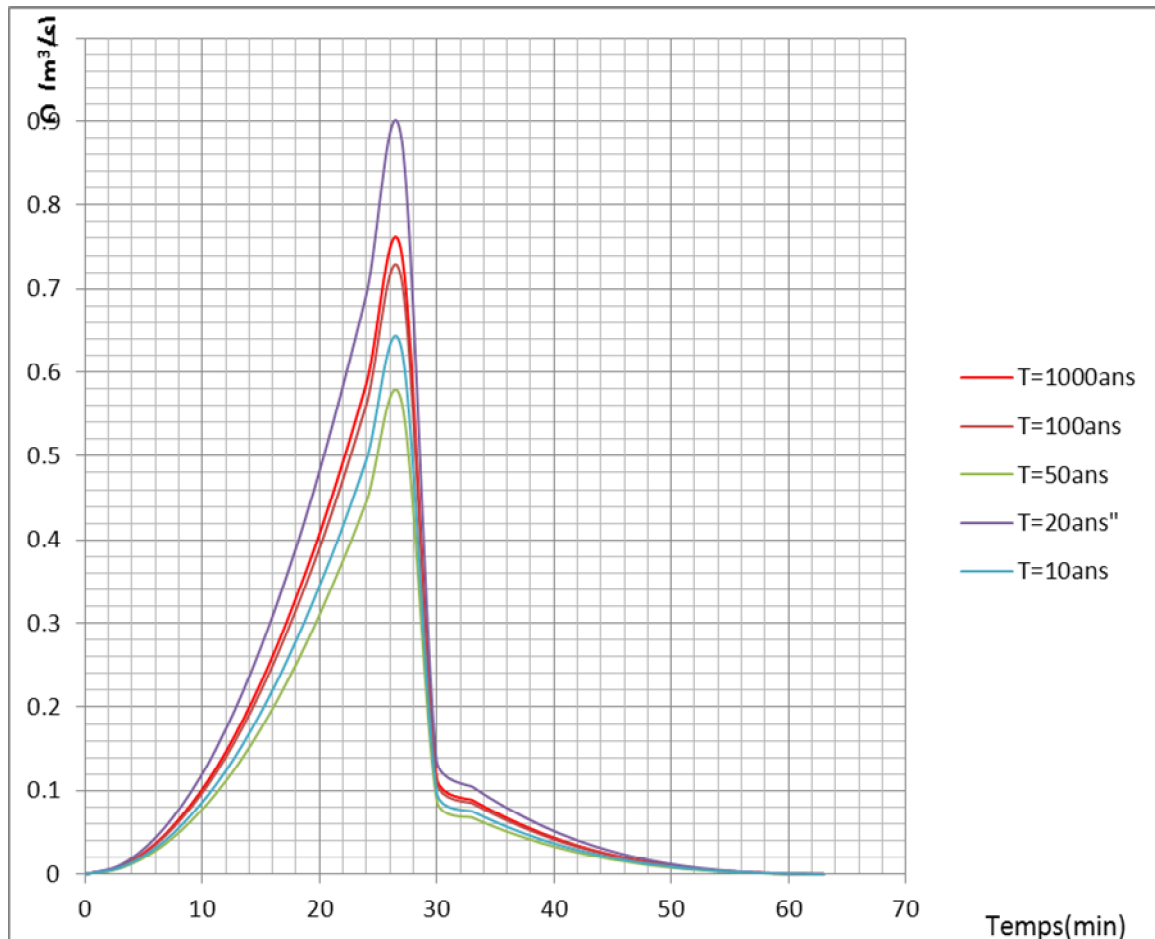
$Q_{\max}$  : débit maximum probable de la crue (m<sup>3</sup>/s).

$x, y$  : puissance des courbes :  $n=2$  et  $m=3$ .

$t_m$  : temps de la montée de la crue (h) qui égale au temps de concentration 0,44h

$t_d$  : temps de la décrue (h) d'où  $t_d = \delta t_m$ .

$\delta =$  (2-4) : coefficient dépendant des caractéristiques du bassin versant,  
 Pour notre cas on prend  $\delta=2.5$  ; alors  $t_m = 0,44$  h et  $t_d = 1,1$  h.  
 Les hydrogrammes de crues pour différentes périodes de retour sont présentés dans le Tableau III.20 (Annexe II)



**Figure III.12 :** Les hydrogrammes de crues à différentes périodes de retour.

### III.6.2.Régularisation : [11]

La régularisation des débits permet de déterminer la meilleure façon de la restitution des eaux stockées. L'objectif est donc de satisfaire la demande en aval, que se soit en eau potable, en irrigation, pour la production de l'énergie électrique ou encore pour la navigation (grands barrages).

Différents types de régularisation sont utilisés :

La régularisation saisonnière.

La régularisation interannuelle.

Les paramètres générant le calcul de la régularisation sont :

- ✓ L'apport ( $A_{80\%}$  en M m3).

- ✓ La consommation totale ( $M m^3$ ).
- ✓ Les infiltrations et l'évaporation.
- ✓ Les courbes caractéristiques de la retenue

### III.6.3. Répartition mensuel de l'apport 80% :

La répartition des apports mensuels est constituée par les apports de l'oued Oudjana à Taher sont réparties comme le tableau suivant.

**Tableau III.20:** Répartition mensuelle de l'apport 80%.

| Mois          | Oct      | Nov      | Dec      | Jan      | Fev      | Mar      | Avr      | Mai      | Jn       | Jl      | Aou      | Sept     | Total     |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|-----------|
| A (%)         | 5.2      | 6        | 7.8      | 9.4      | 8.8      | 23.1     | 16.2     | 11       | 3.7      | 1.8     | 2.7      | 4.3      | 100       |
| A<br>80%(Mm3) | 250<br>0 | 290<br>0 | 370<br>0 | 450<br>0 | 420<br>0 | 111<br>0 | 780<br>0 | 530<br>0 | 180<br>0 | 90<br>0 | 130<br>0 | 210<br>0 | 4800<br>0 |

### III.6.4. Répartition mensuel des besoins :

Le volume cumulé sera utilisé pour l'irrigation des terrains agricoles de la vallée en aval; ces besoins sont répartis comme suit :

**Tableau III.21:** Répartition mensuelle des besoins.

| Mois  | Oct | Nov | Dec | Janv | Fevr | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juil | Aout | Sept | Total |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| B(%)  | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 5    | 15   | 20   | 25   | 20   | 15   | 100   |
| B(m3) | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 1100 | 3200 | 4200 | 5300 | 4200 | 3200 | 2100  |

Source : ANRH (Constantine)

### III.6.5. Courbes «Hauteurs-Capacités-Surfaces» :

L'élaboration des courbes capacité-hauteurs-surfaces se fait suivant la formule suivante :

$$\Delta V = (S_i - S_{i+1}/2) \times \Delta H \dots\dots\dots (III.24)$$

D'où  $S_i$ : surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau  $H_i$  en  $m^2$ .

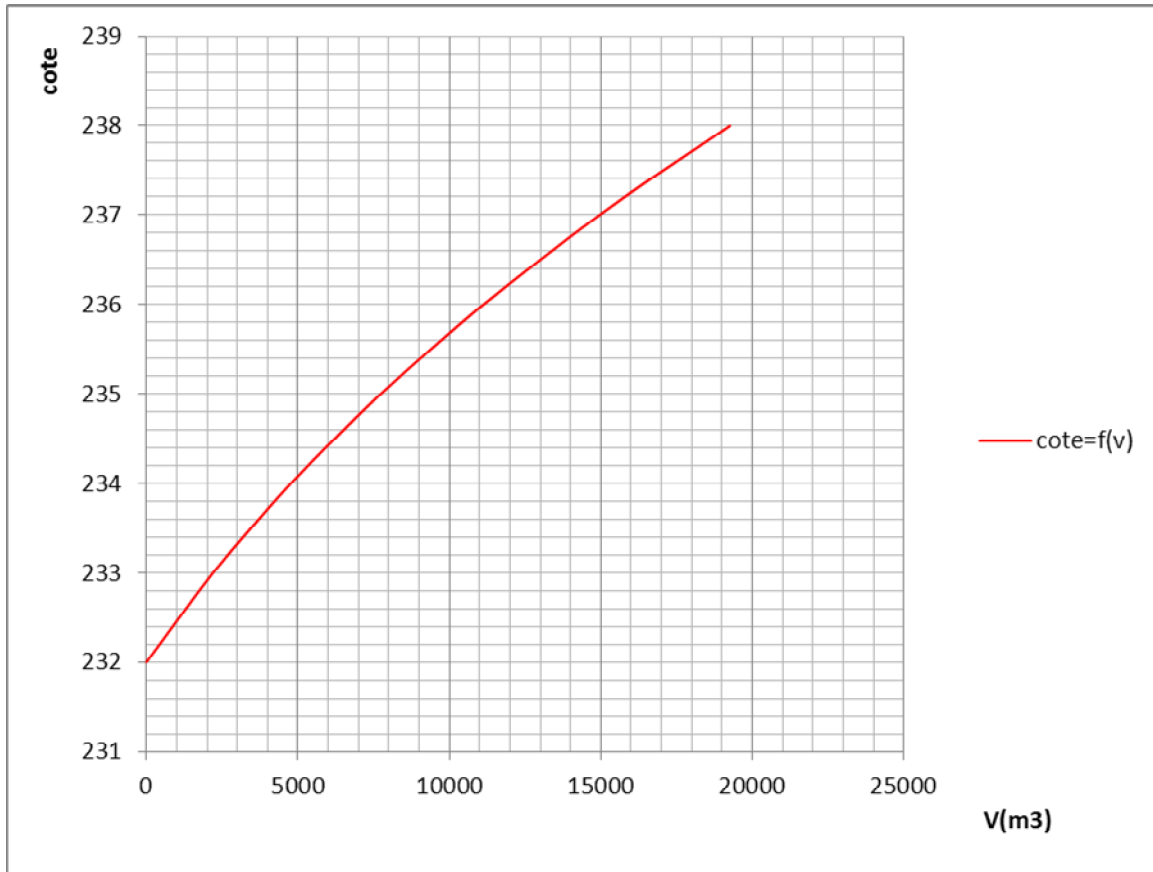
$S_{i+1}$ : surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau  $H_{i+1}$  en  $m^2$ .

$\Delta H$ : différence d'altitude entre les deux courbes de niveaux successives.

$\Delta V$ : volume élémentaire compris entre deux courbes de niveaux successives en  $Mm^3$ .

**Tableau III.22 :** Caractéristique topographique de la retenue.

| Côte(m) | $S_{part}(m^2)$ | $S(m^2)$ | $S(ha)$ | $H_i(m)$ | Hauteur(m) | $V(m^3)$ | $V_{cum}(m^3)$ | $Pfond_{moy}(m)$ |
|---------|-----------------|----------|---------|----------|------------|----------|----------------|------------------|
| 232     | 2024            | 0        | 0       | 0        | 0          | 0        | 0              | 0                |
| 233     | 2378            | 2201     | 2201    | 1        | 1          | 2201     | 2201           | 0.93             |
| 234     | 2759            | 2569     | 2569    | 1        | 2          | 2569     | 4770           | 1.73             |
| 235     | 3167            | 2963     | 2963    | 1        | 3          | 2963     | 7733           | 2.44             |
| 236     | 3602            | 3384     | 3384    | 1        | 4          | 3384     | 11118          | 3.09             |
| 237     | 4063            | 3832     | 3832    | 1        | 5          | 3832     | 14950          | 3.68             |
| 238     | 4550            | 4306     | 4306    | 1        | 6          | 4306     | 19256          | 4.74             |



**Figure III.13 :** Courbe capacités-hauteurs.

### III.6.6 Calcul du volume utile :

La régularisation peut être saisonnière ou interannuelle, suivant le bilan apport–demande de l'année, c'est-à-dire lorsque l'apport annuel est supérieur à la demande, on optera pour une régularisation saisonnière.

#### III.6.6. 1. Régularisation saisonnière sans tenir en compte les pertes:

D'après la régularisation nous avons :

$V_s$  : Volume excédentaire ( $V_s = 37800\text{m}^3$ ).

$V_d$  : Volume déficitaire ( $V_d = 10800\text{m}^3$ )  $\Rightarrow$  Fonctionnement à un temps.

$\Rightarrow$  Le volume utile :  $V_u = V_d = 10800\text{m}^3$

Le volume au niveau normal de la retenue :

$$V_{NNR} = V_{mort} + V_{utile} = 12073\text{m}^3.$$

Les résultats de calcul sont apportés dans les trois tableaux suivant (**Tableau III.23, Tableau III.24 et Tableau III.25**) qui sont présentés dans l'annexe II

**III.6.6. 2.Régularisation saisonnière avec pertes première approximation :**

Cette méthode tiens en compte les pertes par évaporation et par infiltration

A- Par évaporation : suivante la formule

$$V_{\text{evap}} = E_{\text{mens}} \cdot S_{\text{moy}} \dots \dots \dots (III.25)$$

B- Par infiltration : suivant la formule

$$V_{\text{inf}} = \frac{\delta \cdot V_{\text{moy}}}{100} \dots \dots \dots (III.26)$$

C- Avec  $E_{\text{mens}}$  : Evaporation mensuelle (m)

$V_{\text{moy}}$  : volume moyen qui correspond au surface moyenne

$$S_{\text{moy}} = (S_i + S_{i+1})/2 \dots \dots \dots (III.27)$$

$\delta$  : Coefficient qui dépend des conditions hydrologique de la cuvette(1,5).

D'après la régularisation nous avons:

$V_s$  : Volume excédentaire  $V_s = 33132 \text{m}^3$ .

$V_d$  : Volume déficitaire  $V_d = 14097 \text{m}^3 \Rightarrow$  Fonctionnement à un temps.

$\Rightarrow$  Le volume utile :  $V_u = V_d = 14097 \text{m}^3$

Le volume au niveau normal de la retenue :

$$V_{\text{NNR}} = V_{\text{mort}} + V_{\text{utile}} = 15370 \text{m}^3$$

**III.6.6. 3.Régularisation saisonnière avec pertes deuxième approximation :**

D'après la régularisation nous avons:

$V_s$  : Volume excédentaire  $V_s = 33038 \text{m}^3$ .

$V_d$  : Volume déficitaire  $V_d = 14250 \text{m}^3 \Rightarrow$  Fonctionnement à un temps.

$\Rightarrow$  Le volume utile :  $V_u = V_d = 14250 \text{m}^3$

Le volume au niveau normal de la retenue :

$$V_{\text{NNR}} = V_{\text{mort}} + V_{\text{utile}} = 15523 \text{m}^3$$

**III.6.6.4. Estimation de l'erreur :**

Les volumes des pertes sont considérer comme consommation pour ces calculs on doit vérifier la condition suivant :

$$\varepsilon = \frac{V'_u - V_u}{V_u} \cdot 100 \dots \dots \dots (III.28)$$

Avec :  $1\% < \varepsilon < 2\%$

$V_u$  : volume utile sans tenir compte des pertes.

$V'_u$  : volume utile en tenant compte des pertes.

Si cette condition ( $1\% < \varepsilon < 2\%$ ) n'est pas vérifiée on doit faire des itérations.

$$\varepsilon = \frac{14250 - 14097}{14097} \cdot 100, \quad \varepsilon = 1.08\% \text{ erreur admissible donc: } V_{NNR} = 15523 \text{ m}^3$$

### III.7. Laminage des crues : [11,5]

Le calcul du laminage de crues permet de réduire les dimensions et le coût de l'ouvrage d'évacuation sans affecter la sécurité globale de l'aménagement, Ce type de calcul optimise la capacité de stockage momentanée de la retenue et le débit progressif des déversements en fonction de l'apport entrant de la crue, Cette relation peut être formulée comme suit :

$$Q \cdot dt = q \cdot dt + S \cdot dh \dots\dots\dots (III.29)$$

Où :

$Q$  : le débit entrant de la crue.

$q$  : le débit déverse par l'évacuateur de crue (débit laminé)

$S$  : la surface du plan d'eau de la cuvette.

Le débit cumule à l' instant  $t$  est :  $Q - q = S \cdot \frac{dh}{dt}$

Où :  $\frac{dh}{dt}$  : La vitesse de remplissage ou de montée de la retenue,

#### III.7.1.Laminage des crues par la méthode de KOTCHERINE:

. *Méthode de KOTCHERINE :*

La méthode de KOTCHERINE est un procédé grapho-analytique qui se base sur les principes suivants :

1. l'hydrogramme de crue est considéré comme un triangle ou un trapèze,
2. les débits transitent par l'évacuateur de crue se déversent selon une fonction linéaire,
3. le laminage commence avec le remplissage de la cuvette au niveau normale de la retenue (NNR).
4. les pertes par infiltration et évaporation sont considérées comme nulles au moment de la crue.

**III.7.1.1. Estimation du débit de crue laminée : [5]**

Le volume stocké est exprimé selon la relation suivant :

$$V_F = V_C \cdot \left( 1 - \frac{q_{\text{lam}}}{Q_{\%}} \right) \dots\dots\dots (III.30)$$

Où :

$V_F$  : le volume d'eau en charge,

$V_C$  : le volume de la crue,

$Q_{\%}$  : le débit de la crue,

$q_{\text{lam}}$  : le débit laminé.

De cette relation se déduit le débit de crue laminée :  $q_{\text{lam}} = Q_{\%} \cdot \left( 1 - \frac{V_F}{V_C} \right)$

Cette relation montre une réduction du débit de pointe de la crue au fur et à mesure que le niveau d'eau augmente dans la cuvette,

**III.7.1. 2. Estimation de la charge au-dessus du déversoir :**

En faisant transiter ces volumes par un évacuateur de crues aux dimensions que l'ont défini, on analyse plusieurs variantes, Le débit de crue transitant par l'évacuateur de crue se calcule alors avec la relation :

$$q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \dots\dots\dots (III.31)$$

$m$  : coefficient de débit, dépendant notamment de l'épaisseur du déversoir par rapport à la charge  $H$ , et de la forme de la crête du déversoir, pour notre cas il est constant et égal à 0,49;

$g$  : l'accélération de pesanteur; [ $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$ ];

$L$  : la largeur de déversoir,

$H$  : la charge sur le déversoir (on fait varier de 0,3 à 1,3 m),

Connaissant ce débit et parce qu'aussi :

$$q = S \cdot V_{\text{moy}} \quad \text{Et} \quad S = L \cdot (H + P) \quad \text{on prend } P=0,5 \text{ m}$$

Il est possible d'extraire la vitesse moyenne ( $V_{\text{moy}}$ ) comme suit :

$$V_{\text{moy}} = \frac{q}{L \cdot (H + P)} \dots\dots\dots (III.32)$$

Enfin on calcule les débits en faisant varier cette fois la largeur déversant par la même formule qui a dessus et L compris entre 5 et 8 mètres.

$$q = m \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$$

$$H_0 = H + \frac{\alpha \cdot V_{\text{moy}}^2}{2g}$$

$H_0$  : est la charge globale;

$\frac{\alpha \cdot V_{\text{moy}}^2}{2g}$  : la charge dynamique liée a la vitesse d'écoulement;

P : la hauteur de pelle.

Cette itération donne des courbes qui peuvent s'entrecroiser avec la relation de  $q_{\text{lam}}$ , Ce sont des points de croisement qui permettent de définir le débit de crue laminée en correspondance à la largeur optimale.

Le débit laminée est calculé pour différentes charges "**H**" et différentes largeurs de l'évacuateur de crues "**b**",

Les graphiques de la figure sont accordés à la table de calculs, en faisant varier les variables **H** et **L**, Les relations s'ajustent automatiquement.

**Tableau III.26 :** Données de départ pour la méthode de KOTCHERINE.

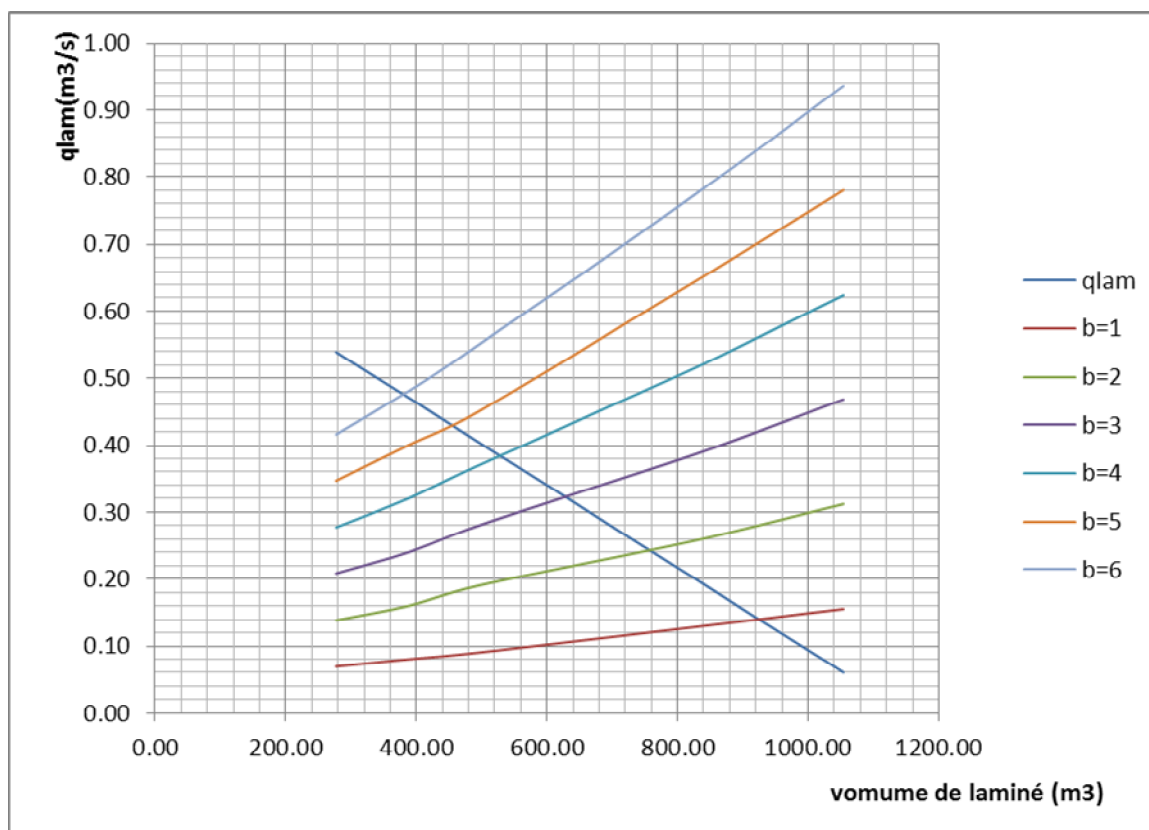
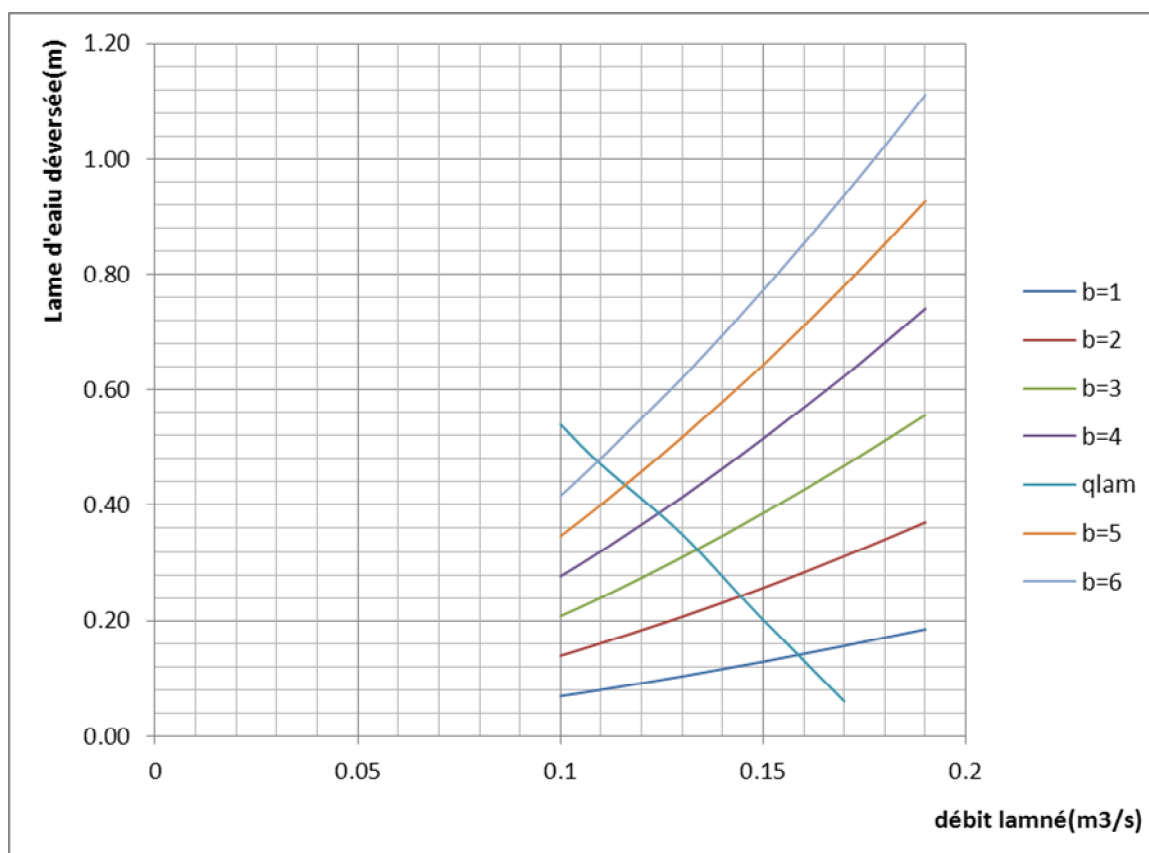
| Données             |         | L(m) | H(m) | Q (m <sup>3</sup> /s) | S (m2) | V <sub>moy</sub> (m/s) | V <sub>for</sub> (m3) |
|---------------------|---------|------|------|-----------------------|--------|------------------------|-----------------------|
| g                   | 9.81    | 1    | 0.1  | 0.07                  | 0.6    | 0.114                  | 277                   |
| a                   | 1.1     | 2    | 0.11 | 0.16                  | 1.22   | 0.130                  | 389                   |
| 2*g                 | 19.62   | 3    | 0.13 | 0.31                  | 1.89   | 0.161                  | 495                   |
| 2. g <sup>0.5</sup> | 4.429   | 4    | 0.15 | 0.50                  | 2.6    | 0.194                  | 825                   |
| Q1%(m3/s)           | 0.71    | 5    | 0.17 | 0.76                  | 3.35   | 0.227                  | 1054                  |
| W1%(m3)             | 1151.82 | 6    | 0.19 | 1.08                  | 4.14   | 0.260                  | 1276                  |
| m                   | 0.49    |      |      |                       |        |                        |                       |

**Tableau III.27:** 2<sup>°</sup> Etape de calcul.

| H(m)  | V <sub>moy</sub> (m/s) | Ho(m) | Q (m <sup>3</sup> /s) |      |      |      |      |      |
|-------|------------------------|-------|-----------------------|------|------|------|------|------|
|       |                        |       | b=1                   | b=2  | b=3  | b=4  | b=5  | b=6  |
| 0.1   | 0.11                   | 0.101 | 0.07                  | 0.14 | 0.21 | 0.28 | 0.35 | 0.42 |
| 0.110 | 0.13                   | 0.111 | 0.08                  | 0.16 | 0.24 | 0.32 | 0.40 | 0.48 |
| 0.13  | 0.16                   | 0.131 | 0.10                  | 0.21 | 0.31 | 0.41 | 0.52 | 0.62 |
| 0.15  | 0.19                   | 0.152 | 0.13                  | 0.26 | 0.39 | 0.51 | 0.64 | 0.77 |
| 0.17  | 0.23                   | 0.173 | 0.16                  | 0.31 | 0.47 | 0.62 | 0.78 | 0.94 |
| 0.19  | 0.26                   | 0.194 | 0.18                  | 0.37 | 0.56 | 0.74 | 0.93 | 1.11 |

**Tableau III.28:** 3<sup>°</sup> Etape de calcul.

| H(m) | V <sub>for</sub> (m3) | Q <sub>lam</sub> (m3/s) | Q(m3/s) |      |      |      |      |      |
|------|-----------------------|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|      |                       |                         | b=1     | b=2  | b=3  | b=4  | b=5  | b=6  |
| 0.10 | 277.00                | 0.54                    | 0.07    | 0.14 | 0.21 | 0.28 | 0.35 | 0.42 |
| 0.11 | 389.00                | 0.47                    | 0.08    | 0.16 | 0.24 | 0.32 | 0.40 | 0.48 |
| 0.13 | 495.00                | 0.40                    | 0.09    | 0.19 | 0.28 | 0.37 | 0.45 | 0.55 |
| 0.15 | 825.00                | 0.20                    | 0.13    | 0.26 | 0.39 | 0.51 | 0.64 | 0.77 |
| 0.17 | 1054.00               | 0.06                    | 0.16    | 0.31 | 0.47 | 0.62 | 0.78 | 0.94 |
| 0.19 | 1276.00               | -0.08                   | 0.18    | 0.37 | 0.56 | 0.74 | 0.93 | 1.11 |

Figure III.14 : Courbes de  $H = f(Q, q)$ Figure III.15 : Courbes  $V = f(Q, q)$

**III.8. Etude d'optimisation :**

Le but de l'étude d'optimisation est de déterminer la largeur optimale de l'évacuateur de crue correspondante à la hauteur optimale de la digue, afin d'obtenir le devis le plus économique de l'aménagement.

Le calcul consiste à évaluer le coût approximatif de l'ouvrage pour les différentes largeurs déversées correspondantes aux différentes hauteurs de la digue.

**III.8.1. La revanche : [12]**

C'est la tranche comprise entre la crête du barrage et la côte des plus hautes eaux, elle est en fonction de la hauteur des vagues  $H$ , de la vitesse du vent  $U$  (80 Km/h) et de la vitesse de propagation des vagues  $V$  dans la retenue et du fetch (0,031Km). La revanche minimale est donnée par la relation suivante :

$$R = 0.75 H + \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (III.33)$$

Avec  $V$  : vitesse de propagation des vagues (Gaillard)

$$V = 1,5 + 2.H \dots\dots\dots (III.34)$$

$H$  : hauteur des vagues (m).

Les calculs sont résumés par le tableau suivant :

**Tableau III.29:** Calcul de la revanche.

| Formule               | Hauteur du vague                          | Vitesse de propagation (m/s) | Revanche(m) |
|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-------------|
| Stevenson<br>GAILLARD | $H = 0.75 + 0.34 F^{0.5} - 0.26 F^{0.25}$ | 2,9                          | 0 ,91       |
| MALLET et<br>PAQUANT  | $R = 0.75 \cdot H + \frac{V^2}{2g}$       | 2,57                         | 0,75        |
| Simplifiée            | $R = 1 + 0,3 \cdot \sqrt{F}$              | /                            | 0,94        |

Les résultats sont convergent, on prend la valeur moyenne  $R=0,9$  m.

**III.8.2. La largeur en crête : [12]**

La largeur du barrage doit permettre la circulation des engins pour la finition du barrage et les éventuels pour les eaux ultérieurs.

Elle dépend de plusieurs facteurs :

- les risques de tremblement de terre
- la longueur minimum du chemin d'infiltration qui assure un gradient hydraulique suffisamment faible à travers le barrage lorsque le réservoir est plein.

- La hauteur de barrage.

La largeur en crête est donnée par différentes méthodes apportés dans le tableau suivant :

**Tableau III.30 : Détermination de la largeur en crête.**

| Formule            | $b_{cr}$ (m)                      | $b_{cr}$ (m) |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|
| Formule T.KNAPPEN  | FORMULE                           | 4,04         |
| Formule E.F.PREECE | $b=1,65.H_b^{0.5}$                | 3,69         |
| Formule simplifiée | $b=1,1.H_b^{0.5}+1$               | 3.54         |
| Formule Pratique   | $b_{cr} = \frac{5}{3} \sqrt{H_b}$ | 4,01         |

On opte une valeur médiane de  $b=4$  m.

### III.8.3. La longueur de la crête :[12]

Elle est mesuré directement sur la carte topographie de site de barrage, alors la longueur de la crête  $L_{cr}=88,81$ m.

### III.8.4.Coût de la digue:

**Tableau III.31: Coût et volume de la digue.**

| Charge d'eau(m) | Largeur déversant(m) | Volume de la digue (m <sup>3</sup> ) | Coût de la digue10 <sup>6</sup> DA |
|-----------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 0.1             | 1                    | 13240.2                              | 3.96                               |
| 0.11            | 2                    | 13381.4                              | 3.99                               |
| 0.13            | 3                    | 13412.7                              | 4.01                               |
| 0.15            | 4                    | 13501.7                              | 4.04                               |
| 0.17            | 5                    | 13423.5                              | 4.06                               |
| 0.19            | 6                    | 13334.1                              | 4.08                               |

Le prix du mètre cube du remblai est estimé à 300 DA

### III.8.4.Calcul du coût de l'évacuateur de crue :

#### -coût du déversoir :

Le déversoir sera construit en béton armé, de type Cgreger, celui-ci s'adapte mieux à l'écoulement puisque la lame déversant épouse toujours le profil, donc on aura une diminution des phénomènes hydrauliques (cavitation, déprissions...), qui peuvent être engendrent des dégâts confédérales et provoquant à la suite l'instabilité de l'ouvrage. On prend le coefficient de débit (0,49).

La section transversale du déversoir est obtenue en schématisant le profil du déversoir pour la charge déversée à l'aide de l'équation du profil donnée par

L'équation du profil Creager est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{Y}{H} = \frac{1}{K} \left( \frac{X}{H} \right)^n \dots\dots\dots (III.35)$$

Avec  $K=2,127$  et  $n=1,85$

$$Y = 0,47 \frac{X^{1,85}}{H^{0,85}}$$

Donc : avec :  $H$  : Charge sur le seuil (m).

$Y$  : Ordonnée du profil (m).

$X$  : Abscisse du profil (m). On trace cette courbe en donnant à chaque fois une valeur à «  $X$  » pour déterminer «  $Y$  » correspondant.

La charge «  $H$  » est définie pour chaque largeur du déversoir.

Le volume du déversoir sera donc:

$$V_{dev} = S.b \dots\dots\dots (III.36)$$

Avec :  $S$  : section transversale du profil ;  $b$  : largeur déversant.

En fixant le mètre cube du béton à vingt-deux mille dinars Algériens (22000 DA), le coût du déversoir pour les différentes largeurs déversant sera :

**Tableau III.32 : Cout du déversoir.**

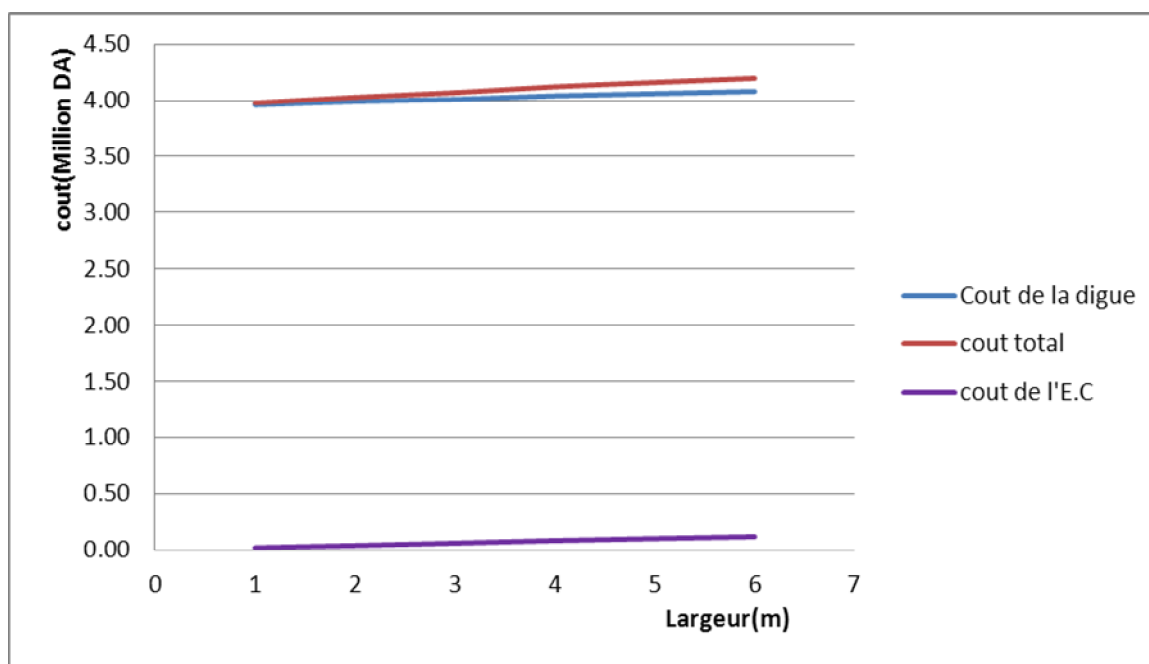
| Lar déver(m) | section (m <sup>2</sup> ) | Volume du béton (m3) | Coût déversoir 10 <sup>6</sup> (DA) |
|--------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1            | 0.45                      | 0.45                 | 0.010                               |
| 2            | 0.48                      | 0.96                 | 0.021                               |
| 3            | 0.51                      | 1.53                 | 0.034                               |
| 4            | 0.54                      | 2.16                 | 0.048                               |
| 5            | 0.510                     | 2.55                 | 0.056                               |
| 6            | 0.480                     | 2.88                 | 0.063                               |

**-Le coût total de la retenue :**

Le cout total (Digue+Evacuateur de crues) est donné ci-dessous :

**Tableau III.33:** Coût total de la retenue.

| Largeur déversé<br>(m) | Coût de la<br>digue<br>(millions DA) | Coût de l'évacuateur de<br>crue<br>(millions DA) | Coût total (millions<br>DA) |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1                      | 3.96                                 | 0.010                                            | 3.97                        |
| 2                      | 3.99                                 | 0.021                                            | 4.01                        |
| 3                      | 4.01                                 | 0.034                                            | 4.04                        |
| 4                      | 4.04                                 | 0.048                                            | 4.09                        |
| 5                      | 4.06                                 | 0.056                                            | 4.12                        |
| 6                      | 4.08                                 | 0.116                                            | 4.20                        |
| 1                      | 3.96                                 | 0.018                                            | 3.98                        |

**Figure.III.16:** La courbe d'optimisations des coûts en fonction de la largeur b du déversoir.

D'après cette étude d'optimisation, on a choisi la largeur optimale  $b=1\text{m}$  pour des raisons économiques et techniques.

Donc le laminage de notre retenue est fait pour un déversoir de largeur  $b=1\text{mètre}$ .

### III.8.2.2. Caractéristiques du barrage :

Les résultats trouvés pour les caractéristiques principaux de la retenue sont résumés dans le tableau suivant :

#### Conclusion :

Après de faire cette partie d'étude telle que l'ajustement, étude (des pluies de courtes durées, apports, de crues, régularisation, laminage et optimisation). On peut conclure que les caractéristiques principales de la retenue sont résumées dans le tableau ci-après.

**Tableau III.34:** Caractéristiques du barrage.

| Caractéristique              | Unité        | Valeurs |
|------------------------------|--------------|---------|
| <b>Volume mort</b>           | $\text{m}^3$ | 12073   |
| <b>Volume utile</b>          | $\text{m}^3$ | 14250   |
| <b>Volume NNR</b>            | $\text{m}^3$ | 15523   |
| <b>Cote du fond</b>          | m NGA        | 232     |
| <b>Cote NVM</b>              | m NGA        | 232.6   |
| <b>Cote NNR</b>              | m NGA        | 237.2   |
| <b>Cote NCR</b>              | m NGA        | 238     |
| <b>Hauteur de la retenue</b> | m            | 6       |
| <b>Longueur en crête</b>     | m            | 88,81   |
| <b>Largeur en crête</b>      | m            | 4       |

# CHAPITRE IV :

## ETUDE DES VARIANTES

**IV.1 Introduction :[6]**

Les barrages en remblai, utilisés comme ouvrages de protection, entre autres contre les crues le long des rivières, ou come ouvrages d'accumulation, comptent parmi les ouvrages de génie civil les plus anciens dans l'histoire de l'homme. En effet, on retrouve les traces de tels barrages vieux de plus de 2000 ans au Yémen, au Inde, au Sri -Lanka, et en Chine.

La singularité des barrages en remblai basé en passage de l'eau à travers leur corps et en formation d'un écoulement souterrain avec une surface libre, La ligne de la surface libre de l'eau est dite : ligne piézométrique ou ligne phréatique.

On classe en outre parmi les barrages les digues de garde (de protection) et les remblais de canaux.

On construit les barrages en pierres et mixtes (terre-enrochement) dans les régions où il y a beaucoup de pierres comme matériau de construction.

**IV.1.1 Avantages des barrages en terre :**

- Utilisation du sol, matériaux locaux pour la construction du barrage;
- Possibilité d'utiliser n'importe quel sol;
- Tous les procédés de construction sont mécanisées;
- Construction de ces barrages avec n'importe quelle hauteur.

**IV.1.2 Inconvénients des barrages en terre :**

- Impossibilité de conduire le débit de crue à travers l'ouvrage;
- Présence de l'écoulement souterrain dans le corps du barrage, qui crée les conditions de déformation du barrage;
- Grandes pertes d'eau en cas d'utilisation des sols perméables et utilisation des dispositifs contre la filtration.

**IV.1.3 Classification des barrages en terres :**

Tous les barrages en terre se subdivisent comme suit :

- Selon le mode de construction :
  - Barrages en remblai non compactés en cas de présence ou absence d'eau;
  - Barrages en terre compactée;
  - Barrages formés par la méthode d'exploitation d'explosion orientée;
  - Barrages de remblayage hydraulique.

- Selon la construction du corps du barrage :
  - Barrages en terre homogène;
  - Barrages en terre hétérogènes;
  - Barrages en terre avec masque formé par un sol imperméable;
  - Barrages en terre avec un masque par matériaux artificiels;
  - Barrages en terre à noyau;
  - Barrages en terre à diaphragme.
- Selon la construction des dispositifs contre la filtration sous l'ouvrage :
  - Barrages avec parafouille;
  - Barrages avec parafouille et rideau de palplanche;
  - Barrages avec coupure par injection;
  - Barrages avec tapis étanche.

## **IV.2 Types des barrages en remblai envisager :**

### **IV.2.1 Barrage homogène :**

Un barrage en terre homogène est un barrage en remblai principalement constitué de matériaux fins compactés, dont le profil est le plus simple des barrages en remblai. Une particularité de cet ouvrage est de ne comprendre qu'un seul matériau uniformément reparti à travers la section. Le matériau utilisé doit à lui seul assurer les fonctions d'étanchéité et de corps d'appuis. Les matériaux les plus perméables sont placés vers les parements.

✎ Il est constitué d'un seul matériau et comprend :

- Un talus amont protégé contre l'érosion des vagues par en enrochement ou un perré.
- Un talus aval empierré engazonné.
- Un tapis drainant protégé par un filtre est disposé, sous le talus aval, ce tapis à pour but de rabattre les courants, afin d'augmenter la stabilité du talus aval.

### **IV.2.2 Barrage en enrochements à noyau en argiles (Barrage zoné) :**

Si le volume de matériaux pour réaliser en terre homogène devait se révéler nettement insuffisant, il est alors possible de concevoir un ouvrage en utilisant au mieux les divers matériaux disponibles à proximité ou provenant éventuellement d'excavation d'ouvrages annexes (évacuateur de crue, galerie, tunnel). Ces matériaux sont répartis en fonction de leurs

caractéristiques de telle façon à assurer, d'une part, l'étanchéité et, d'autre part, la stabilité de l'ouvrage.

Ce type de barrage en remblai est une solution largement répandue. Le barrage consiste en deux corps d'appuis amont et aval qui garantissent la stabilité du noyau central situé entre les deux, lequel constitue l'élément étanche.

Ce noyau interne a l'avantage d'être peu sensible aux agressions extérieures, il présente l'inconvénient d'être difficilement réparable en cas de fuites.

#### **IV.2.3 Barrage en enrochement à masque en béton :**

Dans le cas d'une quantité insuffisante de matériaux pour la réalisation d'un noyau argileux, la solution d'un élément étanche sous forme de masque amont plaqué sur le parement peut être envisagée. Par ailleurs, le remblai se trouve en totalité en dehors de l'influence de l'eau de la retenue.

La signification des principaux termes utilisée dans la conception et dans la construction de ces structures hydrauliques est comme suit :

- ☞ Crête: Facilite la circulation sur le barrage une fois terminée, elle est nécessaire dans la finition de l'ouvrage avec des équipements de compactage. Le niveau de la crête définit la hauteur maximale qu'atteint le barrage.
- ☞ Clé d'ancrage: Elle permet de couper ou de diminuer le flux d'eau à travers la fondation et d'allonger le chemin de filtration.
- ☞ Bermes: Elles permettent la réalisation et la réparation des revêtements de talus. En outre, elles donnent la stabilité aux digues et réduisent la vitesse des eaux qui glissent sur les surfaces du talus aval, en contribuant à éviter l'érosion. Ils servent aussi d'appui aux revêtements des talus en amont.
- ☞ Revêtements: Ils protègent les talus contre l'action des vagues (en amont) et de la pluie (en aval).
- ☞ Filtres et drainages: Il s'agit de dispositifs qui contrôlent et évacuent les eaux infiltrées à l'intérieur des barrages.
- ☞ Recharge: Le massif en amont ou en aval qui donne, en général, la stabilité au barrage.

**IV.3 Le choix du site du barrage :**

Un barrage réservoir, doit être projeté sur un site remplissant les conditions suivantes :

- Une cuvette de grande capacité par rapport au volume de la digue, pour cela on introduit la notion d'efficacité de la cuvette à l'aide du rapport définie comme suit :

$$R=C/V$$

C :capacité du réservoir.

V :volume de la digue(barrage)

Pour les retenue collinaires on accorde un coefficient R compris entre 3à10 et pour les barrage ce rapport barrages être supérieur à12.

- La convenance technico-économique de sa situation et ses alentours, les secteurs d'irrigation ou d'approvisionnement à la population et les possibles difficultés du transfert de l'eau depuis l'emplacement choisi jusqu'au point de distribution d'eau.
- Aspects économiques tels que : affectations de terrains, d'habitations et d'infrastructures par les inondations.
- Possibilité de voies d'accès au lieu, fourniture d'énergie électrique, approvisionnement d'eau potable, entre autres aspects d'intérêt.

**IV.4 Le choix du type de barrage :**

Les principaux paramètres à prendre en considération dans le choix du type de barrage sont :

- La topographie du site:

La topographie consiste en premier lieu à vérifier si l'axe choisi autorise le remplissage de la retenue en fonction des apports du bassin versant .En second lieu vérifier la possibilité d'implantation du barrage et de ces ouvrages annexes.

- La morphologie de la vallée :

La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site et de type de barrage à implanter .Bien entendu, l'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit précédé à l'amont par un élargissement de la vallée .Les vallées larges conviennent mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai, un site étroit conviendra mieux à un barrage poids et un autre plus étroit conviendra à une voûte lorsque les fondations permettent.

➤ Les conditions géologiques et géotechniques :

La nature, la résistance, le pendage, la fracturation et la perméabilité des formations rencontrées dans le bassin versant, constituent un ensemble de facteurs permettant la détermination du site et du type de barrage à implanter.

↳ Les fondations rocheuses se prêtent à l'édification de tous les types des barrages.

↳ Les fondations graveleuses conviennent en général pour les barrages en terre ou en enrochement, mais il faut toujours attribuer des dispositifs d'étanchéité et de drainage afin de contrôler les fuites et les percolations (Risque de Renard), et les tassements différentiels.

↳ Les fondations argileuses impliquent directement le choix des barrages en terre avec des pentes de talus compatibles avec les caractéristiques mécaniques des formations en place.

➤ Les matériaux de construction :

La disponibilité des matériaux de construction sur le site ou à proximité joue un rôle important (souvent économique) dans le choix du site et du type de barrage. Le site doit être choisi dans la mesure des autres exigences citées, le plus proche possible des zones d'emprunt.

En se basant sur ces exigences on peut déterminer la variante qui convient au site et le type de barrage à implanter.

### **IV.5 Fixation du choix définitif du type de barrage :**

L'assiette destinée à recevoir la retenue collinaire est caractérisée par des formations géologiques qui sont des marnes et argiles marneuses avec passage de grès et calcaire; cette formation présente une bonne assise pour la réalisation d'une digue en terre homogène.

La variante d'une digue homogène s'impose pour les raisons de simplicité et de disponibilités de matériaux imperméables en quantité suffisante à proximité du site.

**CHAPITRE V :**  
**ETUDE DETAILLE DE LA**  
**VARIANTE RETENUE**  
**DE LA DIGUE**

**V.1 Introduction: [6]**

Les barrages en terre peuvent être constitués par des matériaux de caractéristiques très différentes, à la différence des barrages en béton ou même en enrochement dont les matériaux constitutifs restent contenus dans des fourchettes beaucoup plus étroites.

Le terme "terre" couvre donc toute une composition de matériaux allant de l'argile pure très fine à des éléments très grossiers, dans certains cas même, on utilise des roches altérées facilement compactables, tel que des schistes, des latérites et grès tendres.

Le choix du type de barrage se fait en fonction des paramètres locaux, en particulier, de la nature du sol de fondation et de la forme de vallée, des problèmes de transport et d'approvisionnement, des possibilités en matériel et en main-d'œuvre, de l'extraction des matériaux de construction de leurs zones d'emprunts ainsi que des conditions économiques.

**V.2 Classification de l'ouvrage :**

La classification est consistée sur la composition de l'ouvrage et sa fondation et en particulier sur les risques attendus à l'aval en cas de rupture de l'ouvrage. Et pour savoir la classe de notre barrage nous avons le *tableau V.01*.

**- Tableau V.01:** Classe de barrage en terre en fonction du type de la fondation

| Type de sols de fondation                                 | Classes de barrages     |        |       |     |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|--------|-------|-----|
|                                                           | I                       | II     | III   | IV  |
|                                                           | Hauteurs de barrage (m) |        |       |     |
| Sols rocheux                                              | >100                    | 70-100 | 25-70 | <25 |
| Sols sablonneux, pierreux, terrain argileux non plastique | 75                      | 35-75  | 15-35 | <15 |
| Terrain argileux plastique                                | >50                     | 25-50  | 15-25 | <15 |

D'après le tableau (V.volkov, 1986) notre ouvrage appartient à la classe III.

**V.3 Définition du profil générale de la retenue :****V.3.1 Hauteur de barrage :****1. Calcul de la revanche :**

Plusieurs formules sont utilisées pour le calcul de la revanche :

☞ Formule de STEVENSON GAILLARD :

$$R = 0.75 \cdot H + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Et :} \quad H = 0.75 + 0.34 \cdot \sqrt{F} - 0.26 \cdot \sqrt[4]{F} \quad \dots\dots\dots (V.01)$$

Avec  $V$  : Vitesse de propagation des vagues (m/s).

$F$  : largeur du plan d'eau suivant laquelle le vent souffle fréquemment et direction du barrage appelée Fetch et doit inférieure à 18 kilomètre ( $F = 0,03km$ ).

$$\underline{\text{A.N :}} \quad H = 0,75 + 0,34 \cdot \sqrt{0,03} - 0,26 \cdot \sqrt[4]{0,03}$$

$$H = 0,701 \text{ m}$$

$$\text{D'où :} \quad V = 1,5 + 2 \cdot H = 1,5 + 2 \cdot 0,701$$

$$V = 2,902 \text{ m/s}$$

$$\text{Donc :} \quad R = 0,75 \cdot 0,701 + \frac{2,902^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$R = 0,950 \text{ m}$$

☞ Formule de MALLET et PAQUANT :

$$R = 0.75 \cdot H + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Et :} \quad H = 0.5 + 0.33 \cdot \sqrt{F} \quad \dots\dots\dots (V.02)$$

$$\underline{\text{A.N :}} \quad H = 0.5 + 0.33 \cdot \sqrt{0,03}$$

$$H = 0,557 \text{ m}$$

$$\text{D'où :} \quad V = 1,5 + 2 \cdot H = 1,5 + 2 \cdot 0,557$$

$$V = 2,614 \text{ m/s}$$

$$\text{Donc :} \quad R = 0,75 \cdot 0,557 + \frac{2,614^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$R = 0,766 \text{ m}$$

☞ Formule Simplifiée :

$$R = 1 + 0,3 \cdot \sqrt{F} \quad \dots\dots\dots (V.03)$$

$$R = 1 + 0,3 \cdot \sqrt{0,03} = 1,05 \text{ m}$$

**Conclusion :**

On prend une valeur la plus proche au à la moyenne donc :  $R = 0,910m$

**2. Calcul le tassement du barrage :**

Pour les barrages dont la hauteur ne dépasse pas  $20 m$  on peut préalablement prendre le tassement égale à  $(0,50 \div 1,50) \%$  de la hauteur du barrage.

Pour les petits barrages on calcule le tassement d'après la formule:

$$T = 0,015 H_b \dots\dots\dots (V.04)$$

Avec  $T$  : Tassement de la crête du barrage;

$H_b$  : Hauteur du barrage.

$$H_b = NNR - C_f + h_{\text{dév}} + R + t$$

$$\text{D'où : } H_b = 237 - 232 + 0,13 + 0,910 + 0,065$$

$$H_b = 6,26m, \text{ Donc } H_b = 6m$$

**V.3.2 La largeur en crête :**

Pour les digues dont les hauteurs sont inférieures à  $10 m$ , la largeur de la crête ne doit pas être inférieure à  $3 m$ . Pour les digues de hauteur supérieure à  $10 m$ , la largeur de la crête sera égale à  $1/3$  de la hauteur de la digue, mais en général il est recommandable que la largeur soit de  $(4 \text{ à } 6 m)$ .

↳ Formule de KNAPPEN :

$$b_{\text{cr}} = 1,65 \cdot \sqrt{H_b} \dots\dots\dots (V.05)$$

↳ Formule de E- F-PREECE :

$$b_{\text{cr}} = (1,1 \cdot \sqrt{H_b}) + 1 \dots\dots\dots (V.06)$$

↳ Formule Anonyme (simplifiée) :

$$b_{\text{cr}} = 3,60 \cdot \sqrt[3]{H_b} - 3 \dots\dots\dots (V.07)$$

↳ Formule pratique :

$$b_{\text{cr}} = \frac{5}{3} \sqrt{H_b} \dots\dots\dots (V.08)$$

Avec  $H_b$  : Hauteur du barrage (m).

- **Tableau V.02:** Récapitulatif des résultats de calcul de largeur en crête

| Formule    | $b_{\text{cr}}$ (m) |
|------------|---------------------|
| KNAPPEN    | 4,04                |
| E-F PREECE | 3,69                |
| SIMPLIFIEE | 3.54                |
| PRATIQUE   | 4,01                |

On opte pour une largeur de crête égale à:

$$b_{cr} = 4m.$$

### V.3.3 La longueur en crête:

La longueur de la crête est tirée à partir du plan de l'aménagement qui égale à:

$$L_{crête} = 88,81m.$$

### V.3.4 Pentes des talus : [12]

Les pentes des talus sont fixées par les conditions de stabilité mécanique du massif et de ses fondations.

Pour les massifs, on donne des pentes qui paraissent optimales.

- **Tableau V.03:** Valeurs indicatives des pentes des talus

| Hauteur du barrage<br>(m) | Type du barrage                  | Fruit des talus |      |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------|------|
|                           |                                  | Amont           | Aval |
| H < 05                    | - Homogène                       | 2,5             | 2,0  |
|                           | - A zones                        | 2,0             | 2,0  |
| 05 < H < 10               | - Homogène granulométrie étendue | 2,0             | 2,0  |
|                           | - Homogène à fort % d'argile     | 2,5             | 2,5  |
|                           | - A zones                        | 2,0             | 2,5  |
| 10 < H < 20               | - Homogène granulométrie étendue | 2,5             | 2,5  |
|                           | - Homogène à fort % d'argile     | 3,0             | 2,5  |
|                           | - A zones                        | 3,0             | 3,0  |
| H ≥ 20                    | - Homogène granulométrie étendue | 3,0             | 2,5  |
|                           | - A zones                        | 3,0             | 3,0  |

Pour faire les calculs préliminaires, nous adoptant les valeurs suivantes; valeurs que nous retiendrons si toutefois la stabilité est assurée.

❖ talus amont 1: 2,50

❖ talus aval 1: 2,50

### V.3.5 Protection de la Crête :

La crête du barrage en tant qu'élément de la digue est nécessaire pour donner au profil en travers une forme trapézoïdale stable elle est réalisée avec pente de 02 pour mille dans les deux cotés. Elle peut servir pour les passages de service.

La crête est revêtue de par un mélange constitué de gros graviers bitumés de  $20\text{cm}$ , et elle doit être constituée de matériaux insensibles à l'eau, et à la circulation des véhicules, et la couche de protection doit être bien compactée.

La crête est profilée soigneusement, afin d'empêcher toute stagnation des eaux (pour éviter les infiltrations dans le corps du barrage).

### V.3.6 Le volume du corps du barrage:

Le volume du corps du barrage est donné par la formule suivante:

$$V_b = \sum V_i$$

$$\text{Tel que : } V_i = \frac{[w_i - w_{i+1}]}{2} L_i \dots\dots\dots (V.09)$$

Avec  $V_i$  : volume du barrage dans la coupe  $i$ ;

$W_i$  : section transversale du barrage dans la coupe  $i$ ;

$L_i$  : distance entre deux coupes voisines;

$$w_i = \frac{[b + B_{pi}]}{2} H_{bi} \dots\dots\dots (V.10)$$

$b$  : largeur d'exécution ;

$$B_{pi} = b + (m_1 + m_2) H_{bi} \dots\dots\dots (V.11)$$

$m_1$  : pente du talus amont;

$m_2$  : pente du talus aval.

### V.3.7 Variantes de la digue:

- 1<sup>ère</sup> variante: barrage en terre homogène avec un drain vertical.
- 2<sup>ème</sup> variante: barrage à zones.
- 3<sup>ème</sup> variante: barrage en enrochement avec un masque amont en géo-membrane.

#### ❖ Evaluation du prix total des différents matériaux:

↳ 1<sup>ère</sup> variante:

Pour un barrage homogène en d'une hauteur de  $6\text{ m}$  on prend les pentes des talus:

$m_1=2,5$  et  $m_2=2,5$ , le volume du corps de la digue est calculé avec :

$$V_b = 13240,24 \text{ m}^3$$

↳ 2<sup>ème</sup> variante:

Pour un barrage à zones d'une hauteur de  $6\text{m}$  on prend les pentes des talus amont et aval:  $m_1=2$ ,  $m_2 = 2,5$ , le volume du noyau et des recharges sont respectivement :

$$V_n = 5991,13 \text{ m}^3 \text{ et } V_r = 6331,60 \text{ m}^3$$

↳ 3<sup>ème</sup> variante:

Pour un barrage en enrochements d'une hauteur de 5 m on prend les pentes des talus amont et aval:  $m_1=m_2=2,5$ . Ainsi que l'épaisseur du masque est prise égale à 0,5m, le volume du remblai et du masque en béton sont respectivement :

$$V_{m,b}=185,26m^3 \quad \text{et} \quad V_r=10408,08m^3.$$

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

- **Tableau V.04:** Etude comparative de différentes variantes

| Type de barrage                              | Destination     | Volume         | Le coût              | Le coût total        |
|----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------------|----------------------|
|                                              |                 | m <sup>3</sup> | (10 <sup>6</sup> DA) | (10 <sup>6</sup> DA) |
| Barrage homogène                             | Recharges       | 13020,34       | 4,13                 | 4,13                 |
| Barrage zoné                                 | Recharges       | 5991,13        | 1,85                 | 4,89                 |
|                                              | Noyau           | 6331,60        | 3,04                 |                      |
| Barrage en enrochements avec masque en béton | Recharges       | 10188,18       | 3,23                 | 5,34                 |
|                                              | Masque en béton | 0185.26        | 2,11                 |                      |

#### ❖ Conclusion:

L'estimation des volumes des travaux a révélé que la variante de la digue homogène est plus adéquate que les deux autres variantes. Du point de vue technique, les deux variantes sont faisables, du point de vue économique les deux variantes sont également faisables. Toutefois si on doit choisir entre les deux variantes étudiées la première s'impose pour la raison de facilité de construction et disponibilité des matériaux de construction (principalement l'argile) de quantité et de qualité, sur le gîte d'empreinte qui est situé a la cuvette.

#### V.3.8 Protection des talus :[6]

Selon la nature des matériaux des corps d'appui, la face du parement amont doit Selon la nature des matériaux des corps d'appui, la face du parement amont doit être préservée de l'érosion que de fortes vagues peuvent occasionner .Le type de protection du régime d'exploitation, de la dimension et de la forme du réservoir ; du climat et des vents. La zone de protection doit couvrir au moins la zone de marnage. Quant à la face du parement aval, elle doit la face du parement aval, elle doit être protégée contre les dommages qui peuvent entre autre être provoqués par l'effet du vent et le ruissellement des eaux de pluie.

#### ✓ Le talus aval :

Il est important d'éviter que le talus aval soit recouvert d'une végétation abondante (arbres, arbustes et buissons denses) qui compromette l'observation visuelle de cette partie

Il est nécessaire de pouvoir identifier les déformations du corps de la digue, et particulièrement les zones humides et venues d'eau.

Pour sa protection, l'utilisation d'une (pierre) avec des épaisseurs entre 0,20 et 0,30 m est très commune.

La projection d'une rigole après le dispositif de drainage a pour fonction de véhiculer les eaux d'infiltrations et les eaux superficielles vers le lit de l'oued.

✓ **Le talus amont:**

En ce qui concerne le talus amont, il peut être recouvert par une couche d'enrochements ou de riprap. Le riprap est souvent préféré en raison de son coût et de sa durabilité. La porosité des roches placés par déversement sont très efficaces pour dissiper l'énergie des vagues et atténuer leur déferlement. En ce qui concerne la stabilité du riprap, il faut garantir sa résistance au glissement sur son support et la résistance aux forces d'arrachement de blocs. L'efficacité du riprap dépend de la qualité de la roche.

L'emplacement du revêtement s'étend depuis la crête de la digue jusqu'à une profondeur minimale. Pour cela, on utilise communément un enrochement sur la couche de filtre dont l'épaisseur peut être calculée par les méthodes suivantes:

↳ première méthode:

$$e = C \cdot V^2 \dots\dots\dots (V.12)$$

Avec  $e$  : Epaisseur de l'enrochement en (m);

$V$  : Vitesse de propagation des vagues (2,902m/s);

$C$  : Coefficient dont la valeur est en fonction de la pente du talus et du poids spécifique  $\theta$  du matériau d'enrochement ( $\gamma_p = 2,50 \text{ g/cm}^3$ ).

La valeur de  $C$  est donnée par le tableau V.05.

- **Tableau V.05:** Les valeurs de  $C$  en fonction de la pente du talus et du poids

| PENTE DU TALUS | VALEUR DE C POUR DIFFERENTS |                 |                 |
|----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
|                | $\theta = 2,50$             | $\theta = 2,65$ | $\theta = 2,80$ |
| 1/ 4,0         | 0,027                       | 0,024           | 0,022           |
| 1/ 3,0         | 0,028                       | 0,025           | 0,023           |
| 1/ 2,0         | 0,031                       | 0,028           | 0,026           |
| 1/ 1,5         | 0,036                       | 0,032           | 0,03            |
| 1/ 1,0         | 0,047                       | 0,041           | 0,038           |

D'où :  $C = 0.024$   $e = 0,20\text{m.}$

En analysant les résultats obtenus, on peut conclure que l'épaisseur à retenir pour la suite du dimensionnement de la digue est  $e=50$  cm.

Donc on retient une protection d'une épaisseur de 50 cm d'enrochements, 50% de l'enrochement doit avoir un poids unitaire "P" tel que:

$$P \geq 0,52 * e^2 * G_s \quad \dots\dots\dots (V.13)$$

Le diamètre moyen d'un bloc réduit à la sphère équivalente sera:

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{Q_p}{0,524 \cdot \gamma_p}} \quad \dots\dots\dots (V.14)$$

Avec  $D_p$  : Diamètre moyen de la pierre en (m);

$\gamma_p$  : Poids volumique de la pierre ( $\gamma_p=24 \text{ KN/m}^3$ );

$Q_p$  : Poids d'une pierre, calculé par la formule suivante :

$$Q_p = \frac{0,025 \cdot \gamma_p \cdot h^2 \cdot \lambda}{\left(\frac{\gamma_p}{\gamma_w} - 1\right)^3 \sqrt{1 + (m_1)^3}} \quad \text{[tonne]} \quad \dots\dots\dots (V.15)$$

Où  $m_1$ : Pente du talus amont;

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau en ( $\text{KN/m}^3$ );

$h$  : Hauteur des vagues ( $h = \beta \cdot h_0$ );

$\lambda$  : Longueur d'onde de la vague en (m).

Selon LABOZOVSKY :

$$\lambda = \alpha \cdot \lambda_0 \quad \dots\dots\dots (V.16)$$

Avec  $\lambda_0$  et  $h_0$  : Valeurs calculées en eau profonde ;

$\alpha$  et  $\beta$  : Coefficients en fonction de la hauteur maximale d'eau dans la retenue, tel que

$\alpha=f(h_0/\lambda_0)$  ;  $\beta=f(h_0/\lambda_0)$ .Abaque de calcul des valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction du rapport  $h_0/\lambda_0$ .

$$h_0 = 0,073 \cdot K \cdot V \cdot \sqrt{F \cdot \varepsilon} \quad \text{Et} \quad \lambda_0 = 0,073 \cdot K \cdot V \cdot \sqrt{\frac{F}{\varepsilon}} \quad \dots\dots\dots (V.17)$$

Ou  $K$  : Coefficient caractérisant l'intensité et l'accroissement de la vague :

$$K = 1 + e^{0,40 \cdot \frac{F}{V}} \quad \dots\dots\dots (V.18)$$

$\varepsilon$  : Cambrure de la vague donnée par :

$$\varepsilon = \frac{1}{9 + 19e^{\frac{-14}{V}}} \dots\dots\dots (V.19)$$

F : Longueur de l'élan ou longueur du fetch qui devra vérifier la condition suivante :

$$(F < F_{cr} = 30 V^2 \varepsilon).$$

V : Vitesse des vagues en m/s.

**- Tableau V.06:** Résultats de calcul

| Indices | $\varepsilon$ | K    | $\lambda_0$ | $h_0$ | $h_0/\lambda_0$ | $\alpha$ | $\beta$ | h    | $\lambda$ |
|---------|---------------|------|-------------|-------|-----------------|----------|---------|------|-----------|
| Valeurs | 0,05          | 2,01 | 0,33        | 0,02  | 0,06            | 0,31     | 0,47    | 0,01 | 0,10      |

$$\text{Ainsi : } Q_p = \frac{0,025 \cdot 24 \cdot 0,01^2 \cdot 0,10}{\left(\frac{24}{10} - 1\right)^3 \sqrt{1 + 2 \cdot 5^3}}$$

$$Q_p = 0,022 \text{ KN}$$

Le diamètre moyen résulte :

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{0,022}{0,524 \cdot 2,4}}$$

$$D_p = 0,26 \text{ m}$$

↪ Deuxième méthode :

On peut établir la procédure suivante, en considérant dans le calcul le poids du bloc de la roche nécessaire pour supporter les forces appliquées produites par la pression statique et dynamique de la vague, ainsi que l'action érosive des vagues dans le calcul de la stabilité dont les facteurs sont le poids spécifique de la roche, la hauteur de la vague et le talus à protéger.

La formule recommandée pour le calcul du poids maximal des roches isolées est :

$$Q = \frac{0,35 \gamma_m h^3}{\left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1\right)^3 \sqrt{1 + m^3}} \dots\dots\dots (V.20)$$

Où  $\gamma_m$  : poids volumique de la pierre varie entre (2,2 et 2,6 t/m<sup>3</sup>);

h : hauteur de la vague pour une probabilité déjà constatée;

$\gamma$  : Poids volumique de l'eau (1,0 t/m<sup>3</sup>);

m : talus à protéger.

**AN :** **Q=0,027t.**

Le diamètre maximal exprimé en mètre du bloc à placer dans le talus porté à une sphère de diamètre équivalent «  $D_{sph}$  » est calculé par la formule suivante:

$$D_{sph} = \sqrt[3]{\frac{Q}{0,524 \gamma_m}} \dots\dots\dots (V.21)$$

Où  $Q$  : poids maximal de calcul du bloc.

**AN :**  $D_{sph}=0,28 \text{ m.}$

Le 50 % des blocs doit avoir une taille égale ou supérieure à  $D_{50\%} = K * D_{sph}$ , ou K est un Coefficient qui dépend de la catégorie de l'ouvrage à partir du tableau V.07.

- **Tableau VI.07:** Le coefficient K en fonction de la catégorie de l'ouvrage

| Coefficient | IV   | III  | II   | I    |
|-------------|------|------|------|------|
| K           | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |

Note : En obtenant une valeur  $D_{50\%}$  inférieure à 0,25 m, on prendra  $D_{50\%}$  égal à 0,25m.

**AN :**  $D_{50\%} = 0,154 \text{ m}$

Donc L'épaisseur du revêtement est déterminée selon la formule suivante:

$$e = D_{50\%} (2 - 2,5) \dots\dots\dots (V.22)$$

Avec 2,0 est employé en présence d'un bloc classé;

2,5 est employé en présence d'un bloc non classé.

**AN :**  $e= 39 \text{ cm.}$

#### V.4 Drainage :

Le but principal de ces constructions est de contrôler l'évacuation du flux de filtration et réduire le volume des matériaux saturés du barrage, en augmentant ainsi la stabilité de l'ouvrage.

Les conditions des drainages:

- Avoir une capacité suffisante pour évacuer l'eau de sorte qu'il ne soit pas colmaté.
- Ne pas permettre l'effet de renard; c'est pourquoi, on doit avoir une ou plusieurs couches filtrantes.
- On doit contrôler son fonctionnement.

**V.4.1 Prisme de drainage :**

Les prismes sont les éléments les plus utilisés pour le drainage. Dans sa partie centrale, ils sont construits en pierres et on place un filtre à l'envers au niveau de la zone de contact du remblai et sa fondation. Sa situation est particulière dans la partie du remblai qui passe par la voie de l'oued. Sa hauteur minimale est fonction du niveau d'eau dans le talus en aval et sa stabilité dépend des critères du concepteur. On peut calculer sa hauteur selon  $0.2 H$  où  $H$  est l'hauteur du barrage.

**❖ Dimensionnement du prisme aval :**

↳ fruits des talus :

$$m_1 = (1,00 \div 1,75) \text{ on prend } m_1 = 1,5;$$

$$m_2 = (1,50 \div 2,50) \text{ on prend } m_2 = 2,5.$$

↳ la hauteur du drain :

$$h_{dr} = (0,15 \div 0,20) * H_{bcr} \dots\dots\dots (V.23)$$

Avec  $H_{bcr}$  : Hauteur du barrage ;

**AN:**  $h_{dr} = 0,20 * 6$

$$h_{dr} = 1,2 \text{ m.}$$

Le drain est calée avec une crête callée à la côte 231 m.NGA.

↳ la largeur en sommet :

Elle est donnée par :

$$b_{dr} = \left( \frac{1}{3} \div \frac{1}{4} \right) h_{dr} \dots\dots\dots (V.24)$$

**AN :**  $b_{dr} = \frac{1}{3} * 2$

$$b_{dr} = 0,70 \text{ m.}$$

↳ largeur en base du drain :

Elle est exprimée par :

$$B = b_{dr} + (m_1 + m_2) * h_{dr} \dots\dots\dots (V.25)$$

**AN :**  $B = 0,7 + (1,5 + 2,5) * 1$

$$B = 4.7 \text{ m.}$$

**V.4.2 Tapis de drainage :**

C'est le type de drainage le plus efficace pour la digue, car d'une part, on utilise moins de matériaux saturés, et d'autre part, il contrôle les filtrations de la retenue, la sécurité et le

contrôle dans sa construction reste de rigueur, pour son dimensionnement il est recommandé d'utiliser des épaisseurs minimales de  $e = 0,80$  m; par rapport aux matériaux à employer et du remblai on peut le construire avec une ou plusieurs couches de filtre.

Un tapis filtrant horizontal est proposé, il sera disposé sur le tiers aval du sol de fondation, les éléments les plus fins constituant la première couche horizontale de ce filtre, cependant la granulométrie des couches disposées augmente progressivement.

#### ❖ Dimensionnement du drain tapis :

Il s'agit de déterminer la longueur du drain tapis suivant la relation :

$$L_d = L_{br} / (3;4) \dots\dots\dots (V.26)$$

Avec  $L_d$  : Longueur du drain tapis (m);

$L_b$  : Longueur transversale du barrage (m).

**AN :**  $L_d = 88,81/4$

$L_d = 20,22 \text{ m.}$

#### V.5 La clé d'étanchéité:

D'après les résultats obtenus au laboratoire, on peut dire que le fond de la vallée d'Oued **OUDJANA** est constitué généralement d'une couche alluvionnaire, où la présence d'un grand risque de pertes d'eau par infiltrations au dessous du corps de la digue.

Une clé d'étanchéité est prévue dans la continuité de la digue en argile afin d'assurer l'étanchéité de la fondation au niveau des alluvions perméables.

La clé d'étanchéité est constituée du matériau identique à celui de la digue. La hauteur de la clé d'étanchéité à partir du terrain naturel est de 4m. Cette hauteur va en diminuant en direction des rives jusqu'à atteindre une hauteur égale à la hauteur de décapage (découvert de l'assiette) soit 0,30 m. La largeur en base est de 04 m, indispensable pour la circulation des engins. La pente des talus de la clé d'étanchéité est :  $m=1$ .

#### V.6 Calcul des infiltrations à travers le corps de la digue :

##### V.6.1 Définition :

On appelle ligne phréatique à travers le corps de la digue, la ligne correspondante à la pression hydrostatique nulle. Cette ligne est appelée parfois improprement ligne de saturation située au-dessus de la ligne phréatique à une distance correspondante à l'élévation capillaire de l'eau de saturation.

Kozneny a montré que la ligne de saturation est de forme parabolique, de foyer A et d'axe Ax, d'équation :

$$\left\{ \begin{array}{l} (X+Y_0)^2 = X^2 + Y^2 \\ \text{En point B : } x=d \text{ et } y=h \end{array} \right.$$

### V.6.2 Objectif de calcul d'infiltration :

L'objectif de cette partie est de déterminer :

- La zone submergée du corps de la digue.
- Les pressions interstitielles.
- Le tracé de la ligne de saturation.
- Le débit de fuite à travers le corps.

### V.6.3 Les hypothèses de calcul de filtrations hydrauliques pour les barrages en terre : [12]

Il s'agit tout d'abord de déterminer la ligne de saturation dont le calcul suppose les hypothèses suivantes :

- que le sol est homogène et isotrope, c'est à dire que la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale sont identiques.
- que la ligne phréatique suit la loi de la parabole de ZAMARIN.
- que le calcul se fera pour la section critique de la digue émergence.

La parabole de la courbe de ZAMARIN s'écrit comme suit :

$$y^2 = (H^2/d).X \dots\dots\dots (V.27)$$

$$y_0 = H^2/2d \dots\dots\dots (V.28)$$

Avec  $h = H_e$  étant la hauteur d'eau (5.1m);

$d$  : étant la largeur en base diminuée de  $0,7 * b$ ;

$$b = m_1 * h \quad \text{donc :} \quad b = 12,75\text{m;}$$

Tel que la largeur en base est déterminée graphiquement et est égale 34,74m donc.

$$d = 25,13\text{m}$$

$$y_0 = 0,52 \text{ m}$$

Les coordonnées de la courbe de saturation sont données par l'équation suivante:

$$Y^2 = 1,04. X$$

La parabole coupe le plan d'eau en un point (A).

Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de ZAMMARIN on raccorde celle ci au point (B) du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en (B) et tangente à la parabole.

En aval on fait aboutir la ligne de saturation en un point (D) sensiblement situé a une distance de ( $a_0$ ) :

$$\begin{aligned} a_0 &= Y_0/2 \\ a_0 &= (H^2 / 2.d )/2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (V.29)$$

**AN :**

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,52 / 2 \\ a_0 &= 0,26 \text{ m} \end{aligned}$$

- **Tableau V.08:** Coordonnées de la parabole de ZAMMARIN

|              |    |             |             |             |            |             |             |             |             |
|--------------|----|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>X (m)</b> | 00 | <b>1,04</b> | <b>1,56</b> | <b>2,08</b> | <b>2,6</b> | <b>3,12</b> | <b>3,64</b> | <b>4,16</b> | <b>5,30</b> |
| <b>Y (m)</b> | 00 | 1           | 1,5         | 2           | 2.5        | 3           | 3.5         | 4           | 5.1         |

Le point d'intersection de la parabole avec la face aval du noyau C est déterminé par

l'équation Suivante :  $a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (V.30)$

Avec  $a$  : la distance  $OC$ ;

$\Delta a$  : la distance  $C_1C$ ;

$\alpha$  : angle de face aval du drain avec l'horizontale.

Pour  $\alpha = 22^\circ$  ( $\alpha < 30^\circ$ ) donc selon Casagrande  $a = \left( \sqrt{d^2 + H^2} \right) - \left( \sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} \right)$

**AN :**

$$a + \Delta a = \frac{0,37}{1 - 0,93}$$

$$a + \Delta a = 5,08 \text{ m.}$$

$$a = 1,12 \text{ m}$$

$$\frac{\Delta a}{a + \Delta a} = 0.78$$

Connaissant  $a$  et  $\Delta a$ , on peut tracer le profil de la ligne de saturation.

**V.6.4 Calcul du débit d'infiltration à travers le corps du barrage (débit de fuite) : [12]**

Le débit de fuite à travers le barrage est déterminé par la formule suivante :

$$q_n = K \cdot I \cdot A \quad \dots\dots\dots (V.31)$$

Avec  $q_n$ : débit d'infiltration ( $m^3 / s / ml$ );

$I$  : gradient hydraulique;

$K$  : Coefficient de perméabilité;

$A$  : section d'infiltration par unité de longueur.

Le gradient hydraulique est déterminé par :  $I = \frac{dy}{dx}$

La section d'infiltration est:  $A = y \cdot I$

Donc  $q_n = K \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$  Avec  $y \frac{dy}{dx} = y_0$

D'où  $q_n = K \cdot y_0 \cdot m^3/s/ml$ .

Sachant que :  $K = 5,1 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$

$$q = 0,265 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 / s / ml.$$

Le débit total à travers le barrage sera :

$$Q = q \cdot L_b = 88.81 \text{ m}$$

$$Q = 2,35 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / s.$$

Le débit de perte en une année sera :

$$Q_{an} = 0,74 \text{ m}^3 / an.$$

Cette valeur de débit de fuite est sensiblement négligeable par rapport au volume d'eau stocké.

**V.6.5 Calcul des fuites à travers la fondation :**

La vérification de la résistance d'infiltration générale est vérifiée si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$I_f < \frac{I_{cr}}{K_s} \quad \dots\dots\dots (VI.32)$$

Avec  $I_{cr}$  : Gradient d'infiltration critique donné par le *tableau* V.09.

$K_s$  : Coefficient de sécurité déterminée d'après le *tableau* V.10.

- **Tableau V.09:** Le gradient d'infiltration critique

| Sol de fondation | Argile | Limon | Sable gros | Sable moyen | Sable fin |
|------------------|--------|-------|------------|-------------|-----------|
| Icr              | 1,20   | 0,65  | 0,45       | 0,38        | 0,29      |

- **Tableau V.10:** Le coefficient de sécurité en fonction de la classe de l'ouvrage

| La classe de l'ouvrage | I    | II   | III  | IV   |
|------------------------|------|------|------|------|
| $K_s$                  | 1,25 | 1,20 | 1,15 | 1,10 |

Avec  $I_f$  : Gradient d'infiltration dans la fondation donné par

$$I_f = \frac{\Delta H}{L + 0.88T_c} \dots\dots\dots (V.33)$$

$T_c$  : profondeur de calcul de la zone de filtration de la fondation.

$H$  : charge d'eau (5.1m).

$L$  : longueur à la base du barrage (88.81m).

$$\underline{\text{AN}} : \quad I_f = \frac{5,1}{88,81 + 1,13} = 0,06$$

$$\frac{I_{cr}}{K_s} = \frac{1,20}{1,15}$$

$$\frac{I_{cr}}{K_s} = 1,04 \geq I_f$$

La résistance d'infiltration de la fondation est vérifiée.

### V.6.6 Calcul des filtres (annexes):[12]

#### V.6.6.1 Règles des filtres :

On calcule les filtres, l'exigence primordiale aux sols des filtres, qu'ils doivent vérifier, les conditions de l'absence du renard.

#### ❖ Condition 01 :

$$\frac{D_{50}}{D_{10}} \geq 0,32 \sqrt[6]{\eta} \cdot (1 + 0,05 \eta) \cdot \frac{n}{1 - n} \dots\dots\dots (V.34)$$

Avec  $\eta$  : Coefficient d'hétérogénéité du sol du filtre;

$$\eta = D_{60} / D_{10} \dots\dots\dots (V.35)$$

$n$  : Porosité du sol en fonction d'unité;

$$n = n_0 - (0,1 * \text{Log } \eta) \dots\dots\dots (V.36)$$

➤  $n_0 = 0,40$  pour les sols caillouteux;

➤  $n_0 = 0,45$  pour les sols argileux;

❖ **Condition 02 :**

Vérification des suffisances de perméabilité:

$$K_F = (2 + \sqrt[6]{\eta} * K) \text{ m/s} \dots\dots\dots (V.37)$$

Avec

K : Coefficient d'infiltration du sol protégé (m/s);

$K_F$  : Coefficient de perméabilité du filtre (m/s).

Et comme nous n'avons pas des matériaux pour confectionner les filtres on doit calculer les dimensions ou bien les fuseaux granulométriques des matériaux à mettre en place on doit déterminer la courbe granulométrique des filtres.

**V.6.6.2 Détermination de la courbe granulométrique des filtres : [1]**

En tenant compte des règles suivantes :

$$12 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 40 \dots\dots\dots (V.38)$$

$$12 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 58 \dots\dots\dots (V.39)$$

Avec  $D_{50}$  : Diamètre de filtre ;

$d_{15}$  : Diamètre du sol à protéger.

↪ **Granulométrie de sol à protéger :**

$$d_{15} = 0,0004 \text{ mm};$$

$$d_{50} = 0,0030 \text{ mm};$$

$$d_{85} = 0,0500 \text{ mm};$$

❖ La première couche de filtre est entre le corps du barrage et la première couche de drain a des limites suivantes :

$$\text{➤ } 0,005 \text{ mm} < D_{15} < 0,016 \text{ mm};$$

$$\text{➤ } 0,036 \text{ mm} < D_{50} < 0,150 \text{ mm};$$

La courbe granulométrique moyenne est :

$$D_{15} = 0,011 \text{ mm};$$

$$D_{50} = 0.12 \text{ mm};$$

❖ La deuxième couche des filtres on la détermine en fonction de la courbe moyenne de la première couche:

$$\text{➤ } 0,149 \text{ mm} < D_{15} < 0,47 \text{ mm};$$

$$\text{➤ } 1,63 \text{ mm} < D_{50} < 8,07 \text{ mm};$$

D'où la courbe granulométrique moyenne a les dimensions suivantes :

$$D_{50} = 4,85 \text{ mm};$$

$$d_{15} = 0,45 \text{ mm}.$$

☞ Filtre N° 01 :

♦ **Vérification de l'absence de RENARD dans le sol des filtres :**

Pour qu'il n'y ait pas le phénomène du RENARD il faut que :

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32\sqrt{\eta}(1 + 0,05\eta) \frac{n}{1-n} \dots\dots\dots (V.40)$$

D'après la courbe granulométrique de  $F_1$  :

$$d_{05} = 0,0045 \text{ mm}; d_{10} = 0,0070 \text{ mm};$$

$$d_{17} = 0,011 \text{ mm}; d_{60} = 0,13 \text{ mm};$$

$$\underline{\text{AN}} : \quad \eta = D_{60} / D_{10} = 18,57 \text{ Coefficient d'hétérogénéité};$$

$$n_0 = 0,45 \text{ d'où } n = 0,33;$$

$$D_5 / D_{17} = 0,41 > 0,38.$$

La condition est vérifiée donc il n'y a pas de phénomène de RENARD dans ce cas.

♦ **Vérification de La condition de TERZAGUI (zone de transition) :**

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} = \frac{0,011}{0,09} = 0,12 < 4 \dots\dots\dots (V.41)$$

La condition de TERZAGUI est vérifiée.

☞ Filtre N° 02 :

♦ **Vérification de l'absence de RENARD dans le sol des filtres :**

Pour qu'il n'y ait pas le phénomène du RENARD il faut que :

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32\sqrt{\eta}(1 + 0,05\eta) \frac{n}{1-n}$$

$$\text{Avec } D_5 / D_{17} = 0,41 > 0,40 \text{ Pour } n = 0,29; \eta = 17,15.$$

La condition est vérifiée donc le phénomène de RENARD n'existe.

♦ **Vérification de La condition de TERZAGUI (zone de transition) :**

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} = \frac{1,90}{0,6} = 3,17 < 4 \quad \text{La condition est vérifiée.}$$

L'épaisseur minimale des couches du filtre inversés est donnée par :

$$t_{\min} \geq (5-7) D_{85}$$

Dans ce cas on prévoit un revêtement allégé d'un diamètre compris dans une fourchette (20-40) mm, pour une épaisseur de quelques centimètres. Il est à noter que l'épaisseur des couches du filtre dépend du mode d'exécution des travaux :

Pour des filtres édifiés à la main :  $t_{\min} \geq 10\text{cm}$

Pour des filtres édifiés à la main :  $t_{\min} \geq 20\text{cm}$

Pour des filtres édifiés par remblayage à eau :  $t_{\min} \geq 75\text{cm}$ , pour une couche et à deux couches :  $t_{\min} \geq 50\text{cm}$

### ❖ Conclusion:

On prévoit:

Une première couche de filtre en sable d'épaisseur *10 cm*;

La deuxième couche est en gravier d'épaisseur *15 cm*;

L'enrochement d'épaisseur *45 cm*.

### V.7 Volume des travaux:

Les volumes totaux des différents matériaux constituant le corps de barrage s'obtient par la somme du volume partiel de ces sections.

$$Vb = \sum_i^n Vi \dots\dots\dots (V.42)$$

Avec :

$$V_i = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} . d \dots\dots\dots (V.43)$$

Avec  $d$  : Distance horizontale séparant deux sections successives  $S_i$  et  $S_{i+1}$ .

En effectuant le même calcul on aura le volume de chaque matériau de construction. Les volumes de différents matériaux utilisés dans le corps de la digue résumé dans les tableaux suivants

## V.7.1. Protection amont:

- Tableau V.11: Volumes de différentes couches de protection

| Coupes | Surface (m <sup>2</sup> ) |         |        | Surface moyenne (m <sup>2</sup> ) |         |        | Longueur<br>(m) | Volume (m <sup>3</sup> ) |               |                |
|--------|---------------------------|---------|--------|-----------------------------------|---------|--------|-----------------|--------------------------|---------------|----------------|
|        | Rip-Rap                   | gravier | Sable  | roche                             | gravier | Sable  |                 | roche                    | gravier       | Sable          |
| 00--00 | 00                        | 00      | 00     | 1,568                             | 0,838   | 0,5885 | 15              | 12,54                    | 6,70          | 4,71           |
| 01--01 | 1,8816                    | 1,0056  | 0,7062 | 3,2997                            | 1,4739  | 2,409  | 15              | 26,4                     | 11,79         | 19,272         |
| 02--02 | 4,7178                    | 1,9422  | 1,3338 | 6,1596                            | 2,4198  | 1,6527 | 15              | 49,278                   | 19,356        | 13,224         |
| 03--03 | 7,6014                    | 2,8974  | 1,9716 | 9,1893                            | 3,438   | 2,3202 | 15              | 73,512                   | 27,504        | 18,564         |
| 04--04 | 10,7772                   | 3,9786  | 2,6688 | 10,4184                           | 3,8637  | 2,6052 | 15              | 83,346                   | 30,912        | 20,844         |
| 05--05 | 10,0596                   | 3,7488  | 2,5416 | 9,1578                            | 3,4389  | 2,3367 | 15              | 73,26                    | 27,51         | 18,696         |
| 06--06 | 8,256                     | 3,129   | 2,1318 | 7,6254                            | 2,9208  | 1,9962 | 15              | 61,002                   | 23,364        | 15,972         |
| 00--00 | 00                        | 00      | 00     | <b>total (m<sup>3</sup>)</b>      |         |        |                 | <b>523,28</b>            | <b>211,14</b> | <b>144,396</b> |

## V.7.2. Prisme de drainage et tapis drainant:

- Tableau V.12: Volumes des différents matériaux constituant le prisme et tapis de drainage

| Coupes | Surface (m <sup>2</sup> ) |         |        | Surface moyenne (m <sup>2</sup> ) |         |        | Longueur<br>(m) | Volume (m <sup>3</sup> ) |         |        |
|--------|---------------------------|---------|--------|-----------------------------------|---------|--------|-----------------|--------------------------|---------|--------|
|        | Rip-Rap                   | gravier | Sable  | roche                             | gravier | Sable  |                 | roche                    | gravier | Sable  |
| 00--00 | 00                        | 00      | 00     | 00                                | 00      | 00     | 08              | 00                       | 00      | 00     |
| 01--01 | 00                        | 00      | 00     |                                   |         |        | 08              | 00                       | 00      | 00     |
| 02--02 | 00                        | 00      | 00     |                                   |         |        |                 |                          |         |        |
| 03--03 | 00                        | 00      | 00     | 00                                | 00      | 00     | 08              | 00                       | 00      | 00     |
| 04--04 | 16,1532                   | 3,3042  | 1,6446 | 8,0766                            | 1,6524  | 0,8226 | 08              | 64,614                   | 13,218  | 6,576  |
| 05--05 | 43,8762                   | 3,078   | 1,5204 | 30,0147                           | 1,5828  | 1,5828 | 08              | 240,1176                 | 25,53   | 12,66  |
| 06--06 | 43,2708                   | 3,0726  | 1,4712 | 43,5738                           | 1,4958  | 1,4958 | 08              | 348,588                  | 24,6    | 11,964 |
| 00--00 | 00                        | 00      | 00     | 25,944                            | 1,6008  | 1,6008 | 08              | 207,552                  | 26,166  | 12,804 |
|        |                           |         |        | total (m <sup>3</sup> )           |         |        |                 | 1434,786<br>1578,77      | 149,19  | 73,34  |

## V.7.3. corps de la digue:

- Tableau V.13: Volumes des différents matériaux

| Coupes | Surface (m <sup>2</sup> ) |                      |                 | Surface moyenne (m <sup>2</sup> ) |                      |                 | Longueur<br>(m) | Volume (m <sup>3</sup> ) |                      |                 |
|--------|---------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|----------------------|-----------------|
|        | terre<br>végétale         | Recharge<br>(argile) | Clé<br>D'etanch | terre<br>végétale                 | Recharge<br>(argile) | Clé<br>D'etanch |                 | terre<br>végétale        | Recharge<br>(argile) | Clé<br>D'etanch |
| 00--00 | 0                         | 0                    | 00              | 1,9971                            | 9,8448               | 00              | 15              | 15,978                   | 78,6                 | 00              |
| 01--01 | 3,9942                    | 19,6896              | 00              | 5,6514                            | 47,1108              | 00              | 15              | 45,21                    | 376,8                | 00              |
| 02--02 | 7,308                     | 74,532               | 00              | 9,2988                            | 105,522              | 00              | 15              | 74,388                   | 843,6                | 00              |
| 03--03 | 11,289                    | 136,512              | 00              | 12,6234                           | 219,5622             | 00              | 15              | 100,986                  | 1756,2               | 00              |
| 04--04 | 13,9572                   | 302,6118             | 00              | 13,7682                           | 337,1286             | 8,9418          | 15              | 110,148                  | 2697,3               | 119,22          |
| 05--05 | 13,5792                   | 371,6454             | 17,883          | 13,854                            | 331,1292             | 8,9418          | 15              | 110,832                  | 2649,4               | 119,22          |
| 06--06 | 14,1282                   | 290,6124             | 00              | 12,819                            | 247,383              | 00              | 13              | 102,552                  | 1978,8               | 00              |
| 00--00 | 0                         | 0                    | 00              | <b>total (m<sup>3</sup>)</b>      |                      |                 |                 | <b>755,8572</b>          | <b>13208,91</b>      | <b>143,064</b>  |

# CHAPITRE VI :

## ETUDE DE STABILITE DE LA DIGUE

**VI.1 Généralités sur l'étude de stabilité des pentes (barrage) : [6]**

La sécurité au glissement est calcul pour divers surfaces de rupture qui peuvent traverser plusieurs zones du barrage en remblai et éventuellement le sous-sol. On cherche la surface de rupture qui donne la plus petite sécurité. On fait généralement l'épenthèse d'une surface circulaire. Toutefois, selon la configuration de l'ouvrage, le calcul peut aussi s'effectuer en considérant une surface de glissement quelconque.

On contrôle plusieurs surfaces de rupture orientées soit vers l'amont, soit vers l'aval qui recoupent :

- ❖ La protection de surface (riprap),
- ❖ Le corps d'appui amont ou aval,
- ❖ Le noyau,
- ❖ Les zones de transition (fiktre),

Cette stabilité des barrages en terre est étudiée au moyen des méthodes utilisées plus généralement pour l'étude des pentes en mécanique des sols les plus courantes sont celles de Fellenius 1948, Bishop 1955, Morgenstern-price (1965), Janbu 1954. Toutes sont des méthodes d'équilibre de forces, dans lesquelles les forces déstabilisatrices (poids, pressions interstitielles) doivent être compensées par des forces résistantes, avec des marges de sécurité conventionnellement choisies. Un facteur qui influe très fortement sur la stabilité est la pression interstitielle qui peut s'installer de façon durable dans le remblai :

- en conséquence des variations de contraintes, résultant de la construction, d'une vidange rapide, ou bien de séismes.

Plusieurs configurations doivent être analysées :

- ☞ *Etat normal en service* (retenue pleine) : le poids du remblai et la poussée de la retenue sont considérés ; le champ de pression interstitielle est calculé par un réseau d'écoulement à travers le barrage (et sa fondation) en tenant compte des diverses perméabilités ;
- ☞ *Fin de construction* : pas encore d'action de la retenue, mais les pressions interstitielles sont élevées car les surpressions dues à la construction ne sont pas encore dissipées ; cas souvent dimensionnant pour le talus aval ;
- ☞ *Fin de vidange rapide* : après une baisse brusque de la retenue, les pressions interstitielles induites par la retenue ne se sont pas encore dissipées et déstabilisent le remblai vers l'amont ; ce cas est souvent dimensionnant pour le talus amont ;

Les coefficients de sécurité couramment admis en fonction de classe de barrage dans le tableau VI.01.

- **Tableau VI.01:** Coefficient de stabilité admissible des talus

| Combinaison des charges Et des actions | Coefficient de stabilité admissible des talus des barrages en telles de classe |           |           |           |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                        | I                                                                              | II        | III       | V         |
| Fondamentales                          | 1,30-1,20                                                                      | 1,20-1,15 | 1,15-1,10 | 1,10-1,05 |
| Singulières                            | 1,10-1,05                                                                      | 1,10-1,05 | 1,05      | 1,05      |

En général les coefficients couramment admis sont:

- 01,50 pour les conditions normales de service;
- 01,30 pour la fin de construction et la vidange rapide;
- 01,00 pour le séisme maximal probable.

## VI.2 Le glissement des talus :[6]

Il existe plusieurs types:

- Glissement circulaire sur un talus (le cercle de glissement recoupe parfois la fondation si le matériau la constituant présente des caractéristiques mécaniques médiocres).
- Glissement en cascade;
- Glissement, puit renard.

Ces deux derniers types se manifestent lorsque le cercle émanant du talus aval recoupe le talus amont à un niveau inférieur à la côte du plan d'eau amont.

La vérification de la stabilité des talus tient compte des caractéristiques géotechniques des matériaux de construction et du sol de la fondation.

La vérification des talus de barrage par la méthode grapho-analytique consiste en détermination du coefficient de stabilité  $K$ , qui est égal au rapport du moment des efforts de stabilité sur le moment des efforts de basculement (*forces motrices*), par rapport centre de glissement du terrain qui doit être supérieur ou égal au coefficient admissible  $k_{adm}$ .

### VI.2.1 Ordre de calcul (Méthode des tranches) :[6]

- Tracer à l'échelle le profil en travers du barrage.
- Tracer deux lignes au milieu du talus moyen (Point B), la première est verticale, la deuxième avec un angle  $85^\circ$  par rapport à la ligne du talus.

On partage la zone limitée par la courbe en parties verticales (*tranches*) d'une épaisseur  $b = 0,10 \cdot R$ , on marque toutes les parties gauches par des chiffres positifs et les parties droites.

Par des chiffres négatifs en commençant de la partie *zéro* sous le centre de glissement (*projection*)

Les efforts agissants sur une partie de glissement sont :

- Poids de la tranche  $G$ ;
- Forces de frottement au pied de la partie partagée  $F$ ;
- Forces de pressions interstitielles;
- Forces de Cohésion;
- L'effort du séisme.

Le poids de la tranche se décompose en deux composantes :

- Composante normale (forces stabilisatrices)  $N = G_n \cos \alpha$ ;
- Composante périphérique (forces déstabilisatrices)  $T = G_n \sin \alpha$ ;
- $\alpha$  : angle d'inclinaison du pied de la tranche par rapport à l'horizontale.

### VI.2.2 Les caractéristiques géotechniques des sols :

Elles sont représentées dans le *tableau VI.03* suivant :

**- Tableau VI.03: Caractéristique géotechnique**

| <i>Paramètres</i>     | <i>Unité</i>     | <i>Corps du barrage</i> |
|-----------------------|------------------|-------------------------|
| $\varphi$             | Degré (°)        | 13,11                   |
| C                     | T/m <sup>2</sup> | 0,40                    |
| $\gamma_{\text{sat}}$ | T/m <sup>3</sup> | 2,00                    |
| $\gamma_d$            | T/m <sup>3</sup> | 1,676                   |
| $\gamma'$             | T/m <sup>3</sup> | 01                      |

### VI.2.3 Calcul des forces appliquées à chaque tranche :

✎ *Force de pesanteur :*

La force de pesanteur est appliquée au centre de gravité pour chaque tranche.

La formule s'écrit :

$$G_n = b (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2) \dots \dots \dots (VI.03)$$

Avec  $h_1, h_2$  : hauteurs des tranches;

$b$  : largeur de la tranche;

$\gamma_1$ : densité de la zone du massif située au dessus de la ligne de saturation.

( $\gamma_d$  densité sèche).

$\gamma_2$ : densité de la zone du massif située au dessous de la ligne de saturation.

( $\gamma_{sat}$  densité du matériaux de construction à l'état saturé).

Cette force là a deux composantes :

$N_n = G_n \cos \alpha$  qui est une force normale stabilisatrice;

$T_n = G_n \sin \alpha$  qui est une force déstabilisatrice tangentielle au cercle de glissement.

Avec  $\sin \alpha = \frac{\text{Numéro.d'ordre.de.la.section.divisée}}{\text{nombre.total.des.tranches}}$ ;

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$$

- ❖ Pour le cas d'une vidange rapide on utilise pour le calcul du poids de la tranche la densité déjàugée  $\gamma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w)$ .

☞ Forces de pression interstitielles :

Dans le cas ou le réservoir est plein la force de pression interstitielle se calcule comme suit :

$$P = U * dl = \gamma_w * h * dl \dots \dots \dots (VI.04)$$

Avec U : pression interstitielle;

dl : longueur en arc de la tranche;

$\gamma_w$  : poids volumique de l'eau  $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$ ;

h : hauteur de la tranche.

☞ Forces de cohésion :

$$F_c = c * dl \dots \dots \dots (VI.05)$$

Avec C : Cohésion du sol considéré.

☞ Forces dues au séisme :

Ces forces sont considérées horizontales, appliquées aux centres des tranches et sont dues à l'accélération du mouvement provoqué par le séisme.

$$T = a * G_n \dots \dots \dots (VI.06)$$

Avec a : Coefficient de séisme ( $a = 0,15$ );

$G_n$  : Poids de la tranche.

**VI.2.4. Classement des forces :**

On peut classer toutes ces forces comme suit :

↳ *Les forces stabilisatrices :*

➤ **Force de frottement :**

$$F_1 = N_n \operatorname{tg} \varphi - U \operatorname{dl} \operatorname{tg} \varphi \dots \dots \dots (\text{VI.07})$$

Avec :  $\varphi$  : Angle de frottement;

dl : Longueur de la courbe de glissement dans les limites de la partie partagée.

➤ **Force de cohésion :**

$$F_c = c * dl \dots \dots \dots (\text{VI.08})$$

Avec  $dl = \frac{b}{\cos(\alpha)}$

b : largeur de la tranche.

Le moment de la force par rapport au centre de glissement est donné par :

$$M_s = [ (N_n - U \operatorname{dl}) \operatorname{tg} \varphi + c \operatorname{dl} ] R \dots \dots \dots (\text{VI.09})$$

Avec R : rayon de la courbe de glissement.

↳ *Les forces déstabilisatrices (motrices):*

Les forces motrices sont caractérisées par la composante tangentielle au cercle de glissement, elle tend à faire glisser la tranche du talus vers le bas.

Le moment de ces forces par rapports au centre du cercle de glissement est donné par :

$$M = R * \sum_{i=1}^n T_n \dots \dots \dots (\text{VI.10})$$

Dans le cas d'un séisme il y a une force particulière supposée horizontale qui tend à faire vibrer la tranche du talus. Le moment de cette force est :

$$M_T = a G_n d_n \dots \dots \dots (\text{VI.11})$$

♦ **Remarque :**

Les moments de toutes ces forces sont calculés par rapport au centre du cercle de glissement.

**VI.3 Calcul du coefficient de sécurité pour les différents types de fonctionnement :[6]****VI.3.1 calcul de Ks (coefficient de sécurité) :**

Le coefficient  $K_s$  est le rapport du moment des forces stabilisatrices sur les moments des forces motrices par rapport au centre de glissement donné par felinuis:

$$K_s = \frac{\sum (N_n - P) \operatorname{tg} \varphi + \sum c dl}{\sum T_n + \frac{1}{R} \sum a G_n d_n} \dots \dots \dots (\text{VI.12})$$

Pour le cas d'une retenue vide ( $P=0$ ), on vérifie la stabilité avec et sans l'effet du séisme.

Avec  $dn$  : la distance entre le centre de gravité de la tranche et le centre du cercle de glissement;

$R$  : c'est le rayon du cercle de glissement.

❖ avec effet de séisme :

$$K_{as} = \frac{\sum G_n \cos \alpha_n \cdot \tan \varphi + \sum C \cdot dl}{\sum G_n \sin \alpha_n + \frac{\sum a G_n dn}{R}} \dots\dots\dots (VI.13)$$

❖ Sans l'effet de séisme :

$$K_{ss} = \frac{\sum G_n \cos \alpha_n \cdot \tan \varphi_n + \sum C \cdot dl}{\sum G_n \sin \alpha_n} \dots\dots\dots (VI.14)$$

### VI.3.2 Calcul du $K_s$ pour le cas de vidange rapide :

$K_s$  est calculé seulement pour le talus amont. Et dans ce cas là on calcule le poids de la tranche à l'aide de la densité déjaugée du matériaux  $\gamma'$ .

❖ Avec effet de séisme :

$$K_{as} = \frac{\sum (G_n \cos \alpha_n - P) \tan \varphi + \sum C \cdot dl}{\sum G_n \sin \alpha_n + \sum a \frac{G_n dn}{R}} \dots\dots\dots (VI.15)$$

❖ Sans effet de séisme :

$$K_{ss} = \frac{\sum G_n \cos \alpha_n \cdot \tan \varphi_n + \sum C \cdot dl}{\sum G_n \sin \alpha_n} \dots\dots\dots (VI.16)$$

Le coefficient  $K_s$  calculé doit être supérieur à  $K_{s \text{ adm}}$ , pour notre cas le barrage est de classe III.

$$K_{ss} = 1,30 \text{ -- } 1,50.$$

Pour tous les types de fonctionnement.  $K_{as} = 1,000$

Les résultats de calcul sont regroupés dans le *tableau VI.04*.

*-Tableau VI.04: Différentes coefficients de sécurité*

| Cas de sollicitation  |             | Coefficient de sécurité |             |
|-----------------------|-------------|-------------------------|-------------|
|                       |             | Avec séisme             | Sans séisme |
| Fin de construction   | Talus AMONT |                         |             |
|                       | R= 11,04m   | 0,63                    | 2,25        |
|                       | R= 12,81 m  | 0,62                    | 2,9         |
|                       | R=13,25m    | 0,48                    | 1,89        |
|                       | R=13,53m    | 0,64                    | 1,96        |
| Fin de construction   | Talus Aval  |                         |             |
|                       | R= 10,96 m  | 0,73                    | 1,74        |
|                       | R= 13,85 m  | 0,65                    | 1,78        |
|                       | R=14,00m    | 0,55                    | 1,86        |
| Fonctionnement normal | R=14,77m    | 0,78                    | 1,86        |
|                       | Talus aval  |                         |             |
|                       | R=14,00 m   | 0,94                    | 2,00        |
|                       | R= 10,96 m  | 0,76                    | 2,72        |
| Vidange rapide        | R= 13,85 m  | 0,92                    | 3,61        |
|                       | R= 14,77 m  | 0,90                    | 2,05        |
|                       | Talus amont |                         |             |
|                       | R=13,25 m   | 0,76                    | 2,72        |
|                       | R= 11,04 m  | 0,76                    | 3,52        |
|                       | R= 12,81 m  | 0,36                    | 0,99        |
|                       | R= 13,53 m  | 0,47                    | 1,18        |

D'après les résultats obtenus, la stabilité des talus de la digue est vérifiée pour tout les cas de sollicitation, d'où les fruits des talus amont et aval sont acceptés.

CHAPITRE VII :  
ETUDE DES VARIANTES  
DES OUVRAGES  
ANNEXES

**VII.1 Introduction :[4]**

Les barrages réservoirs sont généralement équipés d'ouvrages annexes destinés à l'exploitation de la retenue et assurer la sécurité du barrage. Les ouvrages annexes sont des ouvrages hydrauliques qui font transiter l'eau du bief amont vers le bief aval, à travers des orifices spéciaux, des déversoirs, des canaux, des conduites, des galeries et autres, en utilisant pour ce but, la charge hydraulique effective disponible (dans les limites d'un court tronçon du lit naturel ou artificiel).

Les dimensions en plan et en élévation, la conception ainsi que la composition des ouvrages annexes d'un barrage sont dictées par le débit de projet, la charge effective, le relief et la géologie du site, ainsi que les conditions de réalisation et exploitation.

Les ouvrages annexes prévus pour le retenu seront:

- Dérivation pendant la construction (dérivation provisoire) ;
- Evacuateur de crue ;
- Vidange de fond;
- Prise d'eau ;

Tout type de ces ouvrages comporte différentes variantes, représentant des avantages et des inconvénients, l'objectif est donc de choisir la catégorie d'ouvrage le plus correspondant (fonctionnement - économie) à notre ouvrage.

**VII.2 Ouvrage de vidange : [4]**

Elément très important (primordial) pour un barrage qui doit assurer :

- ❖ La vidange complète du bassin (purgés, révisions).
- ❖ La montée contrôlée du plan d'eau lors de premier remplissage (comportement du barrage et des rives inondées).
- ❖ Contrôle du plan d'eau de l'ouvrage en cas d'événements particuliers (instabilité des rives).
- ❖ Un abaissement du plan d'eau en période de danger (dangers naturels ou conflits armés).
- ❖ L'alimentation du cours d'eau aval pour des cas exceptionnels.
- ❖ De faire passer les eaux lors de la montée du remblai (évacuation de la crue de chantier).

L'ouvrage de vidange peut être de plusieurs types tels que :

*Conduite de vidange en charge :*

L'ouvrage est généralement combiné avec celui de la prise ou de l'évacuateur de crue (tulipe). La conduite de vidange doit être en acier enrobé de béton armé ou une conduite en âme tôle sous le remblai, elle est dimensionnée pour un diamètre qui est assuré le débit à évacuer.

✓ *Conduites à écoulement libre :*

Il y a deux catégories de conduites peuvent être utilisées pour les réaliser :

- Le tuyau cylindrique de grand diamètre en acier;
- La canalisation en béton de type galerie ou ovoïde (01 à 02) m de hauteur.

L'aération de l'écoulement dans ces conduites est obligatoire, on prévoit donc un reniflard à l'aval immédiat de la vanne amont afin d'éviter les phénomènes de battements ou de vibration sous l'effet d'écoulements instables à forts débits.

Il peut être judicieux de prévoir la vidange sous forme d'un pertuis dans l'évacuateur de surface (déversoir poids, barrage déversant), contient un système de fermeture par vanne à glissement ou, plus simplement, par un batardeau. Ce système est rustique il est moins soumis aux aléas d'entretien, tel que blocage de vannes.

### **VII.2.1 Choix de la variante :**

- ❖ L'ouvrage de vidange à batardeau est rejeté de point de vue type de barrage (en terre), donc on ne peut retenir que la conduite de vidange.
- ❖ La conduite avec écoulement à surface libre possède l'inconvénient majeur du coût, (canalisation en béton de type galerie) et les accessoires supplémentaires (Reniflard) nécessitant un entretien considérable.
- ❖ La conduite en charge est plus économique et peut être projetée dans une galerie de dérivation sans aucun risque.
- ❖ La variante de l'ouvrage à retenir est celle d'une conduite en charge.

*- Recommandation pour les dispositifs constitués de la conduite de vidange :*

- Il faut d'une part une protection amont afin d'éviter tout problème causé par le transport solide (colmatage), et d'autre part prévoir un dissipateur d'énergie à l'aval pour éviter les érosions de la digue.
- Choisir une bonne assise pour la conduite de vidange.

- Prévoir le nombre et la position des vannes nécessaires en fonction des types des conduites, de leurs diamètres, de la charge amont du barrage et du volume stocké.

Quelques dispositifs minimums de vidange qu'ont doit tenir en compte sont donnés dans le tableau VII.

\* **Tableau VII.01:** Type de vidange de fond en fonction le produit suivant ( $H^2 \cdot \sqrt{V}$ ).

| $H^2 \cdot \sqrt{V}$ | Type de conduite                                             | Diamètre (mm)               | Nombre de position des vannes               |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| $\leq 30$            | P V C ou Acier                                               | (160 – 200)<br>300 en Acier | Une vanne en aval                           |
| 30 à 100             | Acier                                                        | 300 - 400                   |                                             |
| 100 à 300            | Acier ou béton en âme tôle                                   | 400 – 600                   | une vanne de garde amont et une vanne avale |
| 300 à 700            |                                                              | 600 – 800                   |                                             |
| 700 à 1500           |                                                              | 800 - 1200                  |                                             |
| $\geq 1500$          | Galerie en béton armé (tuyau posé dans la galerie de visite) |                             | Vanne de garde et vanne réglable en avale.  |

Avec H : hauteur du barrage en (m)

V : volume d'eau stocké en (Mm<sup>3</sup>)

Pour le conduite de vidange on prévoit une surélévation par rapport à la galerie de dérivation pour éviter tout risques d'envasement pouvant à la suite bloquer la vanne.

L'ouvrage de vidange sera constitué de deux vannes, une vanne de garde (Batardeau) en amont et une autre en aval.

### VII.3 Ouvrage de prise d'eau : [4]

L'objectif de cet ouvrage annexe est assuré le débit de pointe de la demande exigé à aval, cette eau doit être compatible à sa destination (avec qualité) demandée.

Les niveaux où la prise d'eau soit fonctionnée sont : le niveau normal de la retenue et le niveau de plus basses eaux.

**VII.3.1 Type de prise :***✓ Prise d'eau en charge :*

Ce type est représenté par une conduite sous remblai en (même tôle) ou en acier enrobé de béton. Ce type d'ouvrage est très économique, permettant une prise d'eau avec faible perte de charge et donne l'avantage du regroupement des organes de command au pied aval de la digue. En outre les inconvénients majeurs et le niveau unique de prise et la fonction non séparée avec la vidange.

*✓ Prise d'eau flottante :*

Dans cette variante, le fonctionnement de prise et de vidange sont séparés, le prélèvement d'eau s'effectue à une profondeur constante; l'inconvénient de celle ci et celui du coût considérable de sorte qu'elle nécessite des mécanismes relativement coûteux nécessitant un entretien périodique de pièces hydromécaniques.

*✓ Tour de prise :*

Cette variante représente l'avantage du prélèvement à différents niveaux, la séparation des fonctions (prise- vidange), mais du point de vue économique elle est plus sophistiquée (tour + passerelle), ainsi que la sensibilité aux vibrations dues aux séismes.

**VII.4 Ouvrage d'évacuateur de crues : [4]**

La destination de cet ouvrage annexe est assurée la sécurité du barrage. Il sert à évacuer, en période de crue, l'eau excédentaire du réservoir, dans le bief aval ou dans le bassin versant voisin et ce afin d'éviter la submersion de la crête du barrage et sans créer d'érosion en aval risquant d'être dommageable pour la digue.

**VII.4.1 Différents types des évacuateurs de crues :***✓ Evacuateur de crues en puit (tulipe) :*

Dans ce type d'ouvrage, le déversoir en lui-même est circulaire ou semi-circulaire, il se prolonge par un puit coudé suivi d'une galerie ou d'une conduite à écoulement à surface libre et un dissipateur d'énergie aval.

La loi de débit est similaire à celle des évacuateurs de surfaces linéaires en écoulement dénoyé, mais lorsque l'ouvrage est noyé, il se comporte comme un orifice à veine mouillée.

Ce type d'ouvrage équipera le plus souvent les grands barrages vu les avantages :

- Evacuation d'importants débits ( $80 < Q < 6000$ ) m<sup>3</sup>/s;
- Bon fonctionnement avec forte chute pour des grandes charges.

En parallèle ce type d'évacuateurs représente les inconvénients :

- Problème de saturation (Débit supérieur à celui de dimensionnement, charriage);
- Problème de vibration;
- Problème de liaison difficile à assurer (digue - conduite ou galerie);
- Dissipation au pied de la digue.
- Prévoir des protections anti vortex (coût et entretien).

✓ *Evacuateur de crues latéral à entonnement latéral :*

Ce type d'ouvrage est à écoulement à surface libre, son critère de choix est purement topographique.

Ce type représente l'avantage principal d'une limitation du volume des fouilles avec une grande largeur déversante.

L'inconvénient majeur est celui de la saturation, puisque la capacité de débit est limitée par la section d'entonnement du coursier.

✓ *Evacuateur de crue latéral à entonnement frontal :*

Ce type appartient au type des évacuateurs à écoulement à surface libre. Il représente les avantages :

- Fonctionnement très sûr même pour des débits dépassant le débit de la crue de projet;
- Facilité de réalisation.

Les inconvénients présentent par cette catégorie d'ouvrage sont :

- Le coût peut élever;
- La difficulté de modification.

✓ *Evacuateur de crues en siphon :*

Ce type d'ouvrage est à écoulement en charge, posé sur le corps du barrage, il représente les avantages :

- Aucune exigence topographique;
- Calcul usuel.

Les inconvénients présentent par cette catégorie d'ouvrage sont :

Amorçage et le désamorçage;

- Entretien obligatoirement;
- Débit faible à évacuer;
- Dispositif sur le corps de la digue.

# CHAPITRE VIII : LES OUVRAGES ANNEXES

**VIII.1 Introduction :[6]**

Un barrage, s'il retient l'écoulement, doit aussi conserver la faculté d'évacuer les crues exceptionnelles. Mais il faut que cette évacuation ait lieu sans que la lame d'eau ne le submerge car il aurait toute chance d'être gravement endommagé ou détruit. On prévoit alors un organe d'évacuation à fonctionnement automatique appelé évacuateur de crues.

**VIII.1.1 Synthèses de variantes de l'évacuateur de crue : [3,4 ,7]****VIII.1.1.1 Emplacement de l'évacuateur de crue :**

Outre les considérations économiques qu'on développera ultérieurement, l'emplacement de l'évacuateur de crue, dépend essentiellement des conditions topographiques et géologiques du site. On estime que les deux rives surmontant la vallée, présentent des endroits potentiels d'implantation. Contrairement, l'incorporation de l'ouvrage dans la digue est déconseillée vu les inconvénients multiples qu'elle présente à savoir, le risque de tassement et de déstabilisation du talus aval ; le débit d'évacuation limité ; et les précautions rigoureuses à prendre au niveau du coursier et du bassin de dissipation d'énergie.

**VIII.1.1.2 Comparaison entre les rives :**

Les conditions topographiques nous obligent à projeter un évacuateur de crues a surface libre en rive droite dans le sens de l'écoulement.

Le trace envisage permet d'avoir un volume de terrassement minimal, les profondeurs d'excavation varieront de *0,50 à 3,00m*. A noter que la plupart des matériaux fouillés conviendront à l'usage dans les remblais (recharge).

**VIII.1.1.3 Constitution et choix de l'évacuateur de crue :**

Généralement un évacuateur de crue est constitué de trois parties ou organes principaux :

- un organe de contrôle du débit (par exemple un déversoir, une vanne,...);
- un coursier (canal, conduite);
- un dissipateur d'énergie installé au pied du coursier.

Les critères de choix d'un évacuateur de crue sont les suivants :

- ❧ Sûreté et sécurité de fonctionnement;
- ❧ Prix (facteur économique);
- ❧ Difficulté de calcul hydraulique;
- ❧ Exigence topographique, géologique et géotechnique;
- ❧ Facilité d'entretien;
- ❧ Possibilité de modifier l'ouvrage.

**VIII.1.1.4 Type d'évacuateur de crue :[7]**

Les types d'évacuateurs de crue qui sont normalement associés aux barrages en remblai sont énumérés dans le tableau suivant :

- **Tableau VIII.01:** Sélection des types d'évacuateurs de crue douce

| Type d'évacuateur de crue                                   | Commentaires                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Déversoir latéral avec un seuil de déversement en dos d'âne | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pour des versants à fortes pentes.</li> <li>▪ Volume des déblais importants</li> </ul>                                                                                 |
| Déversoir frontal avec seuil déversant en dos d'âne.        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pour des versants à faibles pentes.</li> <li>▪ Volume des terrassements faible.</li> <li>▪ La meilleure disposition du point de vue hydraulique.</li> </ul>            |
| Déversoir frontal avec seuil déversant en labyrinthe        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Réduira la largeur du coursier d'évacuateur, mais pas autant que l'option de l'évacuateur latéral.</li> </ul>                                                          |
| Evacuateur en puits                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilisé où il n'existe pas d'options d'évacuateur à surface libre à cause de facteurs géologiques ou topographiques.</li> </ul>                                        |
| Siphon                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peut être obstrué aisément par des corps flottants. D'autre part les successions d'amorçage et de désamorçage entraînent un écoulement irrégulier à l'aval.</li> </ul> |

Outre les conditions citées ci-dessus, le choix de l'évacuateur de crue considère d'autres facteurs à savoir, le type de barrage, le débit à évacuer et la sécurité de l'ouvrage. Ainsi les préférences doivent, pour des raisons de sécurité, aller à des évacuateurs à seuils libres sans organes mécaniques de contrôle.

L'évacuateur de crue en tulipe avec une galerie sous la digue peut provoquer des problèmes d'instabilité du remblai à cause des vibrations qui peuvent se produire lors de l'évacuation, le problème de charriage qui peut causer la saturation pourra se manifester facilement en cas des crues exceptionnelles pouvant arracher les arbres du site boisé ; la faible charge sur l'entonnement circulaire, et l'évacuation au pied de la digue pouvant causer l'érosion régressive. Donc cette variante peut être rejetée.

L'évacuateur de crue latéral s'adapte au site du fait que les excavations seront réduites, mais le problème de saturation pour une crue de débit qui peut dépasser celui de la crue de projet rend celle-ci peu fiable.

On a la pente du versant est faible, ce qui diminue le volume des terrassements. Il s'adapte aussi au site, puisque la largeur déversante n'est pas très importante et la topographie permet son implantation.

Alors on élimine la première variante. On peut alors réaliser un entonnement frontal qui est la meilleure disposition du point de vue hydraulique.

♦ **Conclusion :**

Conformément aux clarifications illustrées ci-dessus, le choix est arrêté pour l'étude d'un évacuateur de crue à entonnement frontal sur la rive droite.

**VIII.1.2 Choix du tracé de l'axe :**

Pour un tracé judicieux, l'axe de l'évacuateur de crue doit être :

- ☞ Le plus court possible;
- ☞ Suffisamment éloigné du pied aval de la digue;
- ☞ Rectiligne (si possible);
- ☞ Plus ou moins orthogonal à l'axe de la digue.

**VIII.2 Etude de la variante retenue :[4]**

Les évacuateurs de crue à surface libre, se composent principalement, de l'amont en aval, des ouvrages suivants :

- ☞ Canal d'approche;
- ☞ Seuil déversant;
- ☞ Chenal d'écoulement;
- ☞ Coursier;
- ☞ Dissipateur d'énergie;
- ☞ Canal de fuite.

Nous avons optés pour un coursier à une seule pente.

**VIII.2.1 Caractéristiques de l'évacuateur de crue :**

- Déversoir type Creager;
- Niveau normal de la retenue  $NNR = 237,1 \text{ m NGA}$ ;
- Niveau la plus haute eau  $NPHE = 237,40 \text{ m NGA}$ ;
- Charge à évacuer :  $H = 0,19\text{m}$ ;
- Débit de pointe à évacuer  $Q_{\text{évacuer}} = 0.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

➤ Largeur déversant  $L = 1\text{ m}$ .

### VIII.2.2 Dimensionnement et calcul hydraulique de chacun des éléments de l'évacuateur de crue :[5]

#### VIII.2.2.1 canal d'approche :

Le canal d'approche sera conçu de façon à limiter les vitesses moyennes d'approche à fin de réduire au minimum les pertes de charge et de guider calmement les crues vers le seuil de déversement.

Généralement, l'écoulement est calme avec une vitesse faible en la comparant avec la vitesse d'écoulement dans le coursier.

Donc on doit créer une plate forme d'approche arasée à la cote du niveau normale de la retenue;  $NNR = 237,1\text{ m NGA}$ .

La vitesse d'approche est donnée par la formule :

$$V_a = \frac{Q_{\text{projet}}}{S} \dots\dots\dots (VIII.01)$$

Avec  $V_a$  : vitesse d'approche;

$Q$  : débit de projet évacuer ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$S$  : section du canal ( $\text{m}^2$ );  $S = H \times L$

$H$  : charge d'eau (m);  $H = h + P$

$P$  : hauteur de pelle (m);

$h$  : lame déversante (m).

**A.N:**  $Q = 0,71\text{ m}^3/\text{s}$ ;

$H = 0,69\text{ m}$ ;

$S_c = 0,69\text{ m}^2$ ;

D'où  $V_p = 1,03\text{ m/s}$ .

La vitesse admissible pour le sol en place  $V_{adm} = (0,45-1,97)\text{ m/s}$

$V_p < V_{adm}$  donc pas de risque d'érosion et d'affouillement.

↪ Hauteur du mur du canal d'approche :

La hauteur de mur est :

$$H_m = H + P + R \dots\dots\dots (VIII.02)$$

Avec  $R$  : la revanche

Revanche pour un canal est calculée d'après la formule suivante :

$$R_c = 0,6 + 0,05V(H)^{1/3} \dots\dots\dots (VIII.03)$$

$$R_c = 0,65\text{ m}$$

On adopte une valeur de :

$$H_m = 1,8m.$$

↳ *Longueur du canal d'approche* : La longueur du canal d'approche est déterminée d'après la topographie, elle est égale à 7,5m.

### VIII.2.2.2. Le déversoir :

Le seuil normal est un déversoir dont la crête et la partie aval sont profilées de manière à épouser la forme de la lame déversante. Les indications de la figure suivante permettent de déterminer le profil normal d'un déversoir à parement amont vertical.

Le profil du seuil déversant est de type Creager, l'avantage de ce contour est qu'en chaque point de son parement aval la pression égal a la pression atmosphérique, tout profil situé au dessus entraînera des dépressions donc des risques de décollement.

↳ *Calcul du débit spécifique en dessus du seuil:*

$$q = Q/B \quad m^3/s/m$$

**AN:**  $q = 0,71/1$

$$q = 0,71 \, m^3/s/m.$$

↳ *la hauteur critique au niveau du seuil:*

$$h_{cr} = 3 \sqrt{\frac{\alpha \cdot q^2}{g}} \dots\dots\dots (VIII.03)$$

Avec  $\alpha = 1$

**AN:**  $h_{cr} = 0,37 \, m.$

↳ *la vitesse critique:*

$$V_{cr} = \frac{q}{h_{cr}} \dots\dots\dots (VIII.04)$$

**AN:**  $V_{cr} = 0,71 / 0,37$

$$V_{cr} = 1,92 \, m/s.$$

↳ *la hauteur totale de tirant d'eau  $h_n$  :*

$$h_n = 3/2 \, h_{cr} \dots\dots\dots (VIII.05)$$

**AN:**  $h_n = 0,56 \, m.$

↳ la pente critique :

$$I_{cr} = (V_{cr} / (75 * h_{cr}^{2/3}))^2 \dots\dots\dots (VIII.06)$$

**AN:**  $I_{cr} = 0,0025$

↳ Calcul de l'énergie spécifique  $E_0$ :

$$E_0 = H + P + \alpha \cdot \frac{V_d^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (VIII.07)$$

**AN:**  $E_0 = 0,19 + 0,5 + 1 * (1,03)^2 / (2 * 9,81)$

$E_0 = 0,74m$

Le profil du seuil déversant est de type Creager, l'avantage de ce contour est qu'en chaque point de son parement aval la pression égal a la pression atmosphérique, tout profil situé au dessus entraînera des dépressions donc des risques de décollement.

Les coordonnées du profil du déversoir sont déterminées à l'aide de l'équation suivante:

$$y = \frac{(x^{1,85})}{(2H^{0,85})} \dots\dots\dots (VIII.08)$$

Avec H: la charge sur le déversoir.

**Tableau VIII.02:** Les coordonnées du profil de déversoir.

| X (m) | Y(m) profil Greger | X (m) | Y(m) profil Greger |
|-------|--------------------|-------|--------------------|
| 0     | 0                  | 0.8   | 1.36               |
| 0.1   | 0.03               | 0.9   | 1.69               |
| 0.2   | 0.10               | 1     | 2.05               |
| 0.3   | 0.22               | 1.1   | 2.45               |
| 0.4   | 0.38               | 1.2   | 2.87               |
| 0.5   | 0.57               | 1.3   | 3.33               |
| 0.6   | 0.80               | 1.4   | 3.82               |
| 0.7   | 1.06               | 1.5   | 4.34               |

:



Figure VIII.1 : Profil de Creger

↳ Hauteur du mur du déversoir :

La revanche R est égale à :

$$H_d = H + P + \alpha \cdot \frac{V_d^2}{2g} + R \dots \dots \dots (VIII.09)$$

**AN:**  $H_d = 0,19 + 0,5 + 1 \cdot ((1,03)^2 / (2 \cdot 9,81)) + 0,65$

**$H_d = 1,39 \text{ m.}$**

### VIII.2.2.3 Chenal d'écoulement :

Le chenal fait suite directement au déversoir sa longueur est déterminée en fonction de la topographie  $L_{ch} = 7,5 \text{ m}$  de pente  $i_{che} = 0,72 \%$  et à largeur de  $1 \text{ m}$

Le chenal est formé de pente faible pour assurer un écoulement fluvial ; à la fin du chenal la hauteur d'eau est égale à la hauteur critique.

↳ Calcul de la profondeur critique :

On donne au coursier une pente assez suffisante (supérieure à la pente critique) pour provoquer un écoulement torrentiel. Contrairement, l'écoulement dans le chenal est fluvial du fait de la pente souvent inférieure à la pente critique. La phase de passage d'un régime fluvial au torrentiel ou vis versa est appelée régime critique ou la surface libre occupe le niveau critique, on considère qu'elle est atteinte au point de changement de section.

On calcul la profondeur critique par la formule :

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \dots \dots \dots (VIII.10)$$

Avec  $q$  : débit spécifique  $q = \frac{Q}{b}$  (m<sup>2</sup>/s);

$b$  : largeur du chenal  $b=1\text{m}$ .

**AN:**  $h_{cr}=0,37\text{m}.$

↳ *Calcul de la profondeur normale :*

La profondeur normale  $h_n$  (profondeur qui apparaît pour le débit  $Q$  et la pente  $I$  du chenal si l'écoulement était uniforme) se déduit de la formule de Manning Strickler.

$$Q = S.C.\sqrt{R.I} \dots\dots\dots (\text{VIII.11})$$

Avec  $S$  : section du chenal  $S=b \cdot h_n$ ;

$I$  : pente du chenal  $I=0,72\%$ ;

$C_n$  : coefficient de Chézy

$$C_n = R^{1/6} / n \dots\dots\dots (\text{VIII.12})$$

Avec  $R$  : rayon hydraulique

$$R = \frac{S}{P} = \frac{b.h_n}{2.h_n + b} \dots\dots\dots (\text{VIII.13})$$

En substituant chaque terme par sa valeur, on aura l'équation suivante qu'on résout avec la méthode itérative.

$$Q = \frac{1}{n} . I^{1/2} . (b.h_n)^{5/2} . (2.h_n + b)^{-3/2} \dots\dots\dots (\text{VIII.14})$$

**AN:**  $h_n=0,53\text{m}.$

#### ❖ Conclusion :

$h_n > h_c$  Alors l'écoulement est fluvial.

La vitesse  $V$  au niveau de la section de contrôle est:

$$V = Q / S$$

A la section de contrôle la hauteur d'eau est égale à la hauteur critique donc :

**AN:**  $V=1,34\text{m/s}.$

↳ *Hauteur du mur du Chenal d'écoulement :*

La revanche  $R$  est égale à:

$$R = 0,6 + 0,05 \cdot V \cdot (Y)^{1/3}$$

**AN:**  $R=0,65\text{m}.$

La hauteur du mur  $H_m$  du chenal sera:

$$H_m = d + H_c + R$$

Avec  $d$  : la différence entre la cote du font amont du déversoir et aval.

$$\underline{\text{AN:}} \quad H_m = 0.5 + 0.37 + 0.65$$

$$H_m = 0.53 \text{ m}$$

On adopte une valeur de :  $H_m = 1.52 \text{ m.}$

#### VIII.2.2.4 Le convergent :

A l'extrémité du chenal là où s'amorce le coursier on projette un convergent pour marquer le passage en régime torrentiel.

La longueur du convergent est déterminée par la formule suivante:

$$L = 2.50 * (l_1 - l_2) \dots \dots \dots (VIII.15)$$

Avec  $l_1$  : est la largeur au plafond du bief amont  $l_1 = b_1 = 1 \text{ m}$ ;

$l_2$  : est la largeur au plafond de la section de contrôle  $l_2 = b_2 = 0.5 \text{ m}$ .

$$\underline{\text{AN:}} \quad L = 1.25 \text{ m.}$$

- *Recommandations de Sevchenko pour le dimensionnement du convergent :*

$$0.39 \leq \frac{b_r}{B_r} \leq 0.87 \quad \text{Condition à respecter:}$$

$$\text{Avec} \quad \theta = \arctan \frac{B_c - b_c}{2L_{con}}$$

$$\underline{\text{AN:}} \quad \theta = \arctan \frac{1 - 0.5}{2 * 2.5}$$

$$\theta = 11.31^\circ$$

Pour assurer de bonnes conditions d'écoulement et de construction, on lui donne une section rectangulaire d'une largeur de même à la fin de convergeant  $b_c = 0.5 \text{ m}$ .

#### VIII.2.2.5 Le coursier :

En général, le coursier commence par un convergeant amenant à la section de contrôle (section où atteinte la hauteur critique), à partir de laquelle la pente augmente.

↪ *Largeur du coursier :*

Elle est donnée par :

$$B = Q^{0.4} \text{ (m)} \dots \dots \dots (VIII.16)$$

$$\underline{\text{AN:}} \quad B = 0.71^{0.4}$$

$$B = 0.77 \text{ m}$$

On adopte une valeur de  $B = 0,5 \text{ m.}$

↳ La profondeur critique :

On fait le même calcul que celui du chenal d'écoulement

Profondeur critique :

$$\frac{Q^2 L}{g S^3} = 1 \dots\dots\dots (\text{VIII.17})$$

Pour un canal rectangulaire

$$h_{cr} = 3 \sqrt{\frac{q^2}{g}} \dots\dots\dots (\text{VIII.18})$$

**AN:**  $h_{cr} = 0,37 \text{ m.}$

↳ La pente critique :

La pente d'un canal uniforme, pour un débit donné, est la pente que devrait prendre ce canal, pour que la profondeur normale du courant considéré, soit égale à la profondeur critique.

Pour calculer  $I_{cr}$  on associera donc la relation du régime uniforme

$$Q = S_c C \sqrt{R_c I_{cr}} \dots\dots\dots (\text{VIII.19})$$

Avec celle du régime critique.

$$\frac{Q^2 b}{g S_c^3} = 1 \dots\dots\dots (\text{VIII.20})$$

L'élimination de Q entre les deux expressions pour une section rectangulaire ( $S = h * b$ ) conduit à :

$$I_{cr} = \frac{g h_c}{C^2 R_c} \dots\dots\dots (\text{VIII.21})$$

Avec  $I_{cr}$  : pente critique;

$$S_c : \text{section critique; } S_c = b * h_{cr} \dots\dots\dots (\text{VIII.22})$$

$$R_c : \text{rayon critique; } R_c = S_c / P_c \dots\dots\dots (\text{VIII.23})$$

$$P_c : \text{périmètre critique; } P_c = 2 * h_{cr} + b \dots\dots\dots (\text{VIII.24})$$

$$C_c : \text{coefficient de Chézy; } C_c = R_c^{1/6} / n \dots\dots\dots (\text{VIII.25})$$

$$n : \text{coefficient de rugosité } n = 0,014 \text{ (revêtement en béton).}$$

**AN:**  $S_{cr} = B * h_{cr} = 0,5 * 0,37 = 0,19 \text{ m}^2$

$$Pc_r = B + 2 * h_{cr} = 0,5 + 0,74 = 1,24 \text{ m}$$

$$Rc_r = \frac{Scr}{Pcr} = \frac{0,19}{1,24} = 0,15 \text{ m}$$

$$C_{cr} = \frac{1}{0,014} * 0,15^{1/6} = 52,07$$

$$I_{cr} = \left( \frac{9,81 * 0,37}{52,07^2 * 0,15} \right) \cdot 100\%$$

$$I_{cr} = 0,17 \%$$

$$I_{coursier} < I_{cr}$$

⇒ Calcul de la ligne d'eau dans le coursier :

Le calcul de la ligne d'eau est effectué par moyen informatique ; avec logiciel CANAL21.

**Tableau VIII.03:** Calcul de la ligne d'eau

| Q (m³/s) | Strickler | I (m/m) | Y <sub>N</sub> | Y <sub>C</sub> | Régime | L <sub>bief</sub> (m) |
|----------|-----------|---------|----------------|----------------|--------|-----------------------|
| 0,71     | 71        | 0,17    | 0,013          | 0,37           | NT     | 23,3                  |

**Tableau VIII.04:** Ligne d'eau à pas d'espace de 5 m

| Section | Abscisse | Y (m) | Froude | H <sub>s</sub> (m) | J (m/m) |
|---------|----------|-------|--------|--------------------|---------|
| Amont   | 00       | 0,37  | 1,007  | 0,558              | 0,0058  |
| 1       | 2,8      | 0,182 | 2,921  | 0,958              | 0,0443  |
| 2       | 10,25    | 0,132 | 4,715  | 1,602              | 0,1161  |
| 3       | 13,05    | 0,127 | 5,03   | 1,729              | 0,1325  |
| 4       | 17,71    | 0,122 | 5,345  | 1,89               | 0,15    |
| 5       | 20,5     | 0,12  | 5,455  | 1,905              | 0,1564  |
| Aval    | 23,3     | 0,119 | 5,53   | 1,937              | 0,1608  |

D'après le tableau la valeur qu'on doit adopter est :

$$y_1 = 0,119 \text{ m}$$

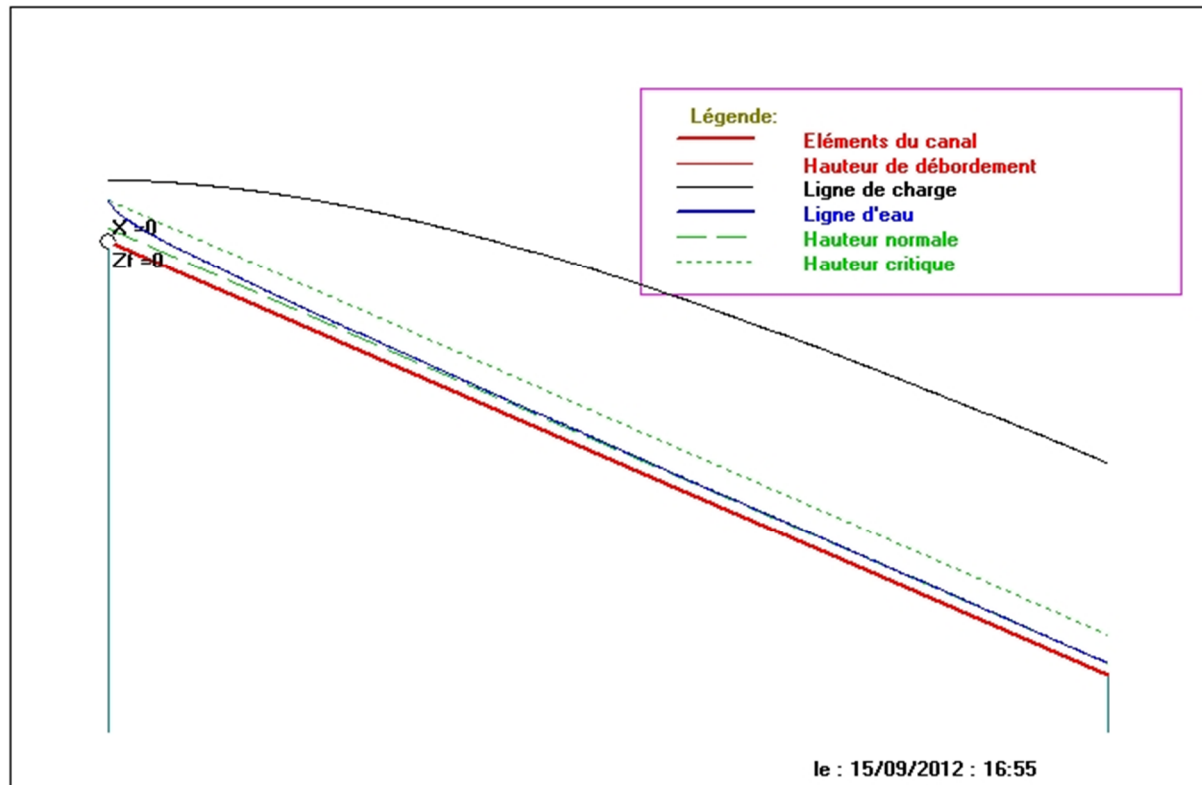


Figure VIII.2. La ligne d'eau

On a :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g h_c}} \dots\dots\dots (VIII.26)$$

Avec  $F_r$  : nombre de Froude;

$V$  : vitesse de sortie du coursier tel que  $V = \frac{Q}{S}$ .

AN:

$$V = \frac{0,71}{0,5 * 0,119} = 11,93 \text{ m/s}$$

#### VIII.2.2.6 Dissipateur d'énergie :

L'énergie obtenue à la fin du coursier et qui est due à la grande vitesse de l'écoulement doit être dissipée en aval afin de protéger les berges et même le corps du barrage contre l'érosion régressive qui peut apparaître.

Le principe de la dissipation d'énergie du flot évacué se fait par un ralentissement brutal de la vitesse de l'écoulement et donc par un changement du régime d'écoulement du torrentiel

au fluvial. Pour la dissipation de l'énergie on a opté pour un bassin de dissipation à ressaut, dont la forme et le type dépendent de l'énergie de l'écoulement torrentiel.

Les tests réalisés par (USBR) « The Bureau Of Réclamation » montrent que le ressaut dépend directement du nombre de Froude et on a :

$1,00 \leq F_r \leq 1,70$  Ressaut ondulé;

$1,70 < F_r \leq 2,50$  Ressaut faible de petites apparitions en surface;

$2,50 < F_r \leq 4,50$  Ressaut oscillant;

$4,50 < F_r \leq 9,00$  Ressaut stable (Stationnaire);

$F_r > 09$  Ressaut fort (Ecoulement très turbulent).

Froude est supérieur à 4,5; cela veut dire que le ressaut va se produire nettement. La mise en place des blocs, de déflecteur permettent de raccourcir le bassin et évite le déplacement du ressaut à l'aval. La vitesse d'entrée inférieure 15 m/s, alors ai appelé à utiliser le bassin de *type II*.

Le nombre de Froude indique nettement qu'il y'a formation de ressaut dont il faut déterminer les profondeurs conjuguées et la longueur du bassin pour s'en servir au dimensionnement des blocs chicanes (Annexe IV).

#### ❖ Dimensionnement du bassin : [12]

De l'abaque de l'Annexe IV On a :

$$\frac{y_2}{y_1} = 7,33$$

Avec  $y_1$  : tirant d'eau avant le ressaut en (m);

$y_2$  : tirant d'eau après le ressaut en (m).

**AN:**  $y_2 = 7,33 * 0,119$

$$y_2 = 0,87 \text{ m}$$

⇒ Longueur du bassin :

De l'abaque de l'Annexe "B" on a :

$$\frac{L_{\text{bas}}}{y_2} = 02,60$$

**AN:**  $L_{\text{bas}} = 02,60 \times 0,87$

$$L_{\text{bas}} = 2,3 \text{ m.}$$

On prend  $L_{\text{bas}} = 2,3 \text{ m.}$

⇒

↳ *Dimensionnement des blocs de chute :*

$$h_1 = y_1 = e_1 = 0,119 \text{ m}$$

Avec  $h_1$  : hauteur des blocs de chute à l'entrée;

$e_1$  : l'espacement entre les blocs de chute;

Le nombre des blocs de chutes est *8 blocs*.

D'après l'abaque:

$$\frac{h_2}{y_1} = 1,65 \Rightarrow h_2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\frac{h_4}{y_1} = 1,4 \Rightarrow h_4 = 0,17 \text{ m}$$

Avec  $h_2$ : hauteur du bloc chicane;

$h_1$ : hauteur du seuil terminal.

↳ *Dimensionnement des blocs chicane:*

$$l = 0,20 \cdot h_2 = 0,04 \text{ m.}$$

$$L = 0,75 \cdot h_2 = 0,15 \text{ m.}$$

Avec  $l$  : largeur du seuil;

$L$  : espacement entre les blocs.

$$a = 0,80 \cdot y_2 = 0,7 \text{ m.}$$

Avec  $a$  : distance entre les blocs de chutes et les blocs chicanes.

Le nombre des blocs chicanes est *6 blocs*.

### VIII.2.2.7 Canal de restitution :

Le canal de fuite de section trapézoïdale avec un talus  $1/1$  et une pente  $I_c = 00,60 \%$  a pour rôle de conduire l'eau après sa dissipation au cours d'eau naturel.

↳ *La hauteur critique :*

$$h_{cr} = \left( 1 - \frac{\sigma_{cr}}{3} + 0.015 \cdot \sigma_{cr}^2 \right) \cdot K \dots\dots\dots (VIII.27)$$

Avec  $K = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g b^2}} \dots\dots\dots (VIII.28)$

$$\sigma = \frac{K \cdot m}{b} \quad (m=1) \dots\dots\dots (VIII.29)$$

$$\underline{\text{AN:}} \quad K = \sqrt[3]{\frac{0,71^2}{9,81 \cdot 1^2}} = 0,37$$

$$\sigma = \frac{0,37 * 1}{1} = 0,37$$

$$h_{cr} = \left( 1 - \frac{0,37}{3} + 0,015 * 0,37^2 \right) * 0,37$$

$$h_{cr} = 0,33 \text{ m.}$$

↳ *Pente critique :*

$$I_{cr} = \frac{Q^2}{S_{cr}^2 \cdot C_{cr}^2 \cdot R_{cr}} \dots\dots\dots (VIII.30)$$

Avec  $S_{cr} = m * h_{cr}^2 + b * h_c$  AN:  $S_{cr} = 0,51 \text{ m}^2$

$P_{cr} = b + h_{cr} \cdot \sqrt{1 + m^2}$  AN:  $P_{cr} = 1,52 \text{ m}$

$R_{cr} = S_{cr} / R_{cr}$  AN:  $R_{cr} = 0,34 \text{ m}$

$C_{cr} = \frac{1}{n} \cdot R_{cr}^{1/6}$  AN:  $C_{cr} = 59,67$

$$I_{cr} = \frac{0,71^2}{0,51^2 * 59,67^2 * 0,34} * 100\%$$

$$I_{cr} = 0,16\%.$$

↳ *La profondeur normale :*

La profondeur normale du canal est tirée directement des calculs par le «CANALP» et on a :

$$h_n = 0,53 \text{ m.}$$

↳ *La vitesse de l'écoulement :*

$$V = Q/S = C \sqrt{RI} \dots\dots\dots (VIII.31)$$

AN:  $V = 59,67 * \sqrt{0,34 * 0,0016}$

$$V = 1,39 \text{ m/s.}$$

$V < V_{adm} (01,80 \text{ à } 02,20) \text{ m/s}$ ; donc il faut pas prévoir une protection aval en enrochement.

### VIII.2.3 Conception de l'évacuateur de crues :

Après le dimensionnement hydraulique des éléments de l'évacuateur de crues, et le calcul de la ligne d'eau ; on doit vérifier l'apparitions des phénomènes hydrauliques pour prévoir la hauteur finale des bajoyers.

**VIII.2.3.1 Hauteur des murs bajoyers :**

↳ *Hauteur des murs à l'entrée du déversoir :*

On a :  $h_m = h_e + r$  ..... (VIII.32)

Avec  $h_m$  : hauteur des murs bajoyers en (m);

$h_e$  : lame d'eau sur le déversoir (m);

$r$  : revanche de sécurité (m) donnée par :

$r = 0,61 + 0,14 V^{1/3}$  ..... (VIII.33)

$V$  : la vitesse tel que :

$V = Q / (b \cdot h)$  ..... (VIII.34)

**A.N :**  $V = 0,71 / (1 \cdot 0,19) = 3,74 \text{ m/s}$

$r = 0,83 \text{ L m.}$

$h_m = 0,19 + 0,83$

**$h_m = 1,02 \text{ m.}$**

↳ *Hauteur des murs du chenal :*

Sur le long du chenal d'écoulement, la hauteur des bajoyers doit atteindre la crête de la retenue.

↳ *Hauteur des murs au début du coursier :*

On a  $h_m = h_e + r$

$r = 0,61 + 0,14 \cdot V^{1/3}$

**A.N :**  $V = 0,71 / (0,5 \cdot 0,41) = 3,46 \text{ m/s}$

$r = 0,19 + 0,14 \cdot 3,46^{1/3} = 0,40 \text{ m}$

$h_m = 0,41 + 0,40$

**$h_m = 0,81 \text{ m.}$**

↳ *Hauteur des murs à la fin du coursier :*

**A.N :**  $h_m = 0,19 + 0,41$

**$h_m = 0,60 \text{ m.}$**

↳ Hauteur des murs dans le bassin de dissipation :

$$r = 0,61 + 0,14 * V^{1/3} \quad 3$$

**A.N :**  $V = 0,71 / (2,3 * 0,82) = 0,37 \text{ m/s}$

$$r = 0,61 + 0,14 * 0,37^{1/3} = 0,71 \text{ m}$$

$$h_m = 0,6 + 0,71$$

$$\boxed{h_m = 1,31 \text{ m.}}$$

• **Remarque :**

Les murs bajoyers sont construits en béton armé d'une épaisseur de  $00,20 \text{ m}$  le long de tous les éléments de l'évacuateur de crues. Ces murs assurent l'acheminement régulier des eaux sans débordement, vers l'aval et même servent à maintenir les terres tout autour du coursier et du déversoir.

### VIII.2.3.2 Vérification de l'apparition des phénomènes hydrauliques dans le coursier :

❖ **Vérification de l'apparition des vagues roulantes :**

Les vagues roulantes apparaissent si les deux conditions sont vérifiées :

$$\frac{b}{h} \geq (10 \div 12) \dots\dots\dots \text{(VIII.35)}$$

$$Fr^2 \geq 40 \dots\dots\dots \text{(VIII.36)}$$

Avec  $h$  : profondeur d'eau minimale dans le coursier.

**A.N :**  $\frac{b}{h} = 1,7 \geq (10 \div 12)$

$$Fr^2 = 30,58 < 40$$

Donc d l'apparition des phénomènes hydrauliques dans le coursier n'existés pas.

### VIII.3 Dimensionnement de l'ouvrage de vidange :

#### VIII.3.1 Calcul du débit de vidange :

Pendant la période d'évacuation par la vidange, le volume d'eau évacué est composé du volume utile de la retenue est du volume entrant à la retenue durant cette période.

Le débit évacué par la vidange de fond sera :

$$Q_{vf} = \frac{V_u}{T} + Q_r \dots\dots\dots \text{(VIII.37)}$$

Avec  $V_u$  : volume utile en ( $\text{m}^3$ );

T : temps de vidange (jours).

$Q_r$  : débit entrant dans la retenue pendant la vidange (Pris égal à débit moyen annuel).

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad Q_{vf} = \frac{15523}{2 \cdot 86400} + \frac{0,048 \cdot 10^6}{31,53 \cdot 10^6}$$

$$Q_{vf} = 0,091 \text{ m}^3/\text{s}$$

### VIII.3.2 Calcul de la section de la conduite de vidange de fond et son diamètre :

$$Q_{vf} = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2g \cdot H} \dots\dots\dots (\text{VIII.38})$$

$$\text{D'où} \quad S = \frac{Q_{vf}}{\mu \cdot \sqrt{2g \cdot H}}$$

Avec  $Q_{vf}$  : débit de la vidange de fond ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

H : charge disponible entre le niveau normal de la retenue et l'aval en (m);

$\mu$  : coefficient de débit  $\mu \in (0,8 \text{ -- } 0,85)$ .

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad S = \frac{0,091}{0,62 \cdot \sqrt{2g \cdot 5,1}} = 0,015 \text{ m}^2$$

Le diamètre de la conduite sera :

$$D_{vf} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,015}{\pi}} = 0,138 \text{ m}$$

On prend un diamètre normalisé :

$$\boxed{D_{vf} = 200 \text{ mm.}}$$

#### Correction du coefficient de débit $\mu$ :

$$\text{On a} \quad \mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_i}} \dots\dots\dots (\text{VIII.39})$$

Avec  $\sum \xi_i$  : Somme des coefficients des pertes de charges (linéaires et singulières).

☞ Coefficients des pertes de charge linéaires:

$$\xi_{lin} = \frac{\lambda \cdot l}{D} \dots\dots\dots (\text{VIII.40})$$

$$\lambda = \frac{125 \cdot n^2}{D^{1/3}} \dots\dots\dots (\text{VIII.41})$$

Avec  $\lambda$  : coefficient de perte de charge;

n : coefficient de rugosité ( $n = 0,014 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ );

D : diamètre de la conduite ( $D = 200 \text{ mm}$ );

L : longueur de la conduite de vidange en ( $l = 40 \text{ m}$ ).

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad \lambda = 0,042$$

$$\sum \xi_l = 8,4 \text{ m}$$

➤ *Coefficient des pertes de charge singulières:*

$$\xi_{\text{entrée}} = 0,50$$

$$\xi_{\text{sortie}} = 1,0$$

$$\xi_{\text{vannes}} = 0,10$$

$$\xi_{\text{grille}} = 0,25$$

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad \sum \xi_s = 1,85 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + (8,4 + 1,85)}} = 0,30$$

$$S = \frac{0,091}{0,21 * \sqrt{2g * 5,1}} = 0,043 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{vf}} = \sqrt{\frac{4 * 0,043}{\pi}} = 0,234 \text{ m}$$

On prend un diamètre normalisé :

$$\boxed{D_{\text{vf}} = 300 \text{ mm.}}$$

Le débit évacué aura une vitesse de sortie des vannes de :

$$V_s = \frac{Q_{\text{vf}}}{S_{\text{con}}} \dots\dots\dots (\text{VIII.42})$$

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad V_s = \frac{0,091}{0,071} = 1,28 \text{ m/s}$$

#### ❖ Conclusion :

La vidange de fond a un diamètre de  $300 \text{ mm}$ .

**VIII.4 Dimensionnement de la prise d'eau :**

Le dimensionnement de la conduite de prise d'eau consiste de connaître de la demande aval (consommation maximale).

D'après le Tableau III.21, le volume maximum demandé est celui du mois de juillet.

$$V_{\max} = 5300 \text{ m}^3.$$

$$\begin{aligned} \underline{\text{A.N.}} : \quad Q_{\max} &= \frac{V_{\max}}{T} \dots\dots\dots (\text{VIII.43}) \\ Q_{\max} &= \frac{5300}{31 * 57600} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Avec T : temps de prise (T = 31 jours).

$$Q_{\max} = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2g \cdot H}$$

$\mu$  : coefficient de débit  $\mu = 0,25$

H : charge correspondante à la prise d'eau la plus basse et l'aval.

A.N :

$$S = \frac{0,003}{0,25 * \sqrt{2g * 4,5}} = 0,001 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,001}{\pi}} = 0,036 \text{ m}$$

On prend un diamètre normalisé :

$$\boxed{D = 50 \text{ mm}}$$

❖ **Correction du coefficient de débit  $\mu$  :**

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_i}}$$

Les pertes de charges singulières seront estimées à 15% des pertes de charges linéaires.

$$\sum \xi = 1,15 \cdot \frac{\lambda \cdot l}{D} \dots\dots\dots (\text{VIII.44})$$

$$\underline{\text{A.N.}} : \quad \sum \xi = 1,15 * \frac{0,067 * 40}{0,05} = 61,64 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + 61,64}} = 0,13$$

$$S = \frac{0,003}{0,13 * \sqrt{2g * 4,5}} = 0,002 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,002}{\pi}} = 0,06 \text{ m}$$

On prend un diamètre normalisé :

$$\boxed{D = 100 \text{ mm}}$$

☞ *Calcul de la vitesse d'eau dans la conduite de prise d'eau :*

$$V_{\text{con}} = \frac{Q_{\text{max}}}{S} = \frac{0,003}{0,008}$$

$$V_{\text{con}} = 0,375 \text{ m/s}$$

#### ❖ Conclusion :

La conduite de prise d'eau a un diamètre de 100 mm.

Le prélèvement des eaux se fait à un seul niveau de prise à une cote élevée par rapport à celle du volume mort (233m *NGA*). Les organes de commande seront regroupés avec ceux de la vidange (300 mm) au pied aval de la digue.

## **Conclusion générale :**

En conclusion on peut dire que cette étude nous a permis de toucher presque à tout ce qui concerne l'étude de faisabilité et d'exécution d'un barrage et ces ouvrages annexes.

On peut aussi citer quelques impacts du présent barrage sur son environnement voir :

- La région va bénéficier de l'eau pour l'irrigation qui aidera les gens à faire de l'agriculture.
- La sur exploitation de la nappe sera limité en présence de l'eau de surface.
- Vis-à-vis la grandeur de la surface du lac artificiel proportionnellement à la surface ce dernier va créer un microclimat optimal pour cultiver les maraîchères.
- A l'aval le rechargement de la nappe diminuera en stockant de l'eau dans le barrage.
- Par conséquent il y a des espèces animales et végétales qui vont subir ce changement, ce dernier va déstabiliser leurs modes de vie.
- Les riverains qui se serviraient de l'eau de cet oued à l'aval vont perdre ce trésor vital.

En fin on souhaite que ce travail représente vraiment les efforts qu'on a mis en disposition pour l'effectuer.

# **ANNEXE I**

**Tableau1:** Récapitulatif des résultats des puits

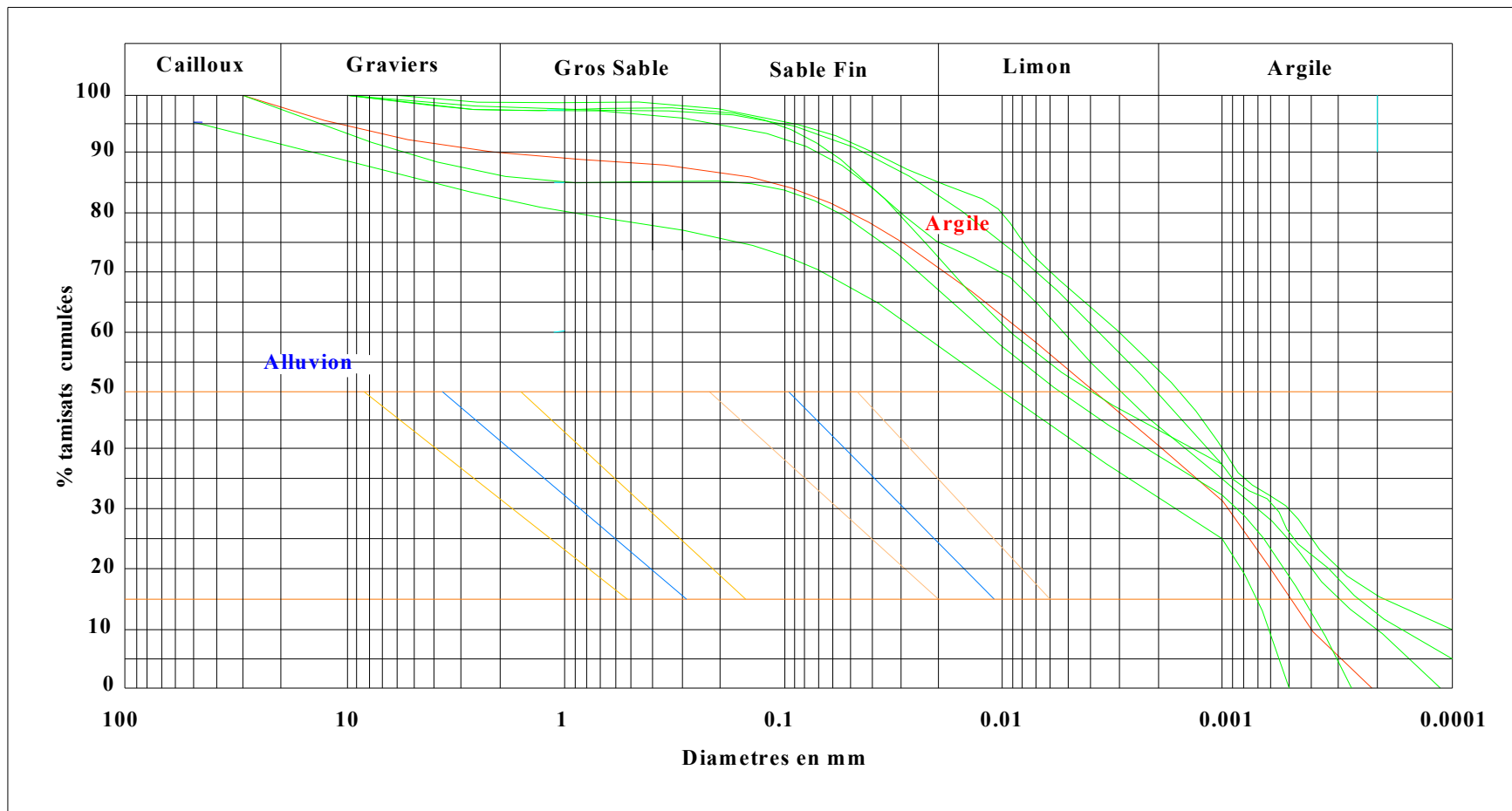
| SONDAGE/PUITS               |           | K1                 | K2    | K4    | K5    | K6    |
|-----------------------------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| PROFONDEUR (m)              |           | 1,7                | 2,5   | 1,5   | 2     | 2     |
| TENEUR/ EAU NAURELLE (Wn) % |           | 19,62              | 11,6  | 15,15 | 13,78 | 16,45 |
| GRANULARITE (%TAMISAT)      | 2 mm      | 99                 | 98    | 96    | 97    | 65    |
|                             | 80 µ      | 96                 | 93    | 94    | 97    | 50    |
|                             | 20 µ      | 64                 | 65    | 63    | 65    | 26    |
|                             | 2 µ       | 44                 | 41    | 45    | 43    | 16    |
| LIMITE D'ATTERBERG          | WL %      | 51,2               | 46    | 40,8  | 45,2  | 48    |
|                             | Wp %      | 27,1               | 24,6  | 20,6  | 25    | 24,5  |
|                             | IP        | 24,1               | 21,14 | 20,2  | 20,2  | 23,5  |
| COEF/PERMEABLITE            | K(cm/s)   | 1.10 <sup>-8</sup> |       |       |       |       |
| CISAILLEMENT RECTILIGNE     | Cuu(bars) | 0,61               |       | 0,61  |       |       |
|                             | øuu°      | 8                  |       | 8     |       |       |
| ANALYSES CHIMIQUES          | Insoluble | 47,8               | 45,17 | 54,01 | 55,9  | 56,3  |
|                             | CaCo3     | 42,75              | 46,37 | 36,23 | 32,6  | 31,88 |
|                             | So4       |                    |       |       |       |       |
|                             | 2H2O      | Neant              | Neant | Neant | Neant | Neant |
|                             | So4       | Neant              | Neant | Neant | Neant | Neant |
| MARIERES ORGANIQUES         | M,O %     | 1,72               | 0     |       |       |       |

**Tableau 2 : Récapitulatif des résultats des puits (suite).**

| SONDAGE/PUITS               |           | K7         | K8    | K9         | K10   |
|-----------------------------|-----------|------------|-------|------------|-------|
| PROFONDEUR (m)              |           | 2,5        | 2,5   | 2,7        | 2,5   |
| TENEUR/ EAU NAURELLE (Wn) % |           | 20,6       | 23,69 |            | 20,7  |
| GRANULARITE (%TAMISAT)      | 2 mm      | 98         | 99    |            | 87    |
|                             | 80 µ      | 95         | 95    |            | 83    |
|                             | 20 µ      | 80         | 70    |            | 64    |
|                             | 2 µ       | 50         | 45    |            | 41    |
| LIMITE D'ATTERBERG          | WL %      | 56         | 59,2  | 43         | 57,8  |
|                             | Wp %      | 26,4       | 31,1  | 23,2       | 27,9  |
|                             | IP        | 29,6       | 28,1  | 19,8       | 29,9  |
| COEF/PERMEABILITE           | K(cm/s)   | 1,6.10E-8  |       |            |       |
| CISAILLEMENT RECTILIGNE     | Cuu(bars) | 0,13       |       |            |       |
|                             | øuu°      | 16         |       | 8          |       |
| ANALYSES CHIMIQUES          | Insoluble | 47,72      | 48,66 | 53,06      | 44,86 |
|                             | CaCo3     | 36,95      | 39,85 | 37,68      | 44,92 |
|                             | So4       |            |       |            |       |
|                             | 2H2O      | 4,72       | Neant | 0,35       | Neant |
|                             | So4       | 26,88,10^3 | Neant | 1,952,10^3 | Neant |
| MARIERES ORGANIQUES         | M,O %     |            |       |            | 0,66  |

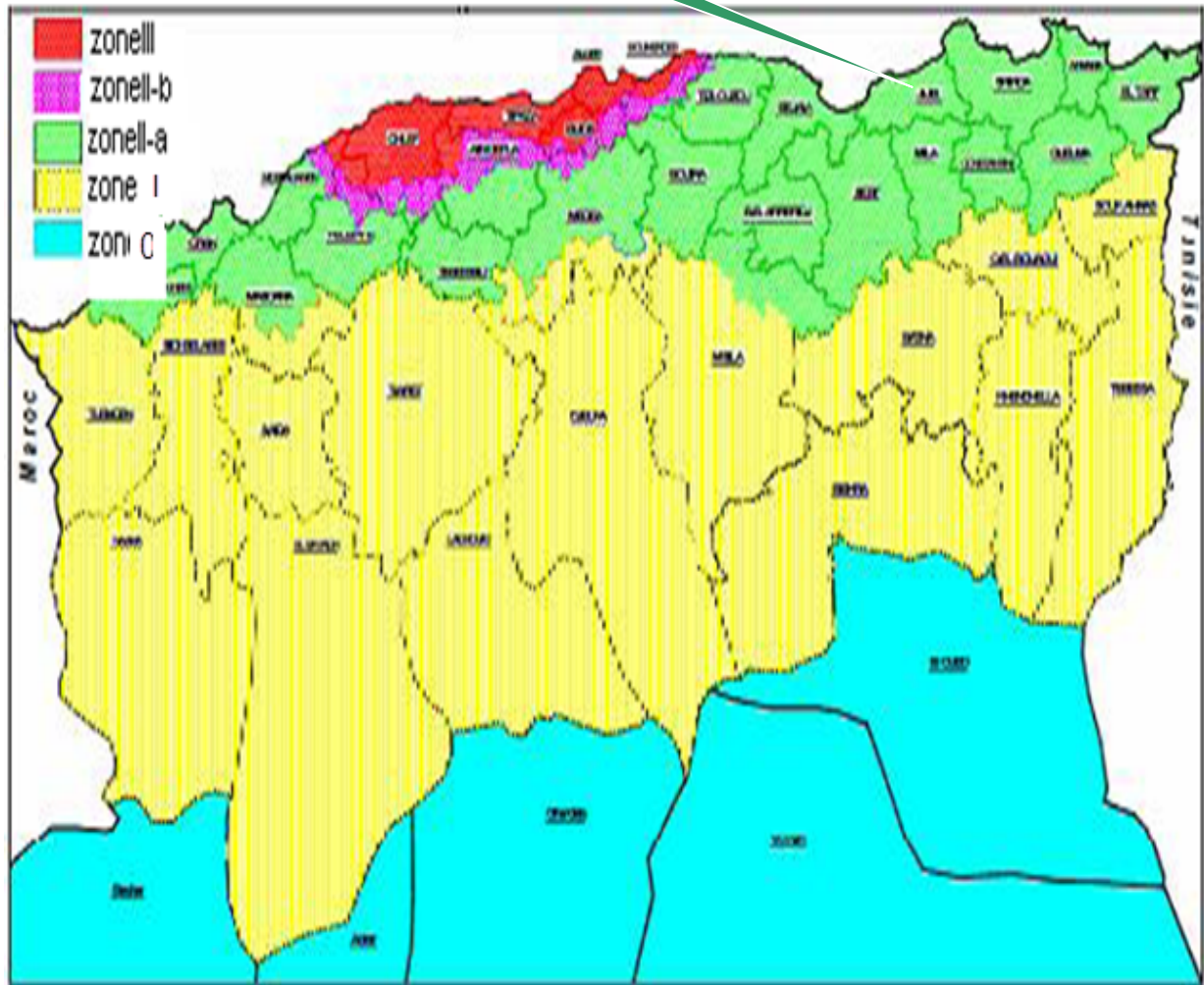
**Tableau 3 : Récapitulatif des résultats des sondages**

| SONDAGE/PUITS                            |                    | S1       | S2                    | S2                    | S3        |
|------------------------------------------|--------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| PROFONDEUR (m)                           |                    | 5,3-5,70 | 9,0-9,75              | 11,0-11,50            | 3,10-3,60 |
| TENEUR/ EAU NAURELLE (W <sub>n</sub> ) % |                    | 23,43    |                       | 26,27                 | 19,12     |
| GRANULARITE (%TAMISAT)                   | 2 mm               | 96       |                       | 98                    | 96        |
|                                          | 80 μ               | 93       |                       | 94                    | 93        |
|                                          | 20 μ               | 75       |                       | 78                    | 79        |
|                                          | 2 μ                | 44       |                       | 50                    | 50        |
| LIMITE D'ATTERBERG                       | WL %               | 68       |                       | 64,5                  | 62        |
|                                          | Wp %               | 35,2     |                       | 31,3                  | 30        |
|                                          | IP                 | 32,8     |                       | 33,2                  | 32        |
| COMPRESSIBILITE A L'OEDOMETRE            | Pc(bars)           | 2,99     | 3,14                  |                       |           |
|                                          | Cc                 | 0,243    | 0,128                 |                       |           |
|                                          | Cg                 | 0,057    | 0,055                 |                       |           |
| COEF/PERMEABLITE                         | K(cm/s)            |          | 1,03.10 <sup>-8</sup> | 4,73.10 <sup>-9</sup> |           |
| CISAILLEMENT RECTILIGNE                  | Cuu(bars)          | 0,87     | 0,38                  |                       |           |
|                                          | øuu°               | 16       | 15                    |                       |           |
| ANALYSES CHIMIQUES                       | Insoluble          | 50,72    | 48,5                  | 54,57                 |           |
|                                          | CaCo3              | 35,03    | 38,23                 | 32,11                 |           |
|                                          | So4                |          |                       |                       |           |
|                                          | 2H2O               | Neant    | Neant                 | Neant                 |           |
|                                          | So4                | Neant    | Neant                 | Neant                 |           |
| MARIERES ORGANIQUES                      | M <sub>2</sub> O % |          | 0,84                  |                       |           |



**Fuseau granulometrique des materiaux**

Zone d'étude



**Figure1:** Carte de micro zonage sismique du territoire national-RPA 99 (Version 2003)



# **ANNEXE II**

**Tableau. II.1 : Ajustement par la loi normale**

| Valeurs de départ | Valeurs classées | Ordre de classement | Fréquence expérimentale | Variable réduite | Valeur expérimentale | Valeur théorique | Borne inférieure | Borne supérieure |
|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 51.9              | 50.3             | 1                   | 0.0313                  | 0.031            | 50.3                 | 75.620           | 69.676           | 81.605           |
| 69.2              | 51.9             | 2                   | 0.0938                  | 0.094            | 51.9                 | 77.234           | 71.321           | 83.274           |
| 59.5              | 54.7             | 3                   | 0.1563                  | 0.156            | 54.7                 | 78.849           | 72.954           | 84.953           |
| 59.2              | 56.2             | 4                   | 0.2188                  | 0.219            | 56.2                 | 80.463           | 74.576           | 86.644           |
| 66.4              | 59.2             | 5                   | 0.2813                  | 0.281            | 59.2                 | 82.078           | 76.187           | 88.347           |
| 50.3              | 59.5             | 6                   | 0.3438                  | 0.344            | 59.5                 | 83.692           | 77.786           | 90.060           |
| 72.6              | 66.4             | 7                   | 0.4063                  | 0.406            | 66.4                 | 85.307           | 79.375           | 91.784           |
| 88.1              | 69               | 8                   | 0.4688                  | 0.469            | 69                   | 86.921           | 80.954           | 93.518           |
| 101.1             | 69.2             | 9                   | 0.5313                  | 0.531            | 69.2                 | 88.536           | 82.522           | 95.262           |
| 73.8              | 72.6             | 10                  | 0.5938                  | 0.594            | 72.6                 | 90.151           | 84.081           | 97.016           |
| 77.7              | 73.8             | 11                  | 0.6563                  | 0.656            | 73.8                 | 91.765           | 85.631           | 98.779           |
| 154.2             | 77.7             | 12                  | 0.7188                  | 0.719            | 77.7                 | 93.380           | 87.173           | 100.551          |
| 69                | 88.1             | 13                  | 0.7813                  | 0.781            | 88.1                 | 94.994           | 88.706           | 102.331          |
| 93.1              | 93.1             | 14                  | 0.8438                  | 0.844            | 93.1                 | 96.609           | 90.231           | 104.119          |
| 56.2              | 101.1            | 15                  | 0.9063                  | 0.906            | 101.1                | 98.223           | 91.749           | 105.914          |
| 54.7              | 154.2            | 16                  | 0.9688                  | 0.969            | 154.2                | 99.838           | 93.259           | 107.716          |

**Tableau. II.2 : Variable réduite de Gauss à différent fréquence par la loi normale**

| Fréquence | U de Gauss | Valeur théo. | Borne inf. | Borne sup. | Fréq. théo. | Pér. Ret. |
|-----------|------------|--------------|------------|------------|-------------|-----------|
| 0.99      | 0,002      | 134.919      | 124.999    | 147.961    | 0,99        | 100       |
| 0.98      | 0,002      | 127.877      | 118.739    | 139.771    | 0,98        | 50        |
| 0.95      | 0,002      | 117.312      | 109.268    | 127.564    | 0,90        | 10        |
| 0.8       | 0,001      | 96.549       | 90.175     | 104.053    | 0,95        | 20        |
| 0.5       | 0,000      | 74.813       | 68.849     | 80.776     | 0,80        | 5         |

**Tableau. II.3 : Ajustement par la loi de Gumbel**

| Valeurs de départ | Valeurs classées | Ordre de classement | Fréquence expérimentale | Variable réduite | Valeur expérimentale | Valeur théorique | Borne inférieure | Borne supérieure |
|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 51.9              | 50.3             | 1                   | 0.031                   | -1.243           | 50.3                 | 38.142           | 28.941           | 44.591           |
| 69.2              | 51.9             | 2                   | 0.094                   | -0.862           | 51.9                 | 45.824           | 38.390           | 51.413           |
| 59.5              | 54.7             | 3                   | 0.156                   | -0.619           | 54.7                 | 50.722           | 44.237           | 55.941           |
| 59.2              | 56.2             | 4                   | 0.219                   | -0.419           | 56.2                 | 54.752           | 48.898           | 59.815           |
| 66.4              | 59.2             | 5                   | 0.281                   | -0.238           | 59.2                 | 58.394           | 52.968           | 63.459           |
| 50.3              | 59.5             | 6                   | 0.344                   | -0.066           | 59.5                 | 61.864           | 56.703           | 67.074           |
| 72.6              | 66.4             | 7                   | 0.406                   | 0.104            | 66.4                 | 65.292           | 60.250           | 70.787           |
| 88.1              | 69               | 8                   | 0.469                   | 0.277            | 69                   | 68.778           | 63.720           | 74.700           |
| 101.1             | 69.2             | 9                   | 0.531                   | 0.458            | 69.2                 | 72.416           | 67.210           | 78.916           |
| 73.8              | 72.6             | 10                  | 0.594                   | 0.651            | 72.6                 | 76.312           | 70.826           | 83.554           |
| 77.7              | 73.8             | 11                  | 0.656                   | 0.865            | 73.8                 | 80.608           | 74.697           | 88.781           |
| 154.2             | 77.7             | 12                  | 0.719                   | 1.108            | 77.7                 | 85.510           | 79.007           | 94.855           |
| 69                | 88.1             | 13                  | 0.781                   | 1.399            | 88.1                 | 91.374           | 84.056           | 102.225          |
| 93.1              | 93.1             | 14                  | 0.844                   | 1.773            | 93.1                 | 98.902           | 90.428           | 111.798          |
| 56.2              | 101.1            | 15                  | 0.906                   | 2.318            | 101.1                | 109.899          | 99.600           | 125.918          |
| 54.7              | 154.2            | 16                  | 0.969                   | 3.450            | 154.2                | 132.699          | 118.366          | 155.446          |

**Tableau. II.4 : Variable réduite de Gauss à différent fréquence par la loi de Gumbel**

| Fréquence | U de Gauss | Valeur théo. | Borne inf. | Borne sup. | Fréq. théo. | Pér. Ret. |
|-----------|------------|--------------|------------|------------|-------------|-----------|
| 0.99      | 4.600      | 155.876      | 137.289    | 185.613    | 0,99        | 100       |
| 0.98      | 3.902      | 141.808      | 125.814    | 167.290    | 0,98        | 50        |
| 0.95      | 2.970      | 123.034      | 110.438    | 142.901    | 0,90        | 10        |
| 0.8       | 1.500      | 93.409       | 85.789     | 104.803    | 0,95        | 20        |
| 0.5       | 0.367      | 70.571       | 65.456     | 76.764     | 0,80        | 5         |

**Tableau. II.5 : Ajustement par la loi Log Normal**

| Valeurs de départ | Valeurs classées | Ordre de classement | Fréquence expérimentale | Variable réduite | Valeur expérimentale | Valeur théorique | Borne inférieure | Borne supérieure |
|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 51.9              | 50.3             | 1                   | 0.031                   | 0.031            | 50.3                 | 72.253           | 67.582           | 77.282           |
| 69.2              | 51.9             | 2                   | 0.094                   | 0.094            | 51.9                 | 73.576           | 68.844           | 78.746           |
| 59.5              | 54.7             | 3                   | 0.156                   | 0.156            | 54.7                 | 74.924           | 70.119           | 80.247           |
| 59.2              | 56.2             | 4                   | 0.219                   | 0.219            | 56.2                 | 76.296           | 71.410           | 81.787           |
| 66.4              | 59.2             | 5                   | 0.281                   | 0.281            | 59.2                 | 77.694           | 72.715           | 83.368           |
| 50.3              | 59.5             | 6                   | 0.344                   | 0.344            | 59.5                 | 79.117           | 74.034           | 84.989           |
| 72.6              | 66.4             | 7                   | 0.406                   | 0.406            | 66.4                 | 80.567           | 75.369           | 86.652           |
| 88.1              | 69               | 8                   | 0.469                   | 0.469            | 69                   | 82.042           | 76.718           | 88.359           |
| 101.1             | 69.2             | 9                   | 0.531                   | 0.531            | 69.2                 | 83.545           | 78.083           | 90.109           |
| 73.8              | 72.6             | 10                  | 0.594                   | 0.594            | 72.6                 | 85.076           | 79.464           | 91.903           |
| 77.7              | 73.8             | 11                  | 0.656                   | 0.656            | 73.8                 | 86.634           | 80.861           | 93.743           |
| 154.2             | 77.7             | 12                  | 0.719                   | 0.719            | 77.7                 | 88.221           | 82.274           | 95.629           |
| 69                | 88.1             | 13                  | 0.781                   | 0.781            | 88.1                 | 89.837           | 83.705           | 97.562           |
| 93.1              | 93.1             | 14                  | 0.844                   | 0.844            | 93.1                 | 91.483           | 85.152           | 99.543           |
| 56.2              | 101.1            | 15                  | 0.906                   | 0.906            | 101.1                | 93.158           | 86.618           | 101.572          |
| 54.7              | 154.2            | 16                  | 0.969                   | 0.969            | 154.2                | 94.865           | 88.102           | 103.651          |

**Tableau. II.6 : Variable réduite de Gauss à différent fréquence par la loi Log Normal**

| Fréquence | U de Gauss | Valeur théo. | Borne inf. | Borne sup. | Fréq. théo. | Pér. Ret. |
|-----------|------------|--------------|------------|------------|-------------|-----------|
| 0,99      | 0,001      | 92.990       | 86.471     | 101.367    | 0,99        | 100       |
| 0,98      | 0,002      | 124.328      | 112.727    | 141.111    | 0,98        | 50        |
| 0,90      | 0,003      | 166.228      | 145.806    | 197.986    | 0,90        | 10        |
| 0,95      | 0,004      | 222.249      | 188.019    | 278.631    | 0,95        | 20        |
| 0,80      | 0,005      | 297.150      | 242.115    | 392.673    | 0,80        | 5         |

**Tableau II.7:** Pluies à courte durées pour différent fréquence

| Fréq               | 0.10%                      |                | 1%                         |                | 2%                         |                | 5%                         |                | 10%                        |                |
|--------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| T                  | T=1000                     |                | T=100                      |                | T=50                       |                | T=20                       |                | T=10                       |                |
| Tem<br>ps<br>(min) | P <sub>max t</sub><br>(mm) | I <sub>0</sub> | P <sub>max t</sub><br>(mm) | I <sub>0</sub> | P <sub>max t</sub><br>(mm) | I <sub>0</sub> | P <sub>max t</sub><br>(mm) | I <sub>0</sub> | P <sub>max t</sub><br>(mm) | I <sub>0</sub> |
|                    |                            | (mm/mi<br>n)   |                            | (mm/mi<br>n)   |                            | (mm/mi<br>n)   |                            | (mm/mi<br>n)   |                            | (mm/mi<br>n)   |
| 1                  | 25.090                     | 25.09<br>0     | 25.759                     | 25.75<br>9     | 26.578                     | 26.57<br>8     | 20.942                     | 20.94<br>2     | 28.930                     | 28.93<br>0     |
| 2                  | 29.304                     | 14.65<br>2     | 30.085                     | 15.04<br>3     | 31.043                     | 15.52<br>1     | 24.459                     | 12.23<br>0     | 33.789                     | 16.89<br>5     |
| 3                  | 32.090                     | 10.69<br>7     | 32.946                     | 10.98<br>2     | 33.994                     | 11.33<br>1     | 26.785                     | 8.928          | 37.002                     | 12.33<br>4     |
| 4                  | 34.226                     | 8.557          | 35.139                     | 8.785          | 36.257                     | 9.064          | 28.568                     | 7.142          | 39.465                     | 9.866          |
| 5                  | 35.981                     | 7.196          | 36.940                     | 7.388          | 38.115                     | 7.623          | 30.032                     | 6.006          | 41.488                     | 8.298          |
| 6                  | 37.480                     | 6.247          | 38.480                     | 6.413          | 39.704                     | 6.617          | 31.284                     | 5.214          | 43.217                     | 7.203          |
| 7                  | 38.797                     | 5.542          | 39.831                     | 5.690          | 41.099                     | 5.871          | 32.383                     | 4.626          | 44.735                     | 6.391          |
| 8                  | 39.975                     | 4.997          | 41.041                     | 5.130          | 42.347                     | 5.293          | 33.366                     | 4.171          | 46.094                     | 5.762          |
| 9                  | 41.044                     | 4.560          | 42.138                     | 4.682          | 43.479                     | 4.831          | 34.258                     | 3.806          | 47.326                     | 5.258          |
| 10                 | 42.024                     | 4.202          | 43.144                     | 4.314          | 44.517                     | 4.452          | 35.077                     | 3.508          | 48.456                     | 4.846          |
| 11                 | 42.931                     | 3.903          | 44.075                     | 4.007          | 45.478                     | 4.134          | 35.833                     | 3.258          | 49.502                     | 4.500          |
| 12                 | 43.776                     | 3.648          | 44.943                     | 3.745          | 46.373                     | 3.864          | 36.539                     | 3.045          | 50.476                     | 4.206          |
| 13                 | 44.568                     | 3.428          | 45.756                     | 3.520          | 47.212                     | 3.632          | 37.200                     | 2.862          | 51.389                     | 3.953          |
| 14                 | 45.314                     | 3.237          | 46.522                     | 3.323          | 48.002                     | 3.429          | 37.822                     | 2.702          | 52.249                     | 3.732          |
| 15                 | 46.020                     | 3.068          | 47.246                     | 3.150          | 48.750                     | 3.250          | 38.411                     | 2.561          | 53.063                     | 3.538          |
| 16                 | 46.690                     | 2.918          | 47.934                     | 2.996          | 49.460                     | 3.091          | 38.971                     | 2.436          | 53.836                     | 3.365          |
| 17                 | 47.328                     | 2.784          | 48.590                     | 2.858          | 50.136                     | 2.949          | 39.504                     | 2.324          | 54.572                     | 3.210          |
| 18                 | 47.938                     | 2.663          | 49.216                     | 2.734          | 50.782                     | 2.821          | 40.013                     | 2.223          | 55.275                     | 3.071          |
| 19                 | 48.522                     | 2.554          | 49.816                     | 2.622          | 51.401                     | 2.705          | 40.500                     | 2.132          | 55.949                     | 2.945          |
| 20                 | 49.083                     | 2.454          | 50.391                     | 2.520          | 51.995                     | 2.600          | 40.968                     | 2.048          | 56.595                     | 2.830          |
| 21                 | 49.622                     | 2.363          | 50.945                     | 2.426          | 52.566                     | 2.503          | 41.418                     | 1.972          | 57.217                     | 2.725          |
| 22                 | 50.142                     | 2.279          | 51.479                     | 2.340          | 53.117                     | 2.414          | 41.852                     | 1.902          | 57.816                     | 2.628          |
| 23                 | 50.644                     | 2.202          | 51.994                     | 2.261          | 53.648                     | 2.333          | 42.271                     | 1.838          | 58.395                     | 2.539          |
| 24                 | 51.129                     | 2.130          | 52.492                     | 2.187          | 54.162                     | 2.257          | 42.676                     | 1.778          | 58.954                     | 2.456          |
| 25                 | 51.599                     | 2.064          | 52.974                     | 2.119          | 54.660                     | 2.186          | 43.068                     | 1.723          | 59.496                     | 2.380          |
| 26                 | 52.054                     | 2.002          | 53.441                     | 2.055          | 55.142                     | 2.121          | 43.448                     | 1.671          | 60.021                     | 2.308          |
| 27                 | <b>52.496</b>              | <b>1.944</b>   | <b>53.895</b>              | <b>1.996</b>   | <b>55.610</b>              | <b>2.060</b>   | <b>43.817</b>              | <b>1.623</b>   | <b>60.530</b>              | <b>2.242</b>   |
| 28                 | 52.925                     | 1.890          | 54.336                     | 1.941          | 56.065                     | 2.002          | 44.175                     | 1.578          | 61.026                     | 2.179          |
| 29                 | 53.343                     | 1.839          | 54.765                     | 1.888          | 56.508                     | 1.949          | 44.524                     | 1.535          | 61.507                     | 2.121          |
| 30                 | 53.749                     | 1.792          | 55.182                     | 1.839          | 56.938                     | 1.898          | 44.863                     | 1.495          | 61.976                     | 2.066          |

**Tableau II.8** : Récapitulatif des résultats de calcul pour tracé l'Hydrogramme du crue

| Temps (min) | Q <sub>0.1%</sub> (m <sup>3</sup> /s) | Q <sub>1%</sub> (m <sup>3</sup> /s) | Q <sub>2%</sub> (m <sup>3</sup> /s) | Q <sub>5%</sub> (m <sup>3</sup> /s) | Q <sub>10%</sub> (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0           | 0.000                                 | 0.000                               | 0.000                               | 0.000                               | 0.000                                |
| 3           | 0.009                                 | 0.009                               | 0.007                               | 0.011                               | 0.008                                |
| 6           | 0.037                                 | 0.035                               | 0.028                               | 0.043                               | 0.031                                |
| 9           | 0.083                                 | 0.079                               | 0.063                               | 0.098                               | 0.070                                |
| 12          | 0.147                                 | 0.140                               | 0.112                               | 0.174                               | 0.124                                |
| 15          | 0.229                                 | 0.220                               | 0.174                               | 0.271                               | 0.194                                |
| 18          | 0.330                                 | 0.316                               | 0.251                               | 0.390                               | 0.279                                |
| 21          | 0.449                                 | 0.430                               | 0.342                               | 0.532                               | 0.380                                |
| 24          | 0.587                                 | 0.562                               | 0.446                               | 0.694                               | 0.496                                |
| <b>27</b>   | <b>0.743</b>                          | <b>0.711</b>                        | <b>0.565</b>                        | <b>0.879</b>                        | <b>0.628</b>                         |
| 30          | 0.115                                 | 0.110                               | 0.088                               | 0.136                               | 0.097                                |
| 33          | 0.089                                 | 0.085                               | 0.068                               | 0.105                               | 0.075                                |
| 36          | 0.067                                 | 0.064                               | 0.051                               | 0.079                               | 0.056                                |
| 39          | 0.049                                 | 0.047                               | 0.037                               | 0.058                               | 0.041                                |
| 42          | 0.034                                 | 0.033                               | 0.026                               | 0.040                               | 0.029                                |
| 45          | 0.023                                 | 0.022                               | 0.017                               | 0.027                               | 0.019                                |
| 48          | 0.014                                 | 0.014                               | 0.011                               | 0.017                               | 0.012                                |
| 51          | 0.008                                 | 0.008                               | 0.006                               | 0.010                               | 0.007                                |
| 54          | 0.004                                 | 0.004                               | 0.003                               | 0.005                               | 0.004                                |
| 57          | 0.002                                 | 0.002                               | 0.001                               | 0.002                               | 0.002                                |
| 60          | 0.001                                 | 0.001                               | 0.000                               | 0.001                               | 0.000                                |
| 63          | 0.000                                 | 0.000                               | 0.000                               | 0.000                               | 0.000                                |

**Tableau.II.9** : Régularisation sans tenant compte des pertes.

| Mois | A 80%  | U <sub>80%</sub> | A 80%- U <sub>80%</sub> | 1ère consigne |       |       | 2eme consigne |       |       |
|------|--------|------------------|-------------------------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|      |        |                  |                         | Vrf           | Vri   | S     | Vrf           | Vri   | S     |
| Oct  | 0.0025 | 0                | 2500                    | 3773          | 1273  |       |               | 1273  |       |
| Nov  | 0.0029 | 0                | 2900                    |               | 3773  |       | -10827        | 1273  | 12100 |
| Déc  | 0.0037 | 0                | 3700                    | 6673          | 6673  |       | -8327         | -8327 |       |
| Jan  | 0.0045 | 0                | 4500                    | 10373         | 10373 |       | -5427         | -5427 |       |
| Fév  | 0.0042 | 0                | 4200                    | 14873         | 14873 |       | -1727         | -1727 |       |
| Mar  | 0.0111 | 0                | 11100                   | 19073         | 15273 |       | 2773          | 2773  |       |
| Avr  | 0.0078 | 0.0011           | 6750                    | 26373         | 15273 | 11100 | 6973          | 6973  |       |
| Mai  | 0.0053 | 0.0032           | 2150                    | 22023         | 15273 | 6750  | 18073         | 15273 |       |
| Jun  | 0.0018 | 0.0042           | -2400                   | 17423         | 15273 |       | 24823         | 15273 |       |
| Jun  | 0.0009 | 0.0053           | -4400                   | 12873         | 12873 |       | 26973         | 15273 |       |
| Aou  | 0.0013 | 0.0042           | -2900                   | 8473          | 8473  |       | 24573         | 15273 |       |
| Sép  | 0.0021 | 0.0032           | -1100                   | 5573          | 5573  |       | 20173         | 15273 |       |
|      |        |                  |                         | 1273          | 1273  |       | 17273         | 17273 |       |

**Tableau II.10** : Calcul d'infiltration des pertes pour premier approximation

| Mois | V <sub>imoy</sub> | S <sub>imoy</sub> (ha) | Es  | V <sub>evap</sub> (m3) | V <sub>inf</sub> (m3) | Π   |
|------|-------------------|------------------------|-----|------------------------|-----------------------|-----|
| Oct  | 2523              | 0.3                    | 107 | 32.17                  | 37.85                 | 70  |
| Nov  | 5223              | 1.6                    | 81  | 130.23                 | 78.35                 | 209 |
| Déc  | 8523              | 3                      | 76  | 227.66                 | 127.85                | 356 |
| Jan  | 12623             | 5.4                    | 76  | 407.81                 | 189.35                | 597 |
| Fév  | 15073             | 7.2                    | 72  | 521.72                 | 226.10                | 748 |
| Mar  | 15273             | 7.2                    | 86  | 622.18                 | 229.10                | 851 |
| Avr  | 15273             | 7.2                    | 88  | 637.17                 | 229.10                | 866 |
| Mai  | 15273             | 7.2                    | 89  | 642.45                 | 229.10                | 872 |
| Juin | 14073             | 6.4                    | 118 | 756.73                 | 211.10                | 968 |
| Juil | 10673             | 3.8                    | 148 | 563.73                 | 160.10                | 724 |
| Aou  | 7023              | 2.4                    | 153 | 366.91                 | 105.35                | 472 |
| Sép  | 3423              | 0.41                   | 128 | 52.44                  | 51.35                 | 104 |

**Tableau II.11**: Calcul d'infiltration des pertes pour deuxièmes approximation

| Mois | V <sub>imoy</sub> | S <sub>imoy</sub> (ha) | Es  | V <sub>evap</sub> (m3) | V <sub>inf</sub> (m3) | Π   |
|------|-------------------|------------------------|-----|------------------------|-----------------------|-----|
| Oct  | 4842              | 1.2                    | 107 | 128.67                 | 72.62                 | 201 |
| Nov  | 4922              | 1.4                    | 81  | 113.95                 | 73.84                 | 188 |
| Déc  | 7949              | 3                      | 76  | 227.66                 | 119.23                | 347 |
| Jan  | 11572             | 5.4                    | 76  | 407.81                 | 173.58                | 581 |
| Fév  | 14564             | 7.2                    | 72  | 521.72                 | 218.46                | 740 |
| Mar  | 15604             | 7.2                    | 86  | 622.18                 | 234.06                | 856 |
| Avr  | 15604             | 7.2                    | 88  | 637.17                 | 234.06                | 871 |
| Mai  | 15604             | 7.2                    | 89  | 642.45                 | 234.06                | 877 |
| Juin | 13370             | 6.4                    | 118 | 756.73                 | 200.55                | 957 |
| Juil | 8610              | 3.8                    | 148 | 563.73                 | 129.15                | 693 |
| Aou  | 4397              | 2.4                    | 153 | 366.91                 | 65.95                 | 433 |
| Sép  | 1355              | 0.41                   | 699 | 286.50                 | 20.33                 | 307 |

**Tableau II.12** : Régularisation avec pertes premier approximation

| Mois | A <sub>80%</sub> | U <sub>80%</sub> | Π      | A <sub>80%</sub> -<br>U <sub>80%</sub> -Π | 1ère consigne |          |          | 2eme consigne |           |      |
|------|------------------|------------------|--------|-------------------------------------------|---------------|----------|----------|---------------|-----------|------|
|      |                  |                  |        |                                           | Vrf           | Vri      | S        | Vrf           | Vri       | S    |
| Oct  | 0.0025           | 0                | 70.01  | 2429.99                                   | 3702.99       | 1273     |          |               | 1273      |      |
| Nov  | 0.0029           | 0                | 208.58 | 2691.42                                   |               | 3702.99  |          | -14809.46     | 1273      | 1273 |
| Déc  | 0.0037           | 0                | 355.51 | 3344.49                                   | 6394.41       | 6394.41  |          | -12379.47     | -12379.47 |      |
| Jan  | 0.0045           | 0                | 597.16 | 3902.84                                   | 9738.90       | 9738.90  |          | -9688.05      | -9688.05  |      |
| Fév  | 0.0042           | 0                | 747.81 | 3452.19                                   | 13641.74      | 13641.74 |          | -6343.56      | -6343.56  |      |
| Mar  | 0.0111           | 0                | 851.28 | 10248.7<br>2                              | 17093.93      | 15370.06 |          | -2440.72      | -2440.72  |      |
| Avr  | 0.0078           | 0.0011           | 866.26 | 5833.74                                   | 25618.78      | 15370.06 | 10248.72 | 1011.47       | 1011.47   |      |
| Mai  | 0.0053           | 0.0032           | 871.55 | 1228.45                                   | 21203.80      | 15370.06 | 5833.74  | 11260.19      | 11260.19  |      |
| Jun  | 0.0018           | 0.0053           | 967.82 | -<br>4467.82                              | 16598.51      | 15370.06 |          | 17093.93      | 15604.00  |      |
| Jun  | 0.0009           | 0.0013           | 723.82 | -<br>5053.20                              | 10902.24      | 10902.24 |          | 18322.38      | 15604.00  |      |
| Aou  | 0.0013           | 0.0042           | 472.25 | -<br>3372.25                              | 5849.04       | 5849.04  |          | 11136.18      | 11136.18  |      |
| Sép  | 0.0021           | 0.0032           | 103.79 | -<br>1203.79                              | 2476.79       | 2476.79  |          | 6082.98       | 6082.98   |      |
|      |                  |                  |        |                                           | 1273          | 1273     |          | 2710.73       | 2710.73   |      |
|      |                  |                  |        |                                           |               |          |          | 1273          | 1273      |      |

**Tableau II.13** : Régularisation sans pertes pour deuxième approximation

| Mois | A 80%<br>10^6 | U80%<br>10^6 | Π      | A 80%-<br>U80%-Π | 1ère consigne |               |         | 2eme consigne |               |      |
|------|---------------|--------------|--------|------------------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|------|
|      |               |              |        |                  | Vrf           | Vri           | S       | Vrf           | Vri           | S    |
| Oct  | 0.0025        | 0            | 201.29 | 2298.71          | 3571.71       | 1273          |         |               | 1273          |      |
| Nov  | 0.0029        | 0            | 187.79 | 2712.21          |               | 3571.708<br>5 |         | -<br>14799.53 | 1273          | 1273 |
| Déc  | 0.0037        | 0            | 346.89 | 3353.11          | 6283.92       | 6283.916<br>7 |         | -<br>12500.82 | -<br>12500.82 |      |
| Jan  | 0.0045        | 0            | 581.40 | 3918.60          | 9637.02       | 9637.02       |         | -9788.61      | -9788.61      |      |
| Fév  | 0.0042        | 0            | 740.18 | 3459.82          | 13555.6       | 13555.63      |         | -6435.50      | -6435.50      |      |
| Mar  | 0.0111        | 0            | 856.25 | 10243.75         | 17015.4       | 15523.00      |         | -2516.90      | -2516.90      |      |
| Avr  | 0.0078        | 0.0011       | 871.23 | 5828.77          | 25766.7       | 15523.00      | 10243.7 | 942.92        | 942.92        |      |
| Mai  | 0.0053        | 0.0032       | 876.51 | 1223.49          | 21351.7       | 15523.00      | 5828.77 | 11186.68      | 11186.68      |      |
| Jun  | 0.0018        | 0.0053       | 957.28 | -4457.28         | 16746.4       | 15523.00      |         | 17015.45      | 15523.00      |      |
| Jun  | 0.0009        | 0.0013       | 692.87 | -5053.20         | 11065.7       | 11065.72      |         | 18238.94      | 15523.00      |      |
| Aou  | 0.0013        | 0.0042       | 432.86 | -3332.86         | 6012.52       | 6012.52       |         | 11065.72      | 11065.72      |      |
| Sép  | 0.0021        | 0.0032       | 306.83 | -1406.83         | 2679.66       | 2679.66       |         | 6012.52       | 6012.52       |      |
|      |               |              |        |                  | 1273          | 1273          |         | 2679.66       | 2679.66       |      |
|      |               |              |        |                  |               |               |         | 1273          | 1273          |      |

**Tableau II.14:** Pluies maximales journalières (mm)

**Nom station : TAHER**

**Code de la station : (03 05 04)**

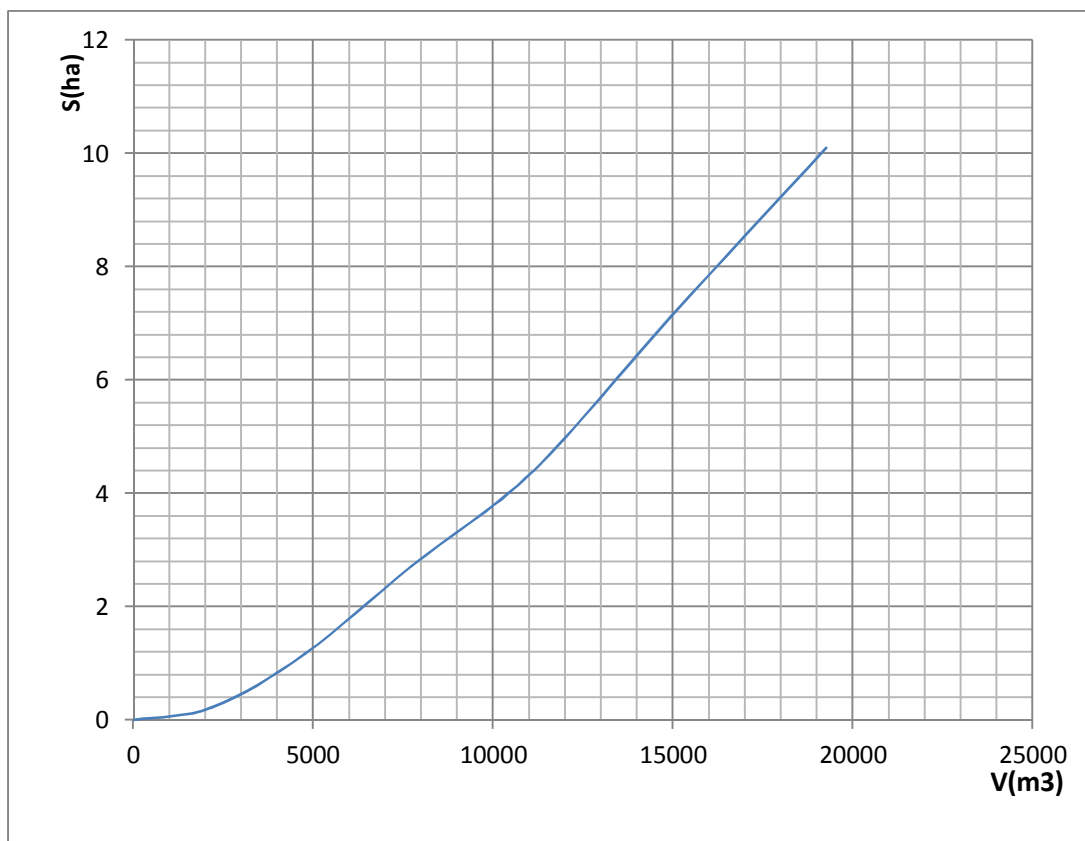
**Cordonnées de la station :**

**X : 785,6m**

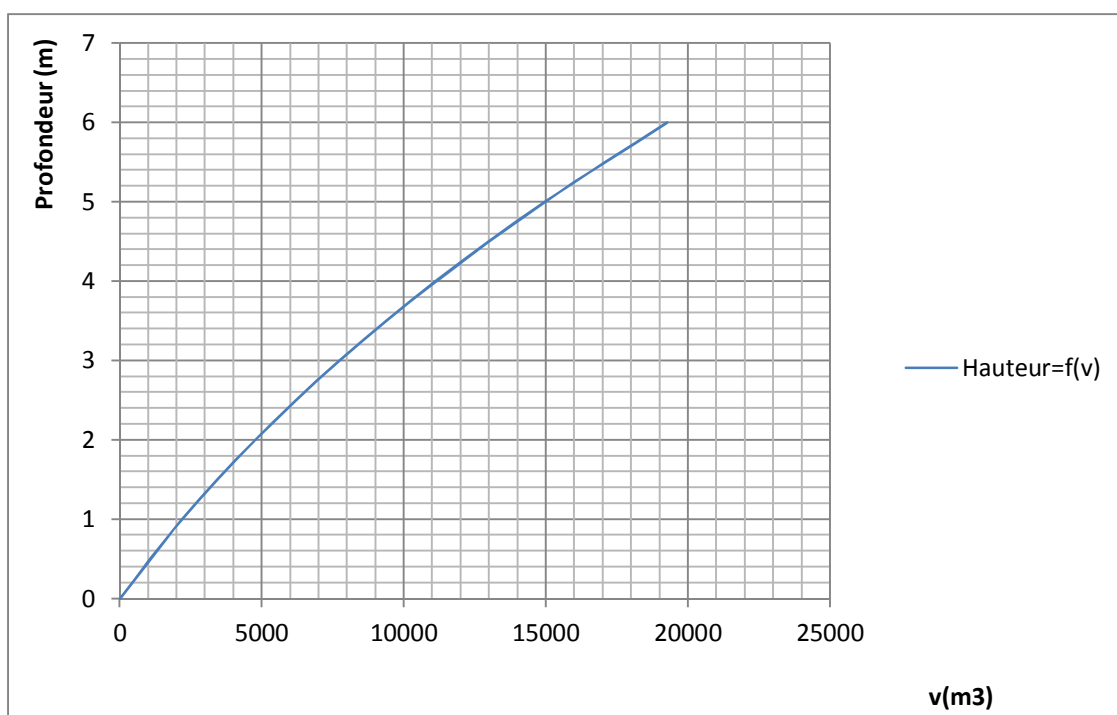
**Y : 390,5m**

**Z : 56m**

| Année     | sept | oct  | nov  | dec   | janv  | fev  | mars | avril | mai  | juin | juil | aout | Max   |
|-----------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| 1991-1992 | 9,5  | 42   | 24,5 | 21    | 23,5  | 25   | 32   | 51,5  | 48,5 | 23   | 9    | 0    | 51,9  |
| 1992-1993 | 5    | 34   | 17,5 | 69,2  | 24    | 32   | 27   | 30    | 19   | 2    | 0    | 2    | 69,2  |
| 1993-1994 | 13   | 51   | 39   | 59,5  | 41    | 42   | 0    | 17    | 33   | 0    | 0,1  | 0,5  | 59,5  |
| 1994-1995 | 10,5 | 33   | 6,5  | 51    | 47    | 16   | 59,2 | 20    | 7,5  | 6,5  | 0    | 7    | 59,2  |
| 1995-1996 | 27   | 49   | 19   | 48    | 30    | 66,4 | 44   | 24    | 34   | 34   | 2    | 8    | 66,4  |
| 1996-1997 | 15   | 61   | 36,5 | 46    | 28,5  | 10,5 | 15   | 50,3  | 18   | 15,5 | 0    | 2    | 50,3  |
| 1997-1998 | 17,5 | 66   | 64,5 | 50    | 14    | 44,5 | 24,5 | 72,6  | 67   | 0,5  | 0    | 43,5 | 72,6  |
| 1998-1999 | 26   | 20   | 88,1 | 39    | 47    | 20   | 37,5 | 31,5  | 5    | 3,5  | 0    | 2    | 88,1  |
| 1999-2000 | 11   | 13   | 39   | 101,1 | 19,5  | 21   | 18,5 | 14,5  | 67,5 | 13,5 | 1    | 3    | 101,1 |
| 2000-2001 | 5    | 42,5 | 41   | 37,5  | 73,8  | 25   | 10   | 22,5  | 26,5 | 0,5  | 0    | 0    | 73,8  |
| 2001-2002 | 14   | 8    | 17   | 77,7  | 6,5   | 41,5 | 13   | 64    | 26   | 0    | 27   | 65   | 77,7  |
| 2002-2003 | 17,5 | 47   | 93   | 88,5  | 154,2 | 24   | 16   | 65    | 16   | 0    | 0    | 0    | 154,2 |
| 2003-2004 | 32   | 21   | 48   | 69    | 45    | 24   | 8    | 35    | 35   | 50   | 0    | 0    | 69    |
| 2004-2005 | 50   | 17   | 93,1 | 68    | 39    | 17   | 20   | 54    | 12   | 0    | 2    | 6    | 93,1  |
| 2005-2006 | 8    | 2,5  | 22   | 56,2  | 62    | 56   | 24   | 15    | 25   | 1    | 5    | 13   | 56,2  |
| 2006-2007 | 22   | 18   | 10,3 | 54,7  | 5,5   | 16,5 | 50   | 44    | 9    | 24   | 0    | 4    | 54,7  |
| 2007-2008 | 19   | 17   | 11   | 55,1  | 5,7   | 17,2 | 54   | 34    | 13   | 28   | 3    | 2    | 51,1  |



**Figure III.17 :** Courbe volumétrique [ $S=F(v)$ ]



**Figure III.18 :** Courbe volumétrique [ $P=F(v)$ ]

# **ANNEXE III**

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=11,04**

**TableauIII.1**

| N°Tr | bi   | h1    | h2   | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli  | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|------|------|-------|------|-------|---------|--------|------------|------------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -5   | 8,94 | 2,8   |      | -0,5  | 0,86603 | 66,835 | -33,41772  | 57,881189  | 10,02 | 47,094 | 0,53  | 30,67703 | 2,8   | 28,056  | 14,86968     | 67,11 | 448.533 |
| -4   | 8,94 | 10,05 | 0,83 | -0,4  | 0,91652 | 239,89 | -95,9566   | 219,86418  | 9,55  | 44,885 | 0,53  | 116,528  | 10,05 | 95,9775 | 50,868075    | 67,11 | 1609.91 |
| -3   | 8,94 | 13,61 | 4,18 | -0,3  | 0,95394 | 324,87 | -97,46039  | 309,9043   | 9,24  | 43,428 | 0,53  | 164,2493 | 13,61 | 125,756 | 66,650892    | 67,11 | 2180.19 |
| -2   | 8,94 | 17,17 | 6,5  | -0,2  | 0,9798  | 409,84 | -81,96889  | 401,56393  | 9,05  | 42,535 | 0,53  | 212,8289 | 17,17 | 155,389 | 82,355905    | 67,11 | 2750.47 |
| -1   | 8,94 | 20,73 | 7,86 | -0,1  | 0,99499 | 494,82 | -49,4821   | 492,34063  | 9,04  | 42,488 | 0,53  | 260,9405 | 20,73 | 187,399 | 99,321576    | 67,11 | 3320.74 |
| 0    | 8,94 | 24,29 | 8,31 | 0     | 1       | 579,8  | 0          | 579,79744  | 8,93  | 41,971 | 0,53  | 307,2926 | 24,29 | 216,91  | 114,962141   | 67,11 | 3891.02 |
| 1    | 8,94 | 27,85 | 7,86 | 0,1   | 0,99499 | 664,77 | 66,477393  | 661,44171  | 9,04  | 42,488 | 0,53  | 350,5641 | 27,85 | 251,764 | 133,43492    | 67,11 | 4461.3  |
| 2    | 8,94 | 31,41 | 6,51 | 0,2   | 0,9798  | 749,75 | 149,95008  | 734,60238  | 9,24  | 43,428 | 0,53  | 389,3393 | 31,41 | 290,228 | 153,821052   | 67,11 | 5031.58 |
| 3    | 8,94 | 34,97 | 4,2  | 0,3   | 0,95394 | 834,73 | 250,41807  | 796,27872  | 9,55  | 44,885 | 0,53  | 422,0277 | 34,97 | 333,964 | 177,000655   | 67,11 | 5601.85 |
| 4    | 8,94 | 38,54 | 0,85 | 0,4   | 0,91652 | 919,94 | 367,97684  | 843,14085  | 10,02 | 47,094 | 0,53  | 446,8647 | 38,54 | 386,171 | 204,670524   | 67,11 | 6173.73 |
| 5    | 8,94 | 38,43 |      | 0,5   | 0,86603 | 917,32 | 458,65821  | 794,41932  | 10,71 | 50,337 | 0,53  | 421,0422 | 38,43 | 411,585 | 218,140209   | 67,11 | 6156.11 |
| 6    | 8,94 | 35,88 |      | 0,6   | 0,8     | 856,45 | 513,86905  | 685,15874  | 11,78 | 55,366 | 0,53  | 363,1341 | 35,88 | 422,666 | 224,013192   | 67,11 | 5747.63 |
| 7    | 8,94 | 31,98 |      | 0,7   | 0,71414 | 763,36 | 534,34934  | 545,14537  | 13,57 | 63,779 | 0,53  | 288,927  | 31,98 | 433,969 | 230,003358   | 67,11 | 5122.88 |
| 9    | 8,94 | 25,34 |      | 0,9   | 0,43589 | 604,86 | 544,37466  | 263,65268  | 17,18 | 80,746 | 0,53  | 139,7359 | 25,34 | 435,341 | 230,730836   | 67,11 | 4059.22 |
|      |      |       |      |       |         |        |            |            |       |        |       |          |       |         |              |       |         |

|       |  |  |  |  |  |  |           |       |  |         |  |         |  |  |  |  |         |
|-------|--|--|--|--|--|--|-----------|-------|--|---------|--|---------|--|--|--|--|---------|
| somme |  |  |  |  |  |  | 1983,4133 | 14,79 |  | 690,524 |  | 3774,42 |  |  |  |  | 56555,2 |
|-------|--|--|--|--|--|--|-----------|-------|--|---------|--|---------|--|--|--|--|---------|

Kss      2,2511391  
Kas      0,628319

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=12,81**

**Tableau III.2**

| N°Tr  | bi    | h1   | h2    | h3 | Sin α | Cos α  | Gn        | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli    | tangø | N*tangø   | Ui    | Ui*dli   | Ui*dli*tangø | dn     | a*Gn*dn    |
|-------|-------|------|-------|----|-------|--------|-----------|------------|------------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|--------------|--------|------------|
| -4    | 10.38 |      | 5.68  | 0  | -0.4  | 0.9165 | 141.50016 | -56.600064 | 129.687039 | 11.98 | 3.2721   | 0.57  | 73.921612 | 5.68  | 68.0464  | 38.79        | 117.26 | 1659.23088 |
| -3    | 10.38 |      | 12.05 | 0  | -0.3  | 0.9539 | 300.1896  | -90.05688  | 286.362627 | 11.59 | 19.703   | 0.57  | 163.2267  | 12.05 | 139.6595 | 79.61        | 117.26 | 3520.02325 |
| -2    | 10.38 | 2.96 | 17.12 | 0  | -0.2  | 0.9798 | 487.94304 | -97.588608 | 478.084589 | 11.35 | 19.295   | 0.57  | 272.50822 | 17.12 | 194.312  | 110.8        | 117.26 | 5721.62009 |
| -1    | 10.38 | 4.54 | 20.84 | 0  | -0.1  | 0.995  | 613.41648 | -61.341648 | 610.341691 | 11.23 | 19.091   | 0.57  | 347.89476 | 20.84 | 234.0332 | 133.4        | 117.26 | 7192.92164 |
| 0     | 10.38 | 5.06 | 23.26 | 0  | 0     | 1      | 684.49872 | 0          | 684.49872  | 11.23 | 19.091   | 0.57  | 390.16427 | 23.26 | 261.2098 | 148.9        | 117.26 | 8026.43199 |
| 1     | 10.38 | 4.53 | 24.26 | 0  | 0.1   | 0.995  | 698.40792 | 69.840792  | 694.907106 | 11.35 | 19.295   | 0.57  | 396.09705 | 24.26 | 275.351  | 157          | 117.26 | 8189.53127 |
| 2     | 10.38 | 2.96 | 23.75 | 0  | 0.2   | 0.9798 | 653.1096  | 130.62192  | 639.914106 | 11.59 | 19.703   | 0.57  | 364.75104 | 23.75 | 275.2625 | 156.9        | 117.26 | 7658.36317 |
| 3     | 10.38 |      | 21.54 | 0  | 0.3   | 0.9539 | 536.60448 | 160.98134  | 511.888049 | 11.98 | 20.366   | 0.57  | 291.77619 | 21.54 | 258.0492 | 147.1        | 117.26 | 6292.22413 |
| 4     | 10.38 |      | 17.28 | 0  | 0.4   | 0.9165 | 430.47936 | 172.19174  | 394.54085  | 12.57 | 21.369   | 0.57  | 224.88828 | 17.28 | 217.2096 | 123.8        | 117.26 | 5047.80098 |
| 5     | 10.38 |      | 6.91  | 0  | 0.5   | 0.866  | 172.14192 | 86.07096   | 149.079276 | 13.44 | 22.848   | 0.57  | 84.975187 | 6.91  | 92.8704  | 52.94        | 117.26 | 2018.53615 |
| 6     | 10.38 |      |       |    | 0.6   | 0.8    |           |            |            | 14.79 | 25.143   |       |           |       |          |              |        |            |
| 7     | 10.38 |      |       |    | 0.7   | 0.7141 |           |            |            | 17.03 | 28.951   |       |           |       |          |              |        |            |
| 8     | 10.38 |      |       |    | 0.8   | 0.6    |           |            |            | 21.57 | 36.669   |       |           |       |          |              |        |            |
|       |       |      |       |    |       |        |           |            |            |       |          |       |           |       |          |              |        |            |
| somme |       |      |       |    |       |        |           | 314.11956  |            |       | 274.7961 |       | 2610.2033 |       |          |              |        | 55326.6835 |

Kss            2.8844  
Kas            0.62269

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=13.25**

**Tableau III.3**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2   | h3   | Sin<br>$\alpha$ | Cos $\alpha$ | Gn        | T=Gn*Sin $\alpha$ | N=Gn*Cos $\alpha$ | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui   | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn     | a*Gn*dn     |
|-------|-------|-------|------|------|-----------------|--------------|-----------|-------------------|-------------------|-------|---------|-------|----------|------|---------|--------------|--------|-------------|
| -2    | 10.73 | 4.65  |      | 0    | -0.2            | 0.9798       | 99.789    | -19.9578          | 97.77285278       | 13.37 | 22.729  | 0.57  | 55.73053 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 1213.833396 |
| -1    | 10.73 | 8.92  | 1.85 | 1.19 | -0.1            | 0.995        | 269.70928 | 26.970928         | 268.3573453       | 13.17 | 22.389  | 0.57  | 152.9637 | 1.85 | 24.3645 | 13.887765    | 121.64 | 3280.743682 |
| 0     | 10.73 | 12.23 | 2.22 | 3.3  | 0               | 1            | 404.60684 | 0                 | 404.60684         | 13.1  | 22.27   | 0.57  | 230.6259 | 2.22 | 29.082  | 16.57674     | 121.64 | 4921.637602 |
| 1     | 10.73 | 17.47 | 1.85 | 4    | 0.1             | 0.995        | 525.5554  | 52.55554          | 522.9210205       | 13.16 | 22.372  | 0.57  | 298.065  | 1.85 | 24.346  | 13.87722     | 121.64 | 6392.855886 |
| 2     | 10.73 | 21.74 |      | 3.31 | 0.2             | 0.9798       | 551.77952 | 110.3559          | 540.6313098       | 13.37 | 22.729  | 0.57  | 308.1598 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 6711.846081 |
| 3     | 10.73 | 23.46 |      | 1.19 | 0.3             | 0.9539       | 534.09648 | 160.22894         | 509.4955696       | 13.73 | 23.341  | 0.57  | 290.4125 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 6496.749583 |
| 4     | 10.73 | 23.72 |      | 0    | 0.4             | 0.9165       | 509.0312  | 203.61248         | 466.534801        | 14.3  | 24.31   | 0.57  | 265.9248 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 6191.855517 |
| 5     | 10.73 | 22.57 |      | 0    | 0.5             | 0.866        | 484.3522  | 242.1761          | 419.4613096       | 15.14 | 25.738  | 0.57  | 239.0929 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 5891.660161 |
| 6     | 10.73 | 19.76 |      | 0    | 0.6             | 0.8          | 424.0496  | 254.42976         | 339.23968         | 16.39 | 27.863  | 0.57  | 193.3666 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 5158.139334 |
| 7     | 10.73 | 14.82 |      | 0    | 0.7             | 0.7141       | 318.0372  | 222.62604         | 227.1239901       | 18.39 | 31.263  | 0.57  | 129.4607 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 3868.604501 |
| 8     | 10.73 | 6.84  |      | 0    | 0.8             | 0.6          | 146.7864  | 117.42912         | 88.07184          | 17.22 | 29.274  | 0.57  | 50.20095 | 0    | 0       | 0            | 121.64 | 1785.50977  |
|       |       |       |      |      |                 |              |           |                   |                   |       |         |       |          |      |         |              |        |             |
| somme |       |       |      |      |                 |              |           | 1316.4852         |                   |       | 274.278 |       | 2214.003 |      |         |              |        | 51913.43551 |

Kss      1.890095  
Kas      0.475364

**Stabilité pour le cas de fin de construction talus  
amont(R=13.53)**

**TableauIII.4**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2 | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|----|-------|---------|--------|------------|------------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -2    | 10.96 | 2.89  | 0  | -0.2  | 0.9798  | 84.571 | -16.91413  | 82.861974  | 11.09 | 52.123  | 0.53  | 43.91685 | 2.89  | 32.0501 | 16.986553    | 66.82 | 565.101 |
| -1    | 10.96 | 8.92  | 0  | -0.1  | 0.99499 | 261.03 | -26.10277  | 259.71933  | 10.97 | 51.559  | 0.53  | 137.6512 | 8.92  | 97.8524 | 51.861772    | 66.82 | 1744.19 |
| 0     | 10.96 | 13.83 | 0  | 0     | 1       | 404.71 | 0          | 404.71006  | 10.97 | 51.559  | 0.53  | 214.4963 | 13.83 | 151.715 | 80.409003    | 66.82 | 2704.27 |
| 1     | 10.96 | 17.65 | 0  | 0.1   | 0.99499 | 516.5  | 51.649548  | 513.90651  | 11.09 | 52.123  | 0.53  | 272.3705 | 17.65 | 195.739 | 103.741405   | 66.82 | 3451.22 |
| 2     | 10.96 | 20.35 | 0  | 0.2   | 0.9798  | 595.51 | 119.10122  | 583.47445  | 11.32 | 53.204  | 0.53  | 309.2415 | 20.35 | 230.362 | 122.09186    | 66.82 | 3979.17 |
| 3     | 10.96 | 21.87 | 0  | 0.3   | 0.95394 | 639.99 | 191.99586  | 610.50791  | 11.7  | 54.99   | 0.53  | 323.5692 | 21.87 | 255.879 | 135.61587    | 66.82 | 4276.39 |
| 4     | 10.96 | 22.14 | 0  | 0.4   | 0.91652 | 647.89 | 259.1549   | 593.79847  | 12.28 | 57.716  | 0.53  | 314.7132 | 22.14 | 271.879 | 144.095976   | 66.82 | 4329.18 |
| 5     | 10.96 | 20.96 | 0  | 0.5   | 0.86603 | 613.36 | 306.67834  | 531.18246  | 13.13 | 61.711  | 0.53  | 281.5267 | 20.96 | 275.205 | 145.858544   | 66.82 | 4098.45 |
| 6     | 10.96 | 18.09 | 0  | 0.6   | 0.8     | 529.37 | 317.62277  | 423.49703  | 14.45 | 67.915  | 0.53  | 224.4534 | 18.09 | 261.401 | 138.542265   | 66.82 | 3537.26 |
| 7     | 10.96 | 11.06 | 0  | 0.7   | 0.71414 | 323.65 | 226.55569  | 231.13304  | 12.32 | 57.904  | 0.53  | 122.5005 | 11.06 | 136.259 | 72.217376    | 66.82 | 2162.64 |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
| somme |       |       |    |       |         |        | 1429.7414  |            |       | 560.804 |       | 2244.439 |       |         |              |       | 30847.9 |

|     |          |
|-----|----------|
| Kss | 1.962063 |
| Kas | 0.643513 |

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=10.96**

**Tableau III.5**

| N°Tr | bi   | h1    | h2   | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli    | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|------|------|-------|------|-------|---------|--------|------------|------------|--------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -4   | 8,88 | 0,61  | 0    | -0,4  | 0,91652 | 14,463 | -5,785142  | 13,255426  | 2,8733 | 13,5045 | 0,53  | 7,025376 | 0,61  | 1,75271 | 0,92893789   | 51,81 | 74.9321 |
| -3   | 8,88 | 7,89  | 0    | -0,3  | 0,95394 | 187,07 | -56,12062  | 178,45221  | 6,2137 | 29,2044 | 0,53  | 94,57967 | 7,89  | 49,0261 | 25,9838293   | 51,81 | 969.203 |
| -2   | 8,88 | 12,17 | 1,92 | -0,2  | 0,9798  | 288,55 | -57,70917  | 282,71602  | 6,1763 | 29,0286 | 0,53  | 149,8395 | 12,17 | 75,1656 | 39,8377526   | 51,81 | 1494.96 |
| -1   | 8,88 | 15,58 | 3,74 | -0,1  | 0,99499 | 369,4  | -36,93956  | 367,54395  | 6,2137 | 29,2044 | 0,53  | 194,7983 | 15,58 | 96,8094 | 51,3090064   | 51,81 | 1913.84 |
| 0    | 8,88 | 18,98 | 4,63 | 0     | 1       | 450,01 | 0          | 450,00821  | 6,31   | 29,657  | 0,53  | 238,5044 | 18,98 | 119,764 | 63,474814    | 51,81 | 2331.49 |
| 1    | 8,88 | 22,39 | 4,62 | 0,1   | 0,99499 | 530,86 | 53,085794  | 528,19699  | 6,4811 | 30,4612 | 0,53  | 279,9444 | 22,39 | 145,112 | 76,9092694   | 51,81 | 2750.38 |
| 2    | 8,88 | 25,8  | 3,72 | 0,2   | 0,9798  | 611,71 | 122,34154  | 599,34868  | 6,746  | 31,7062 | 0,53  | 317,6548 | 25,8  | 174,047 | 92,244804    | 51,81 | 3169.26 |
| 3    | 8,88 | 29,2  | 1,91 | 0,3   | 0,95394 | 692,32 | 207,6961   | 660,43149  | 7,1401 | 33,5585 | 0,53  | 350,0287 | 29,2  | 208,491 | 110,500188   | 51,81 | 3586.91 |
| 4    | 8,88 | 31,71 | 0    | 0,4   | 0,91652 | 751,83 | 300,73257  | 689,06487  | 7,7316 | 36,3385 | 0,53  | 365,2044 | 31,71 | 245,169 | 129,939589   | 51,81 | 3895.24 |
| 5    | 8,88 | 31,23 | 0    | 0,5   | 0,86603 | 740,45 | 370,2254   | 641,24921  | 8,6681 | 40,7401 | 0,53  | 339,8621 | 31,23 | 270,705 | 143,473524   | 51,81 | 3836.28 |
| 6    | 8,88 | 29,5  | 0    | 0,6   | 0,8     | 699,43 | 419,65992  | 559,54656  | 10,348 | 48,6347 | 0,53  | 296,5597 | 29,5  | 305,26  | 161,787853   | 51,81 | 3623.76 |
| 7    | 8,88 | 25,75 | 0    | 0,7   | 0,71414 | 610,52 | 427,36554  | 436,00006  | 12,222 | 57,4439 |       |          | 25,75 |         |              |       |         |
| 8    | 8,88 | 20,55 |      | 0,8   | 0,6     |        |            |            |        |         |       |          | 20,55 |         |              |       |         |
| 9    | 8,88 | 12,14 |      | 0,9   | 0,43589 |        |            |            |        |         |       |          | 12,14 |         |              |       |         |

|       |  |  |  |  |  |  |           |  |  |         |  |          |  |  |  |  |         |
|-------|--|--|--|--|--|--|-----------|--|--|---------|--|----------|--|--|--|--|---------|
| somme |  |  |  |  |  |  | 1744,5524 |  |  | 409,482 |  | 2634,001 |  |  |  |  | 27646.2 |
|-------|--|--|--|--|--|--|-----------|--|--|---------|--|----------|--|--|--|--|---------|

Kss     1,74456  
Kas     0,73326

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=13,85**

**Tableau III.6**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2    | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli    | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|------------|------------|--------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -4    | 11.22 | 3.99  | 1.67  | -0.4  | 0.91652 | 119.53 | -47.81201  | 109.55108  | 3.991  | 3.2721  | 0.53  | 58.06207 | 3.99  | 15.9241 | 8.4397677    | 60.59 | 724.232 |
| -3    | 11.22 | 8.3   | 5.86  | -0.3  | 0.95394 | 248.65 | -74.59393  | 237.19357  | 6.6027 | 66.027  | 0.53  | 125.7126 | 8.3   | 54.8024 | 29.0452773   | 60.59 | 1506.55 |
| -2    | 11.22 | 12.6  | 8.76  | -0.2  | 0.9798  | 377.46 | -75.49265  | 369.83693  | 6.6561 | 66.561  | 0.53  | 196.0136 | 12.6  | 83.8669 | 44.4494358   | 60.59 | 2287.05 |
| -1    | 11.22 | 16.74 | 10.46 | -0.1  | 0.99499 | 501.49 | -50.14869  | 498.97314  | 6.7596 | 67.596  | 0.53  | 264.4558 | 16.74 | 113.156 | 59.9725231   | 60.59 | 3038.51 |
| 0     | 11.22 | 21.21 | 11.02 | 0     | 1       | 635.4  | 0          | 635.39645  | 6.9433 | 69.433  | 0.53  | 336.7601 | 21.21 | 147.267 | 78.0517183   | 60.59 | 3849.87 |
| 1     | 11.22 | 25.52 | 10.45 | 0.1   | 0.99499 | 764.51 | 76.451285  | 760.68068  | 7.2279 | 72.279  | 0.53  | 403.1608 | 25.52 | 184.456 | 97.7616842   | 60.59 | 4632.18 |
| 2     | 11.22 | 29.82 | 8.74  | 0.2   | 0.9798  | 893.33 | 178.66593  | 875.28074  | 7.6515 | 76.515  | 0.53  | 463.8988 | 29.82 | 228.168 | 120.928897   | 60.59 | 5412.68 |
| 3     | 11.22 | 34.13 | 5.83  | 0.3   | 0.95394 | 1022.4 | 306.73382  | 975.35138  | 8.2877 | 82.877  | 0.53  | 516.9362 | 34.13 | 282.859 | 149.915377   | 60.59 | 6195    |
| 4     | 11.22 | 38.43 | 1.63  | 0.4   | 0.91652 | 1151.3 | 460.50515  | 1055.1499  | 9.5502 | 95.502  | 0.53  | 559.2294 | 38.43 | 367.014 | 194.517519   | 60.59 | 6975.5  |
| 5     | 11.22 | 38.7  |       | 0.5   | 0.86603 | 1159.4 | 579.67569  | 1004.0277  | 10.856 | 108.556 | 0.53  | 532.1347 | 38.7  | 420.112 | 222.659212   | 60.59 | 7024.51 |
| 6     | 11.22 | 35.31 |       | 0.6   | 0.8     | 1057.8 | 634.67748  | 846.23664  | 7.209  | 72.09   | 0.53  | 448.5054 | 35.31 | 254.55  | 134.911389   | 60.59 | 6409.18 |
| 7     | 11.22 | 30.16 |       | 0.7   | 0.71414 |        |            |            |        |         |       |          | 30.16 |         |              |       |         |
| 8     | 11.22 | 19.57 |       | 0.8   | 0.6     |        |            |            |        |         |       |          | 19.57 |         |              |       |         |
| 9     | 11.22 | 1.15  |       |       |         |        |            |            |        |         |       |          | 1.15  |         |              |       |         |
| somme |       |       |       |       |         |        | 1988.6621  |            |        | 780.708 |       | 3904.869 |       |         | 1140.6528    |       | 48055.3 |

Kss     1.78257  
Kas     0.64945

# Stabilité pour le cas de fin de construction

R=14

TableauIII.7

| N°Tr | bi    | h1    | h2 | h3 | Sin α | Cos α | Gn    | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli  | C*dli | tangø | N*tangø | Ui   | Ui*dli | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|------|-------|-------|----|----|-------|-------|-------|------------|------------|------|-------|-------|---------|------|--------|--------------|-------|---------|
| -2   | 11.34 | 1.14  | 0  | 0  | -0.2  | 1.0   | 25.9  | -5.2       | 25.3       | 11.5 | 19.5  | 0.6   | 14.4    | 1.1  | 13.1   | 7.5          | 128.9 | 333.3   |
| -1   | 11.34 | 7.21  | 0  | 0  | -0.1  | 1.0   | 163.5 | -16.4      | 162.7      | 11.4 | 19.3  | 0.6   | 92.7    | 7.2  | 81.8   | 46.6         | 128.9 | 2107.8  |
| 0    | 11.34 | 11.67 | 0  | 0  | 0     | 1.0   | 264.7 | 0.0        | 264.7      | 11.4 | 19.3  | 0.6   | 150.9   | 11.7 | 132.5  | 75.5         | 128.9 | 3411.7  |
| 1    | 11.34 | 15.9  | 0  | 0  | 0.1   | 1.0   | 360.6 | 36.1       | 358.8      | 11.5 | 19.5  | 0.6   | 204.5   | 15.9 | 182.7  | 104.1        | 128.9 | 4648.3  |
| 2    | 11.34 | 18.58 | 0  | 0  | 0.2   | 1.0   | 421.4 | 84.3       | 412.9      | 11.7 | 19.9  | 0.6   | 235.3   | 18.6 | 217.6  | 124.0        | 128.9 | 5431.8  |
| 3    | 11.34 | 19.94 | 0  | 0  | 0.3   | 1.0   | 452.2 | 135.7      | 431.4      | 12.1 | 20.6  | 0.6   | 245.9   | 19.9 | 241.5  | 137.6        | 128.9 | 5829.4  |
| 4    | 11.34 | 20.04 | 0  | 0  | 0.4   | 0.9   | 454.5 | 181.8      | 416.6      | 12.7 | 21.6  | 0.6   | 237.4   | 20.0 | 254.5  | 145.1        | 128.9 | 5858.6  |
| 5    | 11.34 | 18.66 | 0  | 0  | 0.5   | 0.9   | 423.2 | 211.6      | 366.5      | 13.6 | 23.1  | 0.6   | 208.9   | 18.7 | 253.6  | 144.5        | 128.9 | 5455.2  |
| 6    | 11.34 | 15.52 | 0  | 0  | 0.6   | 0.8   | 352.0 | 211.2      | 281.6      | 15.0 | 25.4  | 0.6   | 160.5   | 15.5 | 232.0  | 132.3        | 128.9 | 4537.2  |
| 7    | 11.34 | 10.12 | 0  | 0  | 0.7   | 0.7   | 229.5 | 160.7      | 163.9      | 17.2 | 29.3  | 0.6   | 93.4    | 10.1 | 174.3  | 99.3         | 128.9 | 2958.5  |
| 8    | 11.34 | 1.21  |    |    | 0.8   | 0.6   |       |            |            |      |       |       |         | 1.21 |        |              |       |         |

|       |  |  |  |  |  |  |  |           |           |  |        |  |          |  |         |            |  |       |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|-----------|-----------|--|--------|--|----------|--|---------|------------|--|-------|
| somme |  |  |  |  |  |  |  | 600854.01 | 1733514.5 |  | 130716 |  | 988103.3 |  | 1071876 | 610969.416 |  | 2E+07 |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|-----------|-----------|--|--------|--|----------|--|---------|------------|--|-------|

Kss 1.86205

Kas 0.54504

**Stabilité pour le cas de fin de construction**  
**R=14 ,77**

**TableauIII.8**

| N°Tr  | bi    | h1   | h2 | h3 | Sin<br>$\alpha$ | Cos<br>$\alpha$ | Gn      | T=Gn*Sin $\alpha$ | N=Gn*Cos $\alpha$ | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø   | Ui    | Ui*dli    | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|------|----|----|-----------------|-----------------|---------|-------------------|-------------------|-------|---------|-------|-----------|-------|-----------|--------------|-------|---------|
| -2    | 11,34 | 1,14 | 0  | 0  | 0,2             | 0,98            | 25,8552 | -5,17104          | 25,332819         | 11,47 | 19,499  | 0,57  | 14,439707 | 1,14  | 13,0758   | 7,453206     | 128,9 | 929.448 |
| -1    | 11,34 | 7,21 | 0  | 0  | 0,1             | 0,99            | 163,523 | -16,3523          | 162,70313         | 11,35 | 19,295  | 0,57  | 92,740785 | 7,21  | 81,8335   | 46,6451      | 128,9 | 2064.39 |
| 0     | 11,34 | 11,7 | 0  | 0  | 0               | 1               | 264,676 | 0                 | 264,6756          | 11,35 | 19,295  | 0,57  | 150,86509 | 11,67 | 132,4545  | 75,49907     | 128,9 | 3076.03 |
| 1     | 11,34 | 15,9 | 0  | 0  | 0,1             | 0,99            | 360,612 | 36,0612           | 358,80441         | 11,49 | 19,533  | 0,57  | 204,51851 | 15,9  | 182,691   | 104,1339     | 128,9 | 4560.3  |
| 2     | 11,34 | 18,6 | 0  | 0  | 0,2             | 0,98            | 421,394 | 84,27888          | 412,8805          | 11,71 | 19,907  | 0,57  | 235,34189 | 18,58 | 217,5718  | 124,0159     | 128,9 | 4963.38 |
| 3     | 11,34 | 19,9 | 0  | 0  | 0,3             | 0,95            | 452,239 | 135,6718          | 431,4087          | 12,11 | 20,587  | 0,57  | 245,90296 | 19,94 | 241,4734  | 137,6398     | 128,9 | 5091.41 |
| 4     | 11,34 | 20   | 0  | 0  | 0,4             | 0,92            | 454,507 | 181,8029          | 416,56273         | 12,7  | 21,59   | 0,57  | 237,44076 | 20,04 | 254,508   | 145,0696     | 128,9 | 5142    |
| 5     | 11,34 | 18,7 | 0  | 0  | 0,5             | 0,87            | 423,209 | 211,6044          | 366,50957         | 13,59 | 23,103  | 0,57  | 208,91046 | 18,66 | 253,5894  | 144,546      | 128,9 | 4987.09 |
| 6     | 11,34 | 15,5 | 0  | 0  | 0,6             | 0,8             | 351,994 | 211,1962          | 281,59488         | 14,95 | 25,415  | 0,57  | 160,50908 | 15,52 | 232,024   | 132,2537     | 128,9 | 4452.81 |
| 7     | 11,34 | 10,1 | 0  | 0  | 0,7             | 0,71            | 229,522 | 160,6651          | 163,91121         | 17,22 | 29,274  | 0,57  | 93,429389 | 10,12 | 174,2664  | 99,33185     | 128,9 | 3104.48 |
| 8     | 11,34 | 1,21 |    |    | 0,8             | 0,6             |         |                   |                   |       |         |       |           | 1,21  |           |              |       |         |
| somme |       |      |    |    |                 |                 |         | 999,7571          | 2884,3836         |       | 217,498 |       | 1644,0986 |       | 1783,4878 | 1016,588     |       | 39316.6 |

Kss            1,86205  
Kas            0,78444

**Stabilité pour le cas de service**  
**R=14**  
**Tableau III.9**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2 | Sin $\alpha$ | Cos $\alpha$ | Gn     | T=Gn*Sin $\alpha$ | N=Gn*Cos $\alpha$ | dli   | C*dli  | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|----|--------------|--------------|--------|-------------------|-------------------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -2    | 11,34 | 1,14  |    | -0,2         | 0,9798       | 34,517 | -6,903338         | 33,819313         | 11,49 | 58,599 | 0,53  | 17,92424 | 1,14  | 13,0986 | 6,942258     | 50,29 | 173.584 |
| -1    | 11,34 | 7,21  |    | -0,1         | 0,99499      | 218,3  | -21,83029         | 217,20868         | 11,34 | 57,834 | 0,53  | 115,1206 | 7,21  | 81,7614 | 43,333542    | 50,29 | 1097.85 |
| 0     | 11,34 | 11,67 |    | 0            | 1            | 353,34 | 0                 | 353,34193         | 11,35 | 57,885 | 0,53  | 187,2712 | 11,67 | 132,455 | 70,200885    | 50,29 | 1776.96 |
| 1     | 11,34 | 15,9  |    | 0,1          | 0,99499      | 481,42 | 48,141702         | 479,00389         | 11,23 | 57,273 | 0,53  | 253,8721 | 15,9  | 178,557 | 94,63521     | 50,29 | 2421.05 |
| 2     | 11,34 | 18,53 |    | 0,2          | 0,9798       | 561,05 | 112,20953         | 549,71217         | 11,71 | 59,721 | 0,53  | 291,3475 | 18,53 | 216,986 | 115,002739   | 50,29 | 2821.51 |
| 3     | 11,34 | 19,94 |    | 0,3          | 0,95394      | 603,74 | 181,1218          | 575,93062         | 12,11 | 61,761 | 0,53  | 305,2432 | 19,94 | 241,473 | 127,980902   | 50,29 | 3036.21 |
| 4     | 11,34 | 19,55 |    | 0,4          | 0,91652      | 591,93 | 236,7724          | 542,51371         | 13,39 | 68,289 | 0,53  | 287,5323 | 19,55 | 261,775 | 138,740485   | 50,29 | 2976.82 |
| 5     | 11,34 | 18,66 |    | 0,5          | 0,86603      | 564,98 | 282,49187         | 489,29028         | 13,05 | 66,555 | 0,53  | 259,3238 | 18,66 | 243,513 | 129,06189    | 50,29 | 2841.3  |
| 6     | 11,34 | 14,82 |    | 0,6          | 0,8          | 448,72 | 269,2302          | 358,9736          | 15,01 | 76,551 | 0,53  | 190,256  | 14,82 | 222,448 | 117,897546   | 50,29 | 2256.6  |
| 7     | 11,34 | 9,62  |    | 0,7          | 0,71414      | 291,27 | 203,89071         | 208,01013         | 17,22 | 87,822 | 0,53  | 110,2454 | 9,62  | 165,656 | 87,797892    | 50,29 | 1464.81 |
| 8     | 11,34 | 1,52  |    | 0,8          | 0,6          | 46,022 | 36,817805         | 27,613354         |       | 0      | 0,53  | 14,63508 | 1,52  | 0       | 0            | 50,29 | 231.446 |
| somme |       |       |    |              |              |        | 1341,9424         |                   |       | 652,29 |       | 2032,771 |       |         |              |       | 21098.1 |

Kss 2,000877  
Kas 0,942474

**Stabilité pour le cas de service**  
**R=10.96**

**Tableau III.10**

| N°Tr  | bi   | h1    | h2 | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Ssin α | N=Gn*Ccos α | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|------|-------|----|-------|---------|--------|-------------|-------------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -4    | 8,88 | 0,61  | 0  | -0,4  | 0,91652 | 14,463 | -5,785142   | 13,255426   | 9,69  | 49,419  | 0,53  | 7,025376 | 0,61  | 5,9109  | 3,132777     | 65,09 | 94.1387 |
| -3    | 8,88 | 7,89  | 0  | -0,3  | 0,95394 | 187,07 | -56,12062   | 178,45221   | 9,31  | 47,481  | 0,53  | 94,57967 | 7,89  | 73,4559 | 38,931627    | 65,09 | 1217.63 |
| -2    | 8,88 | 12,17 | 0  | -0,2  | 0,9798  | 288,55 | -57,70917   | 282,71602   | 9,06  | 46,206  | 0,53  | 149,8395 | 12,17 | 110,26  | 58,437906    | 65,09 | 1878.14 |
| -1    | 8,88 | 15,58 | 0  | -0,1  | 0,99499 | 369,4  | -36,93956   | 367,54395   | 8,92  | 45,492  | 0,53  | 194,7983 | 15,58 | 138,974 | 73,656008    | 65,09 | 2404.4  |
| 0     | 8,88 | 18,98 | 0  | 0     | 1       | 450,01 | 0           | 450,00821   | 8,96  | 45,696  | 0,53  | 238,5044 | 18,98 | 170,061 | 90,132224    | 65,09 | 2929.1  |
| 1     | 8,88 | 25,8  | 0  | 0,1   | 0,99499 | 611,71 | 61,170768   | 608,64146   | 8,96  | 45,696  | 0,53  | 322,58   | 25,8  | 231,168 | 122,51904    | 65,09 | 3981.61 |
| 2     | 8,88 | 29,2  | 0  | 0,2   | 0,9798  | 692,32 | 138,46406   | 678,33261   | 9,06  | 46,206  | 0,53  | 359,5163 | 29,2  | 264,552 | 140,21256    | 65,09 | 4506.31 |
| 3     | 8,88 | 31,71 | 0  | 0,3   | 0,95394 | 751,83 | 225,54942   | 717,20146   | 9,31  | 47,481  | 0,53  | 380,1168 | 31,71 | 295,22  | 156,466653   | 65,09 | 4893.67 |
| 4     | 8,88 | 21,23 | 0  | 0,4   | 0,91652 | 503,35 | 201,34192   | 461,3323    | 9,69  | 49,419  | 0,53  | 244,5061 | 21,23 | 205,719 | 109,030911   | 65,09 | 3276.34 |
| 5     | 8,88 | 29,5  | 0  | 0,5   | 0,86603 | 699,43 | 349,7166    | 605,72692   | 10,26 | 52,326  | 0,53  | 321,0353 | 29,5  | 302,67  | 160,4151     | 65,09 | 4552.61 |
| 6     | 8,88 | 26,22 | 0  | 0,6   | 0,8     | 621,67 | 372,99943   | 497,33257   | 11,11 | 56,661  | 0,53  | 263,5863 | 26,22 | 291,304 | 154,391226   | 65,09 | 4046.42 |
| 7     | 8,88 | 20,55 |    | 0,7   | 0,71414 |        |             |             | 12,56 | 64,056  |       |          | 20,55 | 258,108 |              |       |         |
| 8     | 8,88 | 12,14 |    | 0,8   | 0,6     |        |             |             | 14,9  | 75,99   |       |          | 12,14 | 180,886 |              |       |         |
| 9     | 8,88 | 0     |    | 0,9   | 0,43589 |        |             |             |       |         |       |          | 0     |         |              |       |         |
| somme |      |       |    |       |         |        | 1192,6877   |             |       | 672,129 |       | 2576,088 |       |         |              |       | 33780.4 |

Kss 2,72344

Kas 0,75985

**Stabilité pour le cas de fonctionnement normale**  
**R=13.85**

**Tableau III.11**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2    | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|------------|------------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -4    | 11,22 | 4,23  | 1,67  | -0,4  | 0,91652 | 176,37 | -70,54956  | 161,64936  | 11,98 | 61,098  | 0,53  | 85,67416 | 4,23  | 50,6754 | 26,857962    | 61,23 | 1079.94 |
| -3    | 11,22 | 8,3   | 5,86  | -0,3  | 0,95394 | 422,88 | -126,8645  | 403,40353  | 11,43 | 58,293  | 0,53  | 213,8039 | 8,3   | 94,869  | 50,28057     | 61,23 | 2589.31 |
| -2    | 11,22 | 12,6  | 8,76  | -0,2  | 0,9798  | 637,92 | -127,5849  | 625,03563  | 11,35 | 57,885  | 0,53  | 331,2689 | 12,6  | 143,01  | 75,7953      | 61,23 | 3906.01 |
| -1    | 11,22 | 16,96 | 10,46 | -0,1  | 0,99499 | 819,08 | -81,90847  | 814,97897  | 11,23 | 57,273  | 0,53  | 431,9389 | 16,96 | 190,461 | 100,944224   | 61,23 | 5015.26 |
| 0     | 11,22 | 21,21 | 11,02 | 0     | 1       | 963,05 | 0          | 963,05411  | 11,22 | 57,222  | 0,53  | 510,4187 | 21,21 | 237,976 | 126,127386   | 61,23 | 5896.78 |
| 1     | 11,22 | 25,52 | 10,45 | 0,1   | 0,99499 | 1075,2 | 107,52227  | 1069,8331  | 11,22 | 57,222  | 0,53  | 567,0115 | 25,52 | 286,334 | 151,757232   | 61,23 | 6583.59 |
| 2     | 11,22 | 29,82 | 8,74  | 0,2   | 0,9798  | 1153,2 | 230,63922  | 1129,8968  | 11,85 | 60,435  | 0,53  | 598,8453 | 29,82 | 353,367 | 187,28451    | 61,23 | 7061.02 |
| 3     | 11,22 | 34,13 | 5,83  | 0,3   | 0,95394 | 1195,8 | 358,73684  | 1140,7104  | 11,79 | 60,129  | 0,53  | 604,5765 | 34,13 | 402,393 | 213,268131   | 61,23 | 7321.82 |
| 4     | 11,22 | 38,43 | 1,63  | 0,4   | 0,91652 | 1199,7 | 479,89107  | 1099,5686  | 12,57 | 64,107  | 0,53  | 582,7713 | 38,43 | 483,065 | 256,024503   | 61,23 | 7345.93 |
| 5     | 11,22 | 38,7  |       | 0,5   | 0,86603 | 1159,4 | 579,67569  | 1004,0277  | 13,53 | 13,53   | 0,38  | 381,5305 | 0     | 0       | 0            | 61,23 | 7098.71 |
| 6     | 11,22 | 35,31 |       | 0,6   | 0,8     |        |            |            | 14,85 | 14,85   |       |          |       |         |              |       | 0       |
| 7     | 11,22 | 30,16 |       | 0,7   | 0,71414 |        |            |            | 17,03 |         |       |          |       |         |              |       | 0       |
| 8     | 11,22 | 19,75 |       | 0,8   | 0,6     |        |            |            | 21,57 |         |       |          |       |         |              |       | 0       |
| 9     | 11,22 | 1,15  |       | 0,9   | 0,43589 |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
| somme |       |       |       |       |         |        | 1349,5576  |            |       | 562,044 |       | 4307,84  |       |         |              |       | 46425.3 |

|     |          |
|-----|----------|
| Kss | 3.608504 |
| Kas | 0.929166 |

**Stabilité pour le cas de service**  
**R=14.77**

**Tableau III.12**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2 | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|----|-------|---------|--------|------------|------------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -3    | 11,96 | 5,38  | 0  | -0,3  | 0,95394 | 171,8  | -51,54018  | 163,88734  | 12,36 | 63,036  | 0,53  | 86,86029 | 5,38  | 66,4968 | 35,243304    | 53,24 | 914.666 |
| -2    | 11,96 | 13,06 | 0  | -0,2  | 0,9798  | 417,05 | -83,40952  | 408,62152  | 12,24 | 62,424  | 0,53  | 216,5694 | 13,06 | 159,854 | 84,722832    | 53,24 | 2220.36 |
| -1    | 11,96 | 19,46 | 0  | -0,1  | 0,99499 | 621,42 | -62,14201  | 618,30516  | 11,97 | 61,047  | 0,53  | 327,7017 | 19,46 | 232,936 | 123,456186   | 53,24 | 3308.44 |
| 0     | 11,96 | 24,26 | 0  | 0     | 1       | 774,7  | 0          | 774,69943  | 11,98 | 61,098  | 0,53  | 410,5907 | 24,26 | 290,635 | 154,036444   | 53,24 | 4124.5  |
| 1     | 11,96 | 28,63 | 0  | 0,1   | 0,99499 | 914,25 | 91,424752  | 909,66479  | 11,96 | 60,996  | 0,53  | 482,1223 | 28,63 | 342,415 | 181,479844   | 53,24 | 4867.45 |
| 2     | 11,96 | 31,4  | 0  | 0,2   | 0,9798  | 1002,7 | 200,5405   | 982,44378  | 12,36 | 63,036  | 0,53  | 520,6952 | 31,4  | 388,104 | 205,69512    | 53,24 | 5338.39 |
| 3     | 11,96 | 32,9  | 0  | 0,3   | 0,95394 | 1050,6 | 315,18068  | 1002,2107  | 12,77 | 65,127  | 0,53  | 531,1717 | 32,9  | 420,133 | 222,67049    | 53,24 | 5593.41 |
| 4     | 11,96 | 33    | 0  | 0,4   | 0,91652 | 1053,8 | 421,51824  | 965,81962  | 12,77 | 65,127  | 0,53  | 511,8844 | 33    | 421,41  | 223,3473     | 53,24 | 5610.41 |
| 5     | 11,96 | 31,27 | 0  | 0,5   | 0,86603 | 998,55 | 499,27558  | 864,77068  | 13,4  | 68,34   | 0,53  | 458,3285 | 31,27 | 419,018 | 222,07954    | 53,24 | 5316.29 |
| 6     | 11,96 | 28,17 | 0  | 0,6   | 0,8     | 899,56 | 539,73495  | 719,6466   | 14,34 | 73,134  | 0,53  | 381,4127 | 28,17 | 403,958 | 214,097634   | 53,24 | 4789.25 |
| 7     | 11,96 | 19,64 | 0  | 0,7   | 0,71414 | 627,17 | 439,01763  | 447,88757  | 15,86 | 80,886  | 0,53  | 237,3804 | 19,64 | 311,49  | 165,089912   | 53,24 | 3339.04 |
| 8     | 11,96 | 5,9   | 0  | 0,8   | 0,6     | 188,41 | 150,7247   | 113,04353  | 18,15 | 92,565  | 0,53  | 59,91307 | 5,9   | 107,085 | 56,75505     | 53,24 | 1003.07 |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
|       |       |       |    |       |         |        |            |            |       |         |       |          |       |         |              |       |         |
| somme |       |       |    |       |         |        | 2460,3253  |            |       | 816,816 |       | 4224,63  |       |         |              |       | 74280,4 |

Kss      2,0491  
Kas      0.89969

**Stabilité pour le cas du Vidange Rapide**  
**R=13.25**

**Tableau III.13**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2   | h3 | Sin<br>$\alpha$ | Cos $\alpha$ | Gn      | T=Gn*S<br>$\alpha$ | N=Gn*C<br>$\alpha$ | dli   | C*dli | tangø | N*tangø  | Ui   | Ui*dli | Ui*dli*tangø | dn     | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|------|----|-----------------|--------------|---------|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|----------|------|--------|--------------|--------|---------|
| -2    | 10,73 | 4,65  | 0,22 | 0  | -0,2            | 0,9798       | 5,66544 | 1,133088           | 5,55097            | 10,86 | 1,09  | 0,67  | 3,719153 | 0,22 | 2,3892 | 1,600764     | 117,3  | 94.1387 |
| -1    | 10,73 | 8,92  | 1,85 | 0  | -0,1            | 0,995        | 47,6412 | -4,76412           | 47,4024            | 10,75 | 1,08  | 0,67  | 31,7596  | 1,85 | 19,888 | 13,324625    | 117,26 | 1217.63 |
| 0     | 10,73 | 13,19 | 2,39 | 0  | 0               | 1            | 61,5473 | 0                  | 61,5473            | 10,75 | 1,08  | 0,67  | 41,23668 | 2,39 | 25,693 | 17,213975    | 117,26 | 1878.14 |
| 1     | 10,73 | 17,47 | 1,85 | 0  | 0,1             | 0,995        | 47,6412 | 4,76412            | 47,4024            | 10,75 | 1,08  | 0,67  | 31,7596  | 1,85 | 19,888 | 13,324625    | 117,26 | 2404.4  |
| 2     | 10,73 | 21,96 | 0,22 | 0  | 0,2             | 0,9798       | 5,66544 | 1,133088           | 5,55097            | 10,86 | 1,09  | 0,67  | 3,719153 | 0,22 | 2,3892 | 1,600764     | 117,26 | 2929.1  |
| 3     | 10,73 | 23,46 |      | 0  | 0,3             | 0,9539       | 0       | 0                  | 0                  | 11,09 | 1,11  | 0,67  | 0        | 0    | 0      | 0            | 117,26 | 3981.61 |
| 4     | 10,73 | 23,72 |      | 0  | 0,4             | 0,9165       | 0       | 0                  | 0                  | 11,46 | 1,15  | 0,67  | 0        | 0    | 0      | 0            | 117,26 | 4506.31 |
| 5     | 10,73 | 22,57 |      | 0  | 0,5             | 0,866        | 0       | 0                  | 0                  | 11,59 | 1,16  | 0,67  | 0        | 0    | 0      | 0            | 117,26 | 4893.67 |
| 6     | 10,73 | 19,79 |      | 0  | 0,6             | 0,8          | 0       | 0                  | 0                  | 12,86 | 1,29  | 0,67  | 0        | 0    | 0      | 0            | 117,26 | 3276.34 |
| 7     | 10,73 | 14,82 |      | 0  | 0,7             | 0,7141       | 381,645 | 267,1512           | 272,549            | 14,24 | 1,42  | 0,67  | 182,6077 | 0    | 0      | 0            | 117,26 | 4552.61 |
| 8     | 10,73 | 6,84  |      |    | 0,8             | 0,6          |         |                    |                    | 16,29 | 1,63  |       |          |      |        |              |        |         |
| somme |       |       |      |    |                 |              |         | 267,1512           |                    |       | 13,2  |       | 294,8019 |      |        | 47,064753    |        | 33780.4 |

Kss 2.72344  
Kas 0.75985

# Stabilité pour le cas du Vidange Rapide

R=11.04

TableauIII.14

| N°Tr  | bi   | h1    | h2   | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli  | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|------|-------|------|-------|---------|--------|------------|------------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -5    | 8,94 | 2,8   | 0,83 | -0,5  | 0,86603 | 46,496 | -23,24802  | 40,266757  | 10,02 | 120,24 | 0,53  | 21,34138 | 2,8   | 28,056  | 14,86968     | 75,13 | 349.325 |
| -4    | 8,94 | 10,05 | 4,18 | -0,4  | 0,91652 | 195,55 | -78,22107  | 179,22698  | 9,55  | 114,6  | 0,53  | 94,9903  | 10,05 | 95,9775 | 50,868075    | 75,13 | 1469.19 |
| -3    | 8,94 | 13,61 | 6,5  | -0,3  | 0,95394 | 284,86 | -85,45726  | 271,73678  | 9,24  | 110,88 | 0,53  | 144,0205 | 13,61 | 125,756 | 66,650892    | 75,13 | 2140.13 |
| -2    | 8,94 | 17,17 | 7,86 | -0,2  | 0,9798  | 351,25 | -70,24948  | 344,15078  | 9,05  | 108,6  | 0,53  | 182,3999 | 17,17 | 155,389 | 82,355905    | 75,13 | 2638.92 |
| -1    | 8,94 | 24,29 | 8,31 | -0,1  | 0,99499 | 429,84 | -42,98427  | 427,6881   | 8,95  | 107,4  | 0,53  | 226,6747 | 24,29 | 217,396 | 115,219615   | 75,13 | 3229.41 |
| 0     | 8,94 | 27,85 | 7,86 | 0     | 1       | 453,03 | 0          | 453,02824  | 8,9   | 106,8  | 0,53  | 240,105  | 27,85 | 247,865 | 131,36845    | 75,13 | 3403.6  |
| 1     | 8,94 | 31,41 | 6,51 | 0,1   | 0,99499 | 454,73 | 45,473095  | 452,45159  | 9,04  | 108,48 | 0,53  | 239,7993 | 31,41 | 283,946 | 150,491592   | 75,13 | 3416.39 |
| 2     | 8,94 | 34,94 | 4,2  | 0,2   | 0,9798  | 433,23 | 86,646552  | 424,47968  | 9,24  | 110,88 | 0,53  | 224,9742 | 34,94 | 322,846 | 171,108168   | 75,13 | 3254.88 |
| 3     | 8,94 | 38,54 | 0,85 | 0,3   | 0,95394 | 387,58 | 116,27312  | 369,72496  | 9,55  | 114,6  | 0,53  | 195,9542 | 38,54 | 368,057 | 195,07021    | 75,13 | 2911.87 |
| 4     | 8,94 | 38,43 |      | 0,4   | 0,91652 | 366,24 | 146,49577  | 335,66399  | 10,02 | 120,24 | 0,53  | 177,9019 | 38,43 | 385,069 | 204,086358   | 75,13 | 2751.56 |
| 5     | 8,94 | 35,88 |      | 0,5   | 0,86603 | 341,94 | 170,96892  | 296,12685  | 10,71 | 128,52 | 0,53  | 156,9472 | 0     | 0       | 0            | 75,13 | 2568.98 |
| 6     | 8,94 | 31,98 |      | 0,6   | 0,8     | 304,77 | 182,86241  | 243,81654  | 11,78 | 141,36 |       |          | 0     | 0       |              |       |         |
| 7     | 8,94 | 25,34 |      | 0,7   | 0,71414 | 241,49 | 169,04385  | 172,45922  | 13,67 | 164,04 |       |          |       |         |              |       |         |
| 8     | 8,94 | 11,36 |      | 0,8   | 0,6     | 108,26 | 86,609004  | 64,956753  | 17,18 | 206,16 |       |          |       |         |              |       |         |
| somme |      |       |      |       |         |        | 704,21261  |            |       | 1762,8 |       | 1905,109 |       |         | 1182,08895   |       | 28134.3 |

Kss 3.529928

Kas 0.764255

**Stabilité pour le cas du Vidange Rapide**  
**R=12.81**  
**Tableau III.15**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2   | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli    | C*dli   | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|------|-------|---------|--------|------------|------------|--------|---------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -4    | 10,38 | 4,1   | 0    | -0,4  | 0,91652 | 45,367 | -18,14673  | 41,579385  | 11,08  | 77,56   | 0,28  | 11,64223 | 4,1   | 45,428  | 12,71984     | 58,24 | 264.216 |
| -3    | 10,38 | 12,12 | 0    | -0,3  | 0,95394 | 134,11 | -40,23263  | 127,93161  | 10,72  | 75,04   | 0,28  | 35,82085 | 12,12 | 129,926 | 36,379392    | 58,24 | 781.049 |
| -2    | 10,38 | 15,97 | 2,96 | -0,2  | 0,9798  | 258,74 | -51,74891  | 253,51684  | 10,5   | 73,5    | 0,28  | 70,98472 | 15,97 | 167,685 | 46,9518      | 58,24 | 1506.93 |
| -1    | 10,38 | 20,1  | 4,54 | -0,1  | 0,99499 | 348,23 | -34,82324  | 346,48686  | 10,39  | 72,73   | 0,28  | 97,01632 | 20,1  | 208,839 | 58,47492     | 58,24 | 2028.11 |
| 0     | 10,38 | 24,23 | 5,06 | 0     | 1       | 408,34 | 0          | 408,34276  | 10,39  | 72,73   | 0,28  | 114,336  | 24,23 | 251,75  | 70,489916    | 58,24 | 2378.19 |
| 1     | 10,38 | 28,36 | 4,53 | 0,1   | 0,99499 | 439,35 | 43,935281  | 437,15052  | 10,558 | 73,906  | 0,28  | 122,4021 | 28,36 | 299,425 | 83,8389664   | 58,24 | 2558.79 |
| 2     | 10,38 | 32,5  | 2,96 | 0,2   | 0,9798  | 441,65 | 88,330063  | 432,72717  | 10,72  | 75,04   | 0,28  | 121,1636 | 32,5  | 348,4   | 97,552       | 58,24 | 2572.17 |
| 3     | 10,38 | 36,63 | 0    | 0,3   | 0,95394 | 405,31 | 121,59416  | 386,6448   | 11,4   | 79,8    | 0,28  | 108,2605 | 36,63 | 417,582 | 116,92296    | 58,24 | 2360.55 |
| 4     | 10,38 | 36,66 | 0    | 0,4   | 0,91652 | 405,65 | 162,25833  | 371,78055  | 11,44  | 80,08   | 0,28  | 104,0986 | 36,66 | 419,39  | 117,429312   | 58,24 | 2362.48 |
| 5     | 10,38 | 36,04 | 0    | 0,5   | 0,86603 | 398,79 | 199,39274  | 345,35836  | 12,43  | 87,01   | 0,28  | 96,70034 | 36,04 | 447,977 | 125,433616   | 58,24 | 2322.53 |
| 6     | 10,38 | 33,32 | 0    | 0,6   | 0,8     | 368,69 | 221,21308  | 294,95077  | 13,77  | 96,39   | 0,28  | 82,58622 | 33,32 | 458,816 | 128,468592   | 58,24 | 2147.24 |
| 7     | 10,38 | 28,85 | 0    | 0,7   | 0,71414 | 319,23 | 223,45929  | 227,97408  | 15,75  | 110,25  | 0,28  | 63,83274 | 28,85 | 454,388 | 127,2285     | 58,24 | 1859.18 |
| 8     | 10,38 | 17,01 | 1,53 | 0,8   | 0,6     | 230,62 | 184,49628  | 138,37221  | 12,02  | 84,14   | 0,28  | 38,74422 | 1,53  | 18,3906 | 5,149368     | 58,24 | 1343.13 |
|       |       |       |      |       |         |        |            |            |        |         |       |          |       |         |              |       |         |
| somme |       |       |      |       |         |        | 1099,7277  |            |        | 1058,18 |       | 1067,588 |       |         | 1027,03918   |       | 24484.6 |

Kss      0.999088  
Kas      0.364893

**Stabilité pour le cas du Vidange Rapide**  
**R=13.53**

**Tableau III.16**

| N°Tr  | bi    | h1    | h2 | Sin α | Cos α   | Gn     | T=Gn*Sin α | N=Gn*Cos α | dli   | C*dli  | tangø | N*tangø  | Ui    | Ui*dli  | Ui*dli*tangø | dn    | a*Gn*dn |
|-------|-------|-------|----|-------|---------|--------|------------|------------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| -2    | 10,96 | 2,89  | 0  | -0,2  | 0,9798  | 33,765 | -6,752982  | 33,082721  | 11,09 | 66,54  | 0,53  | 17,53384 | 2,89  | 32,0501 | 16,986553    | 63,74 | 215.218 |
| -1    | 10,96 | 8,92  | 0  | -0,1  | 0,99499 | 104,22 | -10,42156  | 103,69318  | 10,97 | 65,82  | 0,53  | 54,95739 | 8,92  | 97,8524 | 51,861772    | 63,74 | 664.27  |
| 0     | 10,96 | 13,83 | 0  | 0     | 1       | 161,58 | 0          | 161,58087  | 10,97 | 65,82  | 0,53  | 85,63786 | 13,83 | 151,715 | 80,409003    | 63,74 | 1029.92 |
| 1     | 10,96 | 17,65 | 0  | 0,1   | 0,99499 | 206,21 | 20,62113   | 205,17766  | 11,09 | 66,54  | 0,53  | 108,7442 | 17,65 | 195,739 | 103,741405   | 63,74 | 1314.39 |
| 2     | 10,96 | 20,35 | 0  | 0,2   | 0,9798  | 237,76 | 47,551275  | 232,95272  | 11,32 | 67,92  | 0,53  | 123,4649 | 20,35 | 230,362 | 122,09186    | 63,74 | 1515.46 |
| 3     | 10,96 | 21,87 | 0  | 0,3   | 0,95394 | 255,52 | 76,654525  | 243,74585  | 11,7  | 70,2   | 0,53  | 129,1853 | 21,87 | 255,879 | 135,61587    | 63,74 | 1628.65 |
| 4     | 10,96 | 22,14 | 0  | 0,4   | 0,91652 | 258,67 | 103,46784  | 237,0746   | 12,28 | 73,68  | 0,53  | 125,6495 | 22,14 | 271,879 | 144,095976   | 63,74 | 1648.76 |
| 5     | 10,96 | 20,96 | 0  | 0,5   | 0,86603 | 244,88 | 122,44161  | 212,07509  | 13,13 | 78,78  | 0,53  | 112,3998 | 20,96 | 275,205 | 145,858544   | 63,74 | 1560.89 |
| 6     | 10,96 | 18,09 | 0  | 0,6   | 0,8     | 211,35 | 126,81119  | 169,08159  | 14,45 | 86,7   | 0,53  | 89,61324 | 18,09 | 261,401 | 138,542265   | 63,74 | 1347.16 |
| 7     | 10,96 | 11,06 |    | 0,7   | 0,71414 | 129,22 | 90,452573  | 92,280082  | 12,32 | 73,92  | 0,53  | 48,90844 | 0     | 0       | 0            | 63,74 | 823.635 |
| somme |       |       |    |       |         |        | 570,8256   |            |       | 715,92 |       | 896,0945 |       |         | 939,203248   |       | 11748.3 |

Kss      1.178663  
Kas      0.467508