
Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement
Mémoire de de fin d'études

***Etude hydrologique et hydraulique d'un sous
bassin versant atlasique de la région
d'Oukaimeden, Province d'Al Haouz, (Maroc)***

Réalisé par :

CHERKAOUI HANOUN DOUNIA

Soutenu le : 16/03/2022

Devant le jury composé de :

SAIDI Mohamed El Mehdi: (FST- Marrakech), Encadrant interne.

ABOUNKI Intissar : (ABHT-Marrakech), Encadrante externe.

Mr. BENKKEDOUR Abdelfattah: (FST- Marrakech), Examineur.

Dédicace :

A mes chers parents

Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Vous n'avez cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, vous avez toujours été présents à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.

Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter.

Chers frère et sœur

Qui étaient toujours présents pour moi dans le bonheur comme dans le malheur

Mes chers grands-parents

Grace à vous je n'ai jamais manqué de soutien, d'amour, d'humeur et de leçons de vie

A ma famille et mes proches

Merci.

Remerciment :

Je tiens tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, de m'avoir donné la foi, la force et la patience et qui m'a permis d'en arriver là.

Je remercie aussi toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais adresser ma profonde gratitude et mes plus sincères remerciements à monsieur **Mohammed El Mehdi SAIDI**, mon encadrant interne, qui m'a accordé sa confiance pour m'encadrer pour sa réactivité, sa disponibilité et ses précieux conseils et son appui pendant toute la période de stage.

Je remercie sincèrement toute l'équipe de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift pour leur accueil et leur assistance. Et plus particulièrement Madame **ABOUNKIR Intissar** pour sa patience, sa gentillesse, sa modestie, sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle m'a toujours réservé.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet de mémoire de fin d'études

Outils de travail

- **Arc Gis** : C'est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques

Il est composé de 3 composés essentiels :

- Arc Catalog : organise et gère toutes les données
 - Arc ToolBox : c'est un ensemble d'outils de transformation des données.
 - Arc Map : permet à étudier les fichiers en format géodatabase
-
- **Global Mapper** : est une application logicielle SIG de pointe qui fournit aux professionnels de la géomatique, novices ou expérimentés, une gamme complète d'outils de visualisation, d'édition, d'analyse et de présentation de données spatiales, offrant un accès à une liste inégalée de formats de données.
-
- **Hec-ras** : logiciel de modélisation hydraulique qui permet la simulation de crue à différentes périodes de retour, et voir l'évolution hydraulique de la zone étudiée en utilisant les hauteurs, les énergies et les vitesses de l'écoulement. Il est développé par le centre d'Ingénierie hydraulique des corps de l'armée Américaine pour la modélisation des réseaux fluviales

Sommaire

Introduction :	1
Présentation de L'agence de Bassin Hydraulique Tensift(ABHT) :	2
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude.....	4
I. Contexte géographique :	5
II. Contexte géologique :	6
III. Contexte climatique :	7
IV. Délimitation du bassin :	8
1. Caractéristiques géométriques du bassin versant :	9
• Superficie et périmètre :	9
2. La carte hypsométrique et la courbe hypsométrique :	9
• La carte hypsométrique :	10
• La courbe hypsométrique :	10
• Le rectangle équivalent :	11
• L'altitude moyenne :	12
• Le dénivelé :	12
• La pente :	12
✓La pente moyenne du bassin :	13
Chapitre 2 : Etude Hydropluviométrique.....	14
I. Temps de concentration :	16
• Formule de Giandotti :	16
• Formule Ventura :	16
• Formule Mockus :	16
• Formule de Kripich :	16
• Formule Passini :	17
• Formule US Corps :	17
• Formule espagnole :	17
II. Analyse pluviométrique.....	18
1. Pluies mensuelles :	18
2. Pluies annuelles :	18
III. Calcul de débits :	19
1. L'averse et l'intensité de pluie :	19
• Formule de Montana :	19
3. Estimation des débits de crues au niveau de la zone d'étude :	20
3.1 Méthode empirique :	21
• Formule de Fuller II :	21
• Formule de Hazan-Lazarevic :	22

3.2 Méthode rationnelle :.....	23
4. L'hydrogramme de crue :.....	25
Chapitre 3 : Simulation Hydraulique des zones inondables.....	26
I. Simulation hydraulique :	28
1. Modèle unidimensionnel :.....	28
2. Modèle bidimensionnel :.....	28
• Les étapes de simulation bidimensionnel :.....	28
II. Résultats et interprétation :	32
III. Plan de protection proposé :	32
Conclusion :.....	33
Références et Bibliographie :	34

Liste de figures

Figure 1: La zone d'action de l'agence de Bassin Hydraulique de Tensift	3
Figure 2: carte de localisation de Douar Ait Lkak.....	5
Figure 3: image satellite de la zone d'étude (Douar Ait Lkak)	6
Figure 4: Carte géologique du bassin versant d'Oukaimeden (Ait Lkak)	7
Figure 5: Carte de délimitation du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)	8
Figure 6: Carte hypsométrique du bassin d'Oukaimeden(Ait Lkak).....	10
Figure 7: Courbe hypsométrique du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak).....	11
Figure 8: Carte des pentes(en%) du bassin d'Oukaimeden(Ait Lkak)	13
Figure 9: La courbe des précipitations mensuelles moyennes de la station Oukaimeden (1989-2005).....	18
Figure 10: La courbe des pluies moyennes annuelles de la station Oukaimeden (1989-2005).....	19
Figure 11: hydro gramme de crue centennale	26
Figure 12: Prise d'écran au niveau de l'interface d'importation de support topographique	29
Figure 13: Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation de la zone d'écoulement et insertion de coefficient Manning.....	30
Figure 14: Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation des limites amont aval.....	30
Figure 15: Prise d'écran au niveau d'interface de définition les conditions aux limites	31
Figure 16 : Prise d'interface d'initiation de simulation.....	31
Figure 17: Résultats de simulations de la zone inondables lors de la crue centennale	32

Liste des tableaux

Tableau 1: Coordonnées géologiques de Douar Ait Lkak	5
Tableau 2: Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude.....	11
Tableau 3: Les données acquises du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)	14
Tableau 4: Temps de concentration calculés.....	17
Tableau 5: les coefficients de Montana à Marrakech ville.....	20
Tableau 6: les intensités calculées dans chaque temps de retour T	20
Tableau 7: quelques méthodes de calcul de débit de pointe	21
Tableau 8: Les valeurs de coefficient a en fonction du climat	21
Tableau 9: les valeurs de coefficient N en fonction de relief	22
Tableau 10: Débits calculés par la formule de FULLER II	22
Tableau 11: Paramètres régionaux de Hazan Lazarevic	22
Tableau 12: débits calculés par formule de Hazan Lazarevic	23
Tableau 13: coefficients de ruissellements par SETRA.....	24
Tableau 14: débits calculés par la méthode rationnelle	24
Tableau 15: Débits de pointe des crues pour une période de retour T par différentes méthodes	25
Tableau 16: les valeurs indicatives de coefficient de rugosité	29

Introduction :

Au Maroc, les inondations soulèvent des risques sérieux pour la population qui, chaque année, subit des ravages, la majorité des crues font régulièrement des victimes. C'est "*le premier risque en termes de personnes tuées au niveau national*", selon l'Institut royal des études stratégiques (Ires)

Au bassin de Tensift, le risque d'inondation est très présent notamment dans la partie montagneuse. Le bassin est régulièrement frappé par des inondations parfois meurtrières qui causes des dégâts humains et matériels très importants

Afin d'atténuer les effets d'inondation, le Maroc dispose plusieurs acteurs gouvernementaux et non gouvernementaux tels que l'atlas des zones inondables (AZI) et le plan de prévention de risques d'inondation (PPRI).

Le présent rapport est réalisé au sein de l'agence du bassin hydraulique du Tensift dans le contexte d'un stage de fin d'étude. Pour l'objectif de cerner le comportement hydrologique de bassin d'Oukaimeden à Douar Ait Lkak. Ceci afin de préconiser des mesures de protection et de prévention contre les inondations.

L'étude est présentée en trois grands chapitres :

Chapitre I : **Présentation de la zone d'étude**, en citant le cadre géographique, le contexte géologique et climatique, et la description du bassin d'Oukaimeden en définissant les caractéristiques géographiques et physiographiques.

Chapitre II : **ETUDE Hydro pluviométrique**, concerne l'analyse des variabilités annuelles, et mensuelles des précipitations et l'identification de paramètres du bassin pour la détermination des débits.

Chapitre III : **Simulation hydraulique des zones inondables**, consacré à la modélisation hydraulique et l'élaboration des cartes des zones inondables.

Présentation de L'agence de Bassin Hydraulique Tensift (ABHT) :

ABHT est Instaurée par le décret n° 2-00-479 du 14 Novembre 2000, en application de l'article 20 de la loi sur l'eau. Elle a une mission d'évaluer, de planifier, de développer et de gérer les ressources en eau au niveau de sa zone d'action.

L'Agence du Bassin Hydraulique est chargée de :

- Elaborer le e plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau redressant sa zone d'action.
- Délivrer les autorisations et les concessions d'utilisation du domaine public hydrauliques.
- Fournir les aides financières et l'assistance technique dans le domaine de la pollution des ressources en eau, de l'aménagement et de l'utilisation du domaine public hydrauliques.
- Réaliser les mesures et les études nécessaires à l'évaluation, la planification et la gestion des ressources en eau.
- Réaliser les mesures de qualité de l'eau et d'appliquer les dispositions réglementaires relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité.
- Proposer et d'exécuter les mesures adéquates pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau ou pour prévenir les risques d'inondation.
- Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- Réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations.
- Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

Zone d'action :

Située au centre ouest du Maroc, le bassin du Tensift-Ksob-Igouzoulen s'étend sur une superficie de 26.035 Km² Selon le nouveau découpage adopté en 2018. Le bassin du Tensift comprend une superficie estimée à 20323 km².

Administrativement, la zone d'action couvre totalement la préfecture de Marrakech et quasi-totalité des provinces d'**Al Haouz**, de **Chichaoua**, d'**Essaouira** et de **Youssefia** et partiellement les provinces de **Rehamna**, de **Kelaâ des Sraghnas** et de **Safi**.

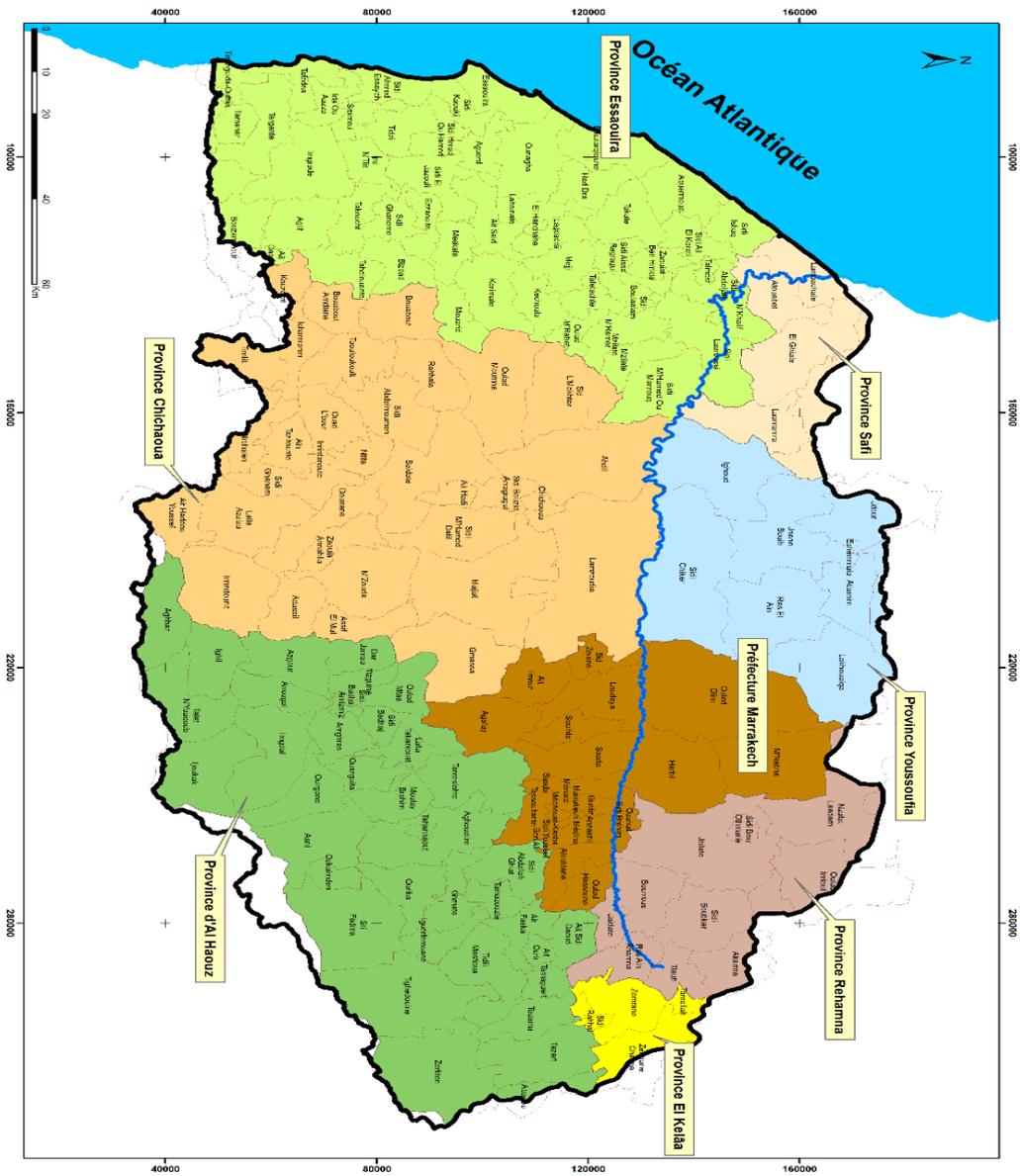


Figure 1 : La zone d'action de l'agence de Bassin Hydraulique de Tensift

Chapitre 1 : Présentation de La zone d'étude

I. Contexte géographique :

Douar AIT Lkak est situé à environ 82km au sud de Marrakech dans le haut atlas.il fait partie de la commune d'Okaimeden de la province Al Haouz, au niveau de la région de Marrakech-Safi.

➤ **Coordonnées correspondants au douar Ait Lkak :**

Coordonnées Lambert	X= 269919.89m Y= 76515.89m
Coordonnées en degré décimale	Latitude : 31.25 Longitude : -7.81
Coordonnées en degré, minute, seconde	Latitude : 31° 80'' Longitude : -7° 48' 54''

Tableau 1 : Coordonnées géologiques de Douar Ait Lkak

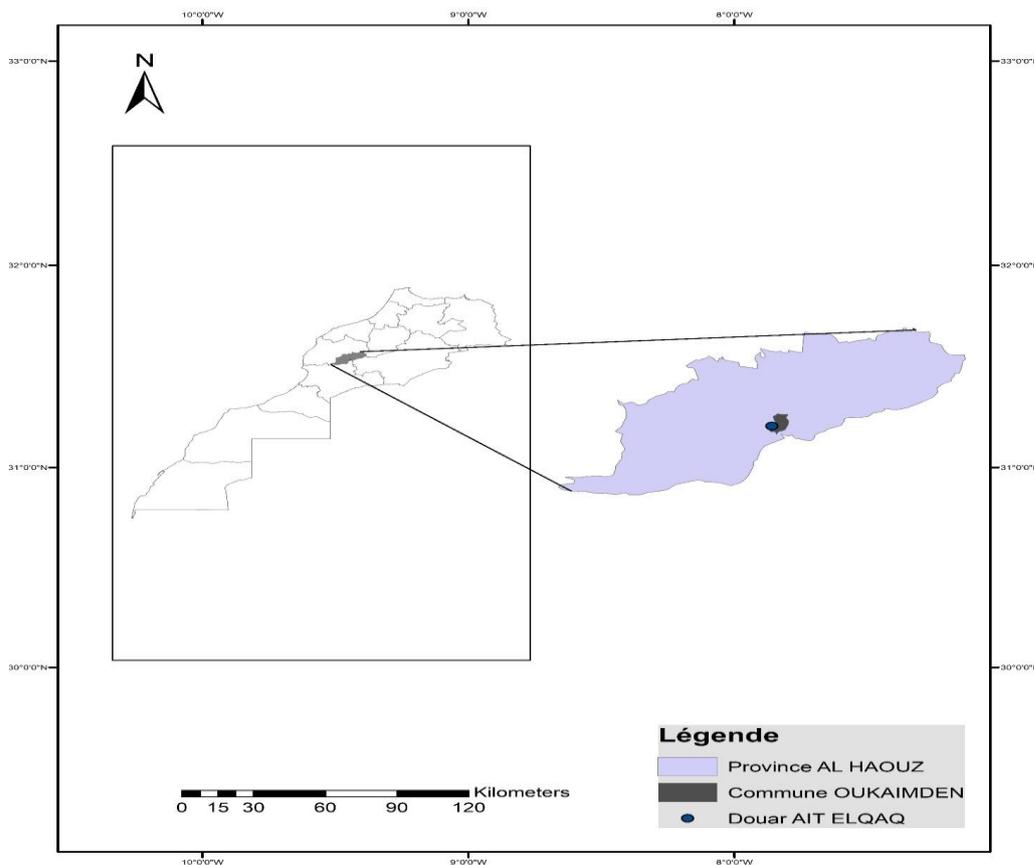


Figure 2 : carte de localisation de Douar Ait Lkak



Figure 3 : image satellite de la zone d'étude (Douar Ait Lkak)

II. Contexte géologique :

Douar AIT Lkak se situe à Oukaimeden qui fait partie du domaine structural de la zone axiale du Haut-Atlas de Marrakech et plus particulièrement de sa bordure septentrionale, limitée par l'accident nord-atlasique.

Le terrain du douar constitue par des roches détritiques d'âge précambrien des roches sédimentaires de couleur rougeâtre (grès, argiles gréseuses) permo-triasique.

La figure ci-dessous montre la lithologie du bassin :

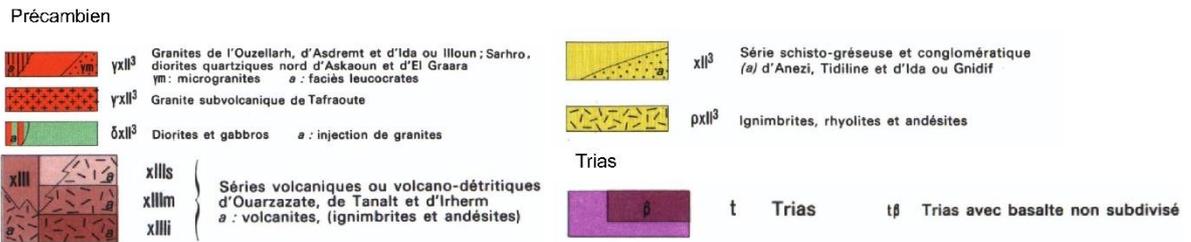


Figure 4 : Carte géologique du bassin versant d'Ouakimeden (Ait Lkak)

III. Contexte climatique :

Un climat tempéré chaud est présent. D'après Koppen et Geiger, le climat y est classé Cfb(c : climat tempéré /f : Climat humide, précipitations tous les mois de l'année/b : été tempéré).

La température moyenne en été est 20.5 °C, et 2.9 °C en hiver. Le mois de Juillet est le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid.

Les précipitations annuelles sont en moyenne de 603 mm.

L'enneigement est croissant avec l'altitude, les premières chutes peuvent commencer dès la fin d'octobre et se poursuivre jusqu'au mois de mai, la durée d'enneigement moyenne varie de 7 jours à 1700 m jusqu'à 16 jours à 2000 m.

Les hauteurs de neige sont mesurées à la station d'Oukaimeden, située à 2600 m d'altitude, depuis l'année hydrologique 1989/1990 jusqu'au 2004/2005 (données du CAF) montre que la neige annuelle tombée varie de 79 cm en 2000/2001 à 611 cm en 1990/1991 avec une moyenne de 163 cm.

IV. Délimitation du bassin :

Pour délimiter le bassin versant alimentant l'oued Oukaimeden, nous sommes basées sur une carte topographique d'échelle de 1/50000 et un modèle numérique du terrain (MNT) d'une résolution de 30 mètres

Avec les outils d'analyses hydrologiques, le logiciel Arc GIS permet une automatisation des processus suivants :

- La délimitation du bassin versant et le traçage du réseau hydrographique.
- La mesure du superficie, périmètre...
- Le calcul de pente du bassin et des cours d'eaux.
- La classification des altitudes selon des tranches.

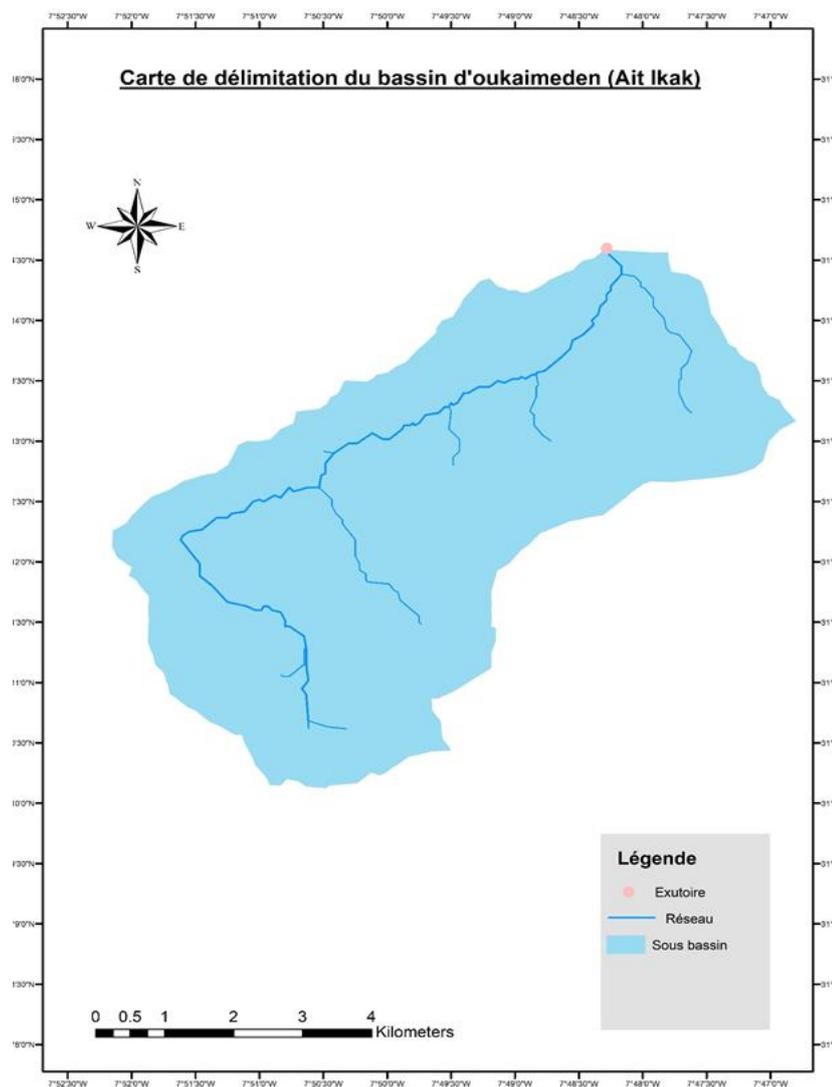


Figure 5 : Carte de délimitation du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)

1. Caractéristiques géométriques du bassin versant :

- **Superficie et périmètre :**

La superficie et le périmètre d'un bassin versant jouent un rôle important dans son étude. Et influencent aussi la nature de la relation entre le débit et le temps, un petit bassin versant réagit rapidement à une averse.

Pour le bassin versant d'Oukaimeden à douar Ait Lkak, il s'étale sur une surface de **34.14 Km²** et un périmètre de **27.58Km**

- **Forme :**

Pour caractériser les écoulements d'un bassin versant et le comparer avec d'autres bassins, on peut utiliser des différents indices morphologiques. Tel que l'indice de compacité de **Gravelius K_G** afin de caractériser la forme d'un bassin versant. Et il est défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

K_G : l'indice de forme de Gravelius.

A : la surface du bassin versant km².

P : le périmètre du bassin versant km.

Pour notre bassin versant, l'indice de Gravelius est de valeur de **1.33** un chiffre qui caractérise les bassins allongés.

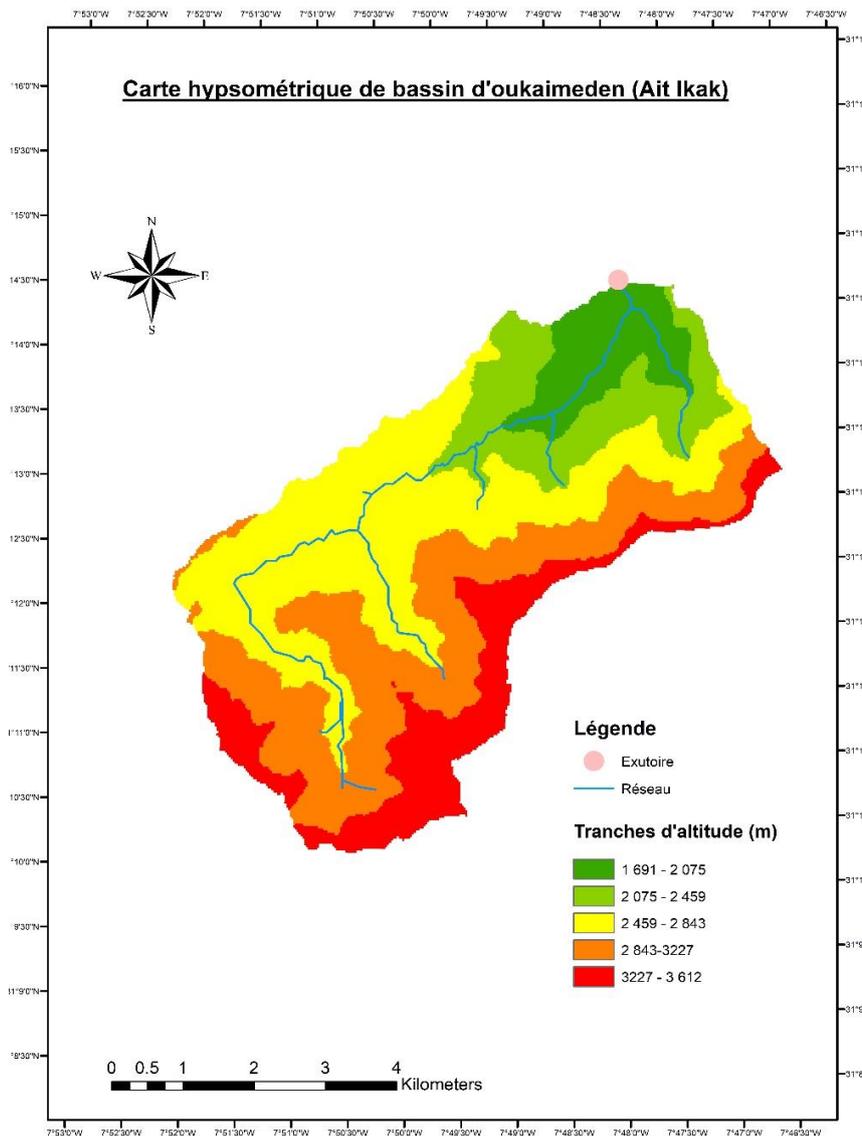
- **Relief :**

Le relief a une grande influence sur l'écoulement vu qu'un certain nombre de paramètres hydrométéorologiques varient en rapport de l'altitude (pluviométrie, humidité, température) et de la morphologie du bassin versant.

Le relief peut être déterminé avec moyen d'indices ou de caractéristiques suivantes :

2. La carte hypsométrique et la courbe hypsométrique

- **La carte hypsométrique :**



- ❖ La carte représente les tranches d'altitudes en fonction des superficies.
- ❖ Les tranches d'altitudes varient entre **1691met** **3612m**.

Figure 6 : Carte hypsométrique du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)

- **La courbe hypsométrique :**

Une courbe hypsométrique fournit une vue globale de la pente d'un bassin versant et donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude (Figure 6)

altitude en m	surface en %	surface cumulative en %
1691-2075	6.49	100
2075-2459	14.94	93.51
2459-2843	49.16	78.56
2843-3227	27.06	29.41
3227-3612	2.35	2.35

Tableau 2 : Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude

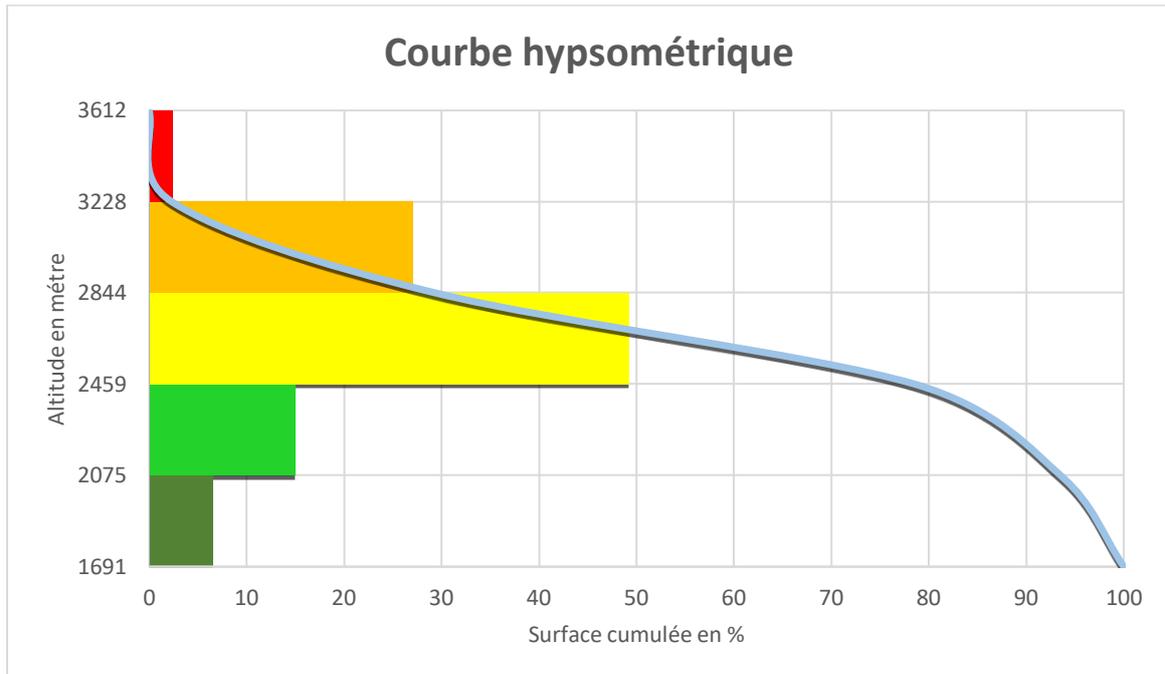


Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)

Le bassin versant Oukaimeden (AIT Lkak) est caractérisé par une altitude maximale de **3612** mètres et une altitude minimale de **1691** mètres et presque la moitié de la surface du bassin (49.16%) est occupée par des terrains d'altitude qui varie entre **2459** et **2843**mètres.

- **Le rectangle équivalent :**

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

Cette méthode permet de comparer les pentes de différents bassins versants pour comprendre l'effet des caractéristiques de la pente sur le débit.

➤ Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées par ces deux relations :

$$L = \frac{1}{2} \cdot K_G \sqrt{\pi \times A} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi \times K_G}} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{1}{2} \cdot K_G \sqrt{\pi \times A} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi \times K_G}} \right)^2} \right)$$

L : longueur du rectangle équivalent

l : largeur

K_G : l'indice de forme de Gravelius

A : surface du bassin versant en km²

P : périmètre du bassin versant en km.

- **L'altitude moyenne :**

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i + h_i}{A}$$

Avec :

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km²).

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

A : superficie totale du bassin versant (km²)

- **Le Dénivelé :**

$$D = H_{\text{max}} - H_{\text{min}}$$

Avec :

H_{max} : Altitude maximale du bassin versant en m.

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant en m.

- **La pente :**

La pente des cours détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin et le temps de concentration. Elle peut se traduire par l'infiltration de l'eau pour les faibles pentes et le ruissèlement de nature torrentielle pour des pentes fortes.

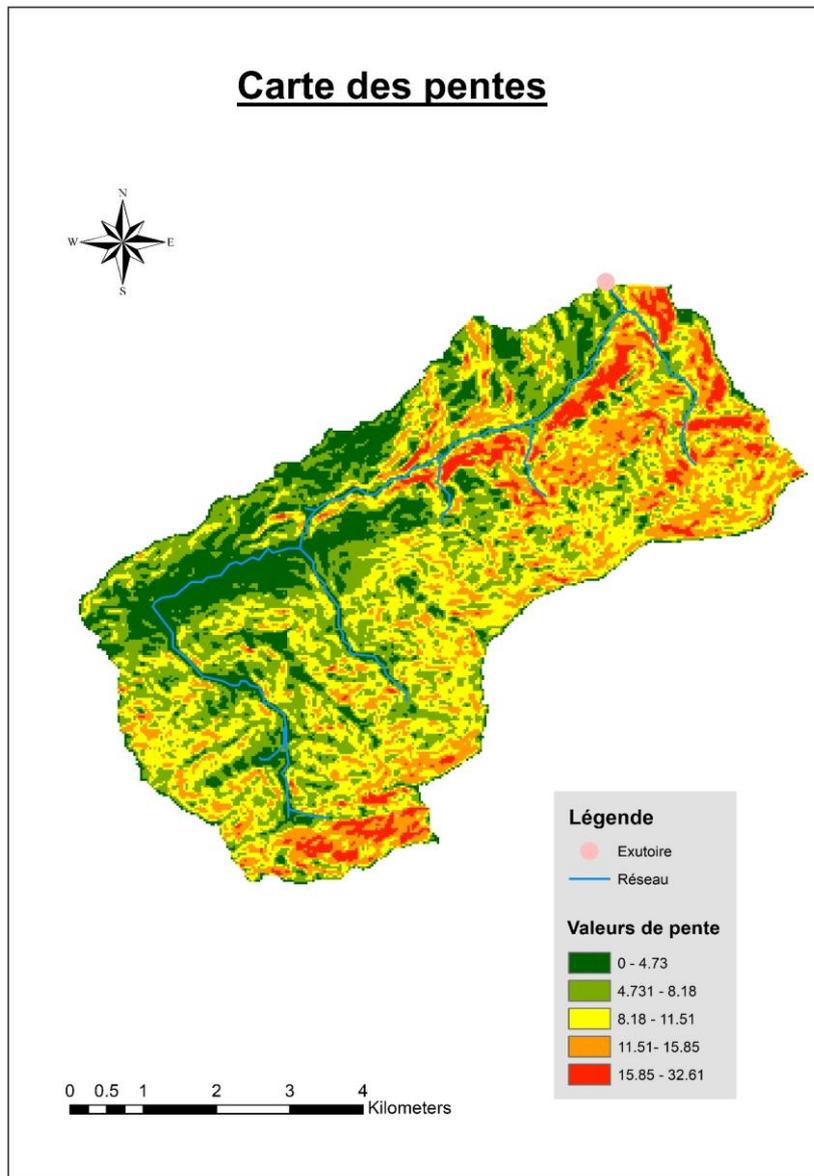


Figure 8 : Carte des pentes (valeur en %) du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)

✓ **La pente moyenne du bassin :**

$$i_m = \frac{\Delta H}{L}$$

Avec :

ΔH : La différence entre la hauteur maximale et minimale en (m)

L : la longueur du bassin versant en (m)

La pente moyenne du bassin d'Oukaimeden à douar Ait Lkak est **0.23**

Le tableau en dessous regroupe les paramètres physiques du bassin versant :

Paramètres	Valeurs
Surface Km ²	34.14
Périmètre Km	27.58
L'indice de forme de Gravelius K _G	1.33
Longueur du rectangle équivalent (Km)	8.30
Largeur du rectangle équivalent (km)	5.46
Altitude maximale(m)	3612
Altitude minimale(m)	1691
Altitude moyenne(m)	2672.65
Dénivelé(m)	1921
Pente moyenne du bassin (m/m)	0.23

Tableau 3 : Les données acquises du bassin d'Oukaimeden (Ait Lkak)

Chapitre 2 :

Etude Hydropluviométrique

I. Temps de concentration :

Le temps de concentration est le **temps** écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il est influencé par plusieurs paramètres morphologiques dont on peut essentiellement citer : la taille, la forme et le relief

Le temps de concentration est le plus souvent estimé à l'aide de formules empiriques. Parmi les formules qui sont très approximatives, on peut citer :

- **Formule de Giandotti :**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{h}}$$

T_c : temps de concentration (heures)

S : surface du bassin versant (Km²)

L : longueur du rectangle équivalent (Km)

h : différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale

- **Formule Ventura :**

$$T_c = 0,13 \cdot \sqrt{\frac{S}{I_m}}$$

T_c : temps de concentration (heures)

S : surface du bassin versant (Km²)

I_m : pente moyenne du bassin versant (m/m)

- **Formule Mockus :**

$$T_c = \frac{L^{0,8} \cdot \frac{1000-9}{82}}{20837 \cdot \sqrt{S}}$$

T_c : temps de concentration (heures)

L : longueur du Talweg (mètres)

S : pente moyenne du Talweg (m/m)

- **Formule de Kripich :**

$$T_c = \frac{0,0195}{60} \times \left(\frac{L}{\sqrt{I_m}} \right)^{0,77}$$

T_c : temps de concentration (heures)

L : longueur du bassin versant (m)

I_m : pente moyenne du bassin versant (m/m)

- **Formule Passini :**

$$T_c = 0.108 \times \left(\frac{\sqrt[3]{S.L}}{\sqrt{I_m}} \right)$$

T_c : temps de concentration (heures).

S : surface du bassin versant (Km^2).

L : longueur du bassin versant (Km).

I_m : pente moyenne du bassin versant (m/m).

- **Formule US Corps :**

$$T_c = 16,682 \times \left(\frac{L.S^{-0,25}}{1000} \right)^{0,77}$$

T_c : temps de concentration (minutes).

L : longueur du bassin versant (mètres).

I_m : pente moyenne du bassin versant (m/m)

- **Formule espagnole :**

$$T_c = 0,3 \times \frac{L^{0,77}}{I_m^{0,1925}}$$

T_c : temps de concentration (heures).

L : longueur du Talweg (Km).

I_m : pente moyenne du Talweg (m/m)

➤ Le tableau au-dessous représente les valeurs de temps de concentration pour chaque formule :

Formules	Temps de concentration (heures)
Formule de Giandotti	1.43
Formule Ventura	1.58
Formule Mockus	1.66
Formule de Kripich	0.60
Formule Passini	1.48
Formule US Corps	1.88
Formule espagnole	2.03

Tableau 4 : Temps de concentration calculés

Temps de concentration au niveau du bassin versant d'Oukaimeden à douar Ait Lkak :

$$T_c = 1,53 \text{ heures}$$

Le temps de concentration obtenue est la moyenne des temps de concentration calculés qui donnent des valeurs comparables et assez avoisinantes.

II. Analyse pluviométrique

1. **Pluies mensuelles :**

Au cours de la durée qui s'étend depuis 1989 jusqu'à 2005, la distribution pluviométrique marque une irrégularité importante à l'échelle mensuelle. On observe une progression de précipitations à partir du mois septembre jusqu'à Mars, ce dernier atteint jusqu'à 151 mm. D'autre part, on a une diminution des pluies pendant les mois les plus secs qui sont Juin, Août et surtout Juillet qui atteint jusqu'à 19 mm.

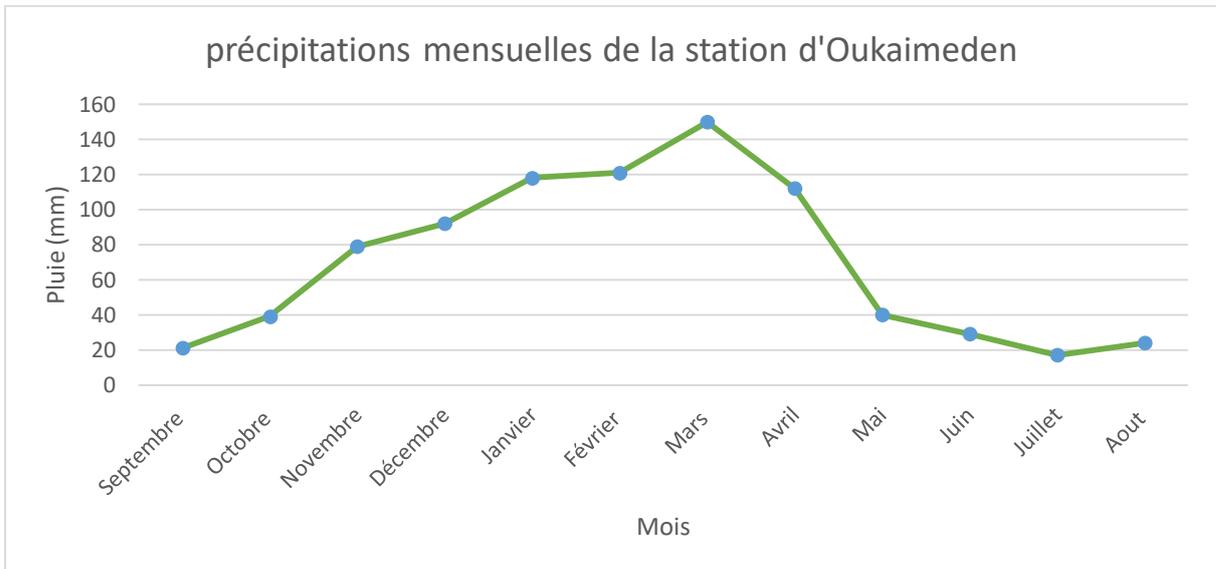


Figure 9 : La courbe des précipitations mensuelles moyennes de la station Oukaimeden (1989-2005)

2. **Pluies annuelles :**

Au cours des années (1989-2005), la pluviométrie a connu une forte irrégularité interannuelle. Les périodes exceptionnellement pluvieuses sont : 1995-1996 et 2002-2004

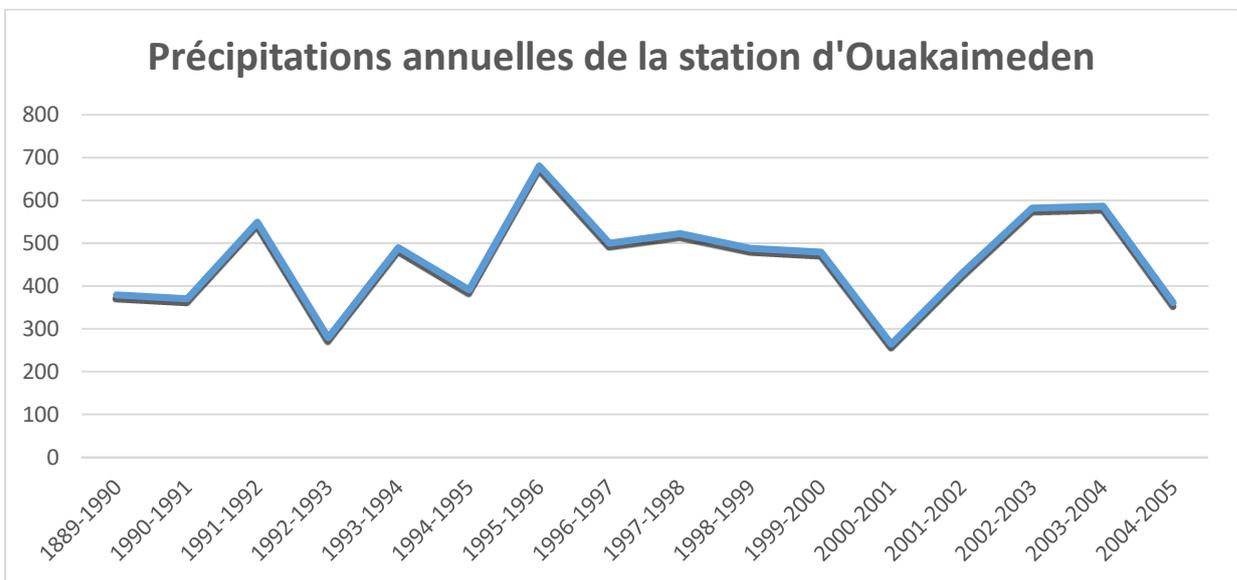


Figure 10 : La courbe des pluies moyennes annuelles de la station Oukaimeden (1889-2005)

III. Calcul de débits :

1. L'averse et l'intensité de pluie :

On définit une **averse** comme une série pluvieuse liée à l'instabilité de l'atmosphère, dont la durée peut varier de quelques minutes à plusieurs jours, et intéresser une superficie allant de quelques kilomètres carrés (orages) à quelques milliers (pluies cycloniques).

L'intensité des précipitations varie à chaque instant au cours d'une même averse suivant les caractéristiques météorologiques de celle-ci. Plusieurs pointes d'intensité peuvent avoir lieu au cours d'une même averse.

L'intensité d'un événement pluvieux est exprimée comme le rapport entre la hauteur de pluie et sa durée t . à l'aide de plusieurs formules comme celle de Montana

- Formule de Montana :

$$i(t) = \frac{a}{t^b}$$

Avec :

$i(t)$: l'intensité de pluie en (mm/h, mm/min).

t : la durée de la tempête

a et b : des coefficients de Montana dépendant des périodes de retour ainsi que de la durée d'évènement pluvieux

-En prenant t la durée de la tempête égale au temps de concentration de notre bassin et les coefficients a et b dans la région de Marrakech vont prendre les valeurs suivantes :

T(ans)	A	B
2	2.967	0.639
5	4.944	0.620
10	6.270	0.615
20	7.545	0.612
50	9.197	0.610
100	10.437	0.608

Tableau 5 : les coefficients de Montana à Marrakech ville

- **Les intensités retenues :**

T(ans)	i (t) en (mm/h)
2	9.91
5	18.00
10	23.34
20	28.48
50	35.03
100	40.11

Tableau 6 : les intensités calculées dans chaque temps de retour T

3. Estimation des débits de crues au niveau de la zone d'étude :

La détermination du débit de la pointe prend en considération plusieurs facteurs climatique et morphologique.

Le débit de pointe correspondant à une période de retour donnée peut être calculé avec deux méthodes :

-Si le bassin est jaugé, l'estimation du débit va être faite statistiquement en employant des lois d'ajustement des valeurs mesurées directement sur le cours d'eau alimenté par le bassin versant.

-Si un bassin est non jaugé, et c'est le cas de notre bassin d'étude, le calcul de débit de pointe est fait à partir des méthodes **empiriques** et **rationnelles**.

Le tableau suivant montre quelques formules utilisées pour l'estimation de débits de pointe :

Type de formule	Nom de formule
Formule empirique	Mac Math
	Burkli Ziegler
	Mallet Gauthier
	Fuller II
	Hazan Lazaravic
Rationnelle	

Tableau 7 : quelques méthodes de calcul de débit de pointe

Le bassin versant d'oukaimden Ait Lkak s'étale une surface de **34.14 Km²**. D'après la direction des Routes et de la Circulation Routière (DRCR) les méthodes recommandées pour un bassin supérieur à 25Km² : Formule de Fuller II, formules de Hazan-Lazarevic et la méthode rationnelle

3.1 Méthode empirique :

Cette formule exprime le débit de pointe en fonction des caractéristiques morphologiques expérimentales du bassin et quelques coefficients empiriques.

- **Formule de Fuller II :**

La formule de Fuller II permet l'estimation des débits de pointe pour les bassins versants de superficies supérieures à 10 km².

$$Q_T = (1 + a \times \log T) \cdot \left(S^{0,8} + \frac{8}{3} \times S^{0,5} \right) \cdot \frac{4}{3} \times \frac{N}{100}$$

Q_T : débit de pointe de période de retour T en m³ /s.

T : période de retour en ans.

a : coefficient régional fonction du climat varie de 0.7 à 3.5

S : superficie du bassin versant en Km².

N : coefficient régional fonction de relief varie de 80 à 100.

-Pour le coefficient a :

Valeurs de a	Climat
0,7- 0,8	Humide
0,8-2	Aride
3-3,5	Saharienne

Tableau 8 : Les valeurs de coefficient a en fonction du climat

Dans notre cas, on prend **a=0,7** la région humide.

-Pour le coefficient N :

Les valeurs de N	Région
80	Plaine
85	Relief accidenté
100	Montagne

Tableau 9: les valeurs de coefficient N en fonction de relief

Dans notre cas **N=85** relief accidenté.

➤ **Débits obtenus :**

Période de retour(ans)	10	20	50	100
Débits calculé par la formule Fuller II (m ³ /s)	62.48	70.23	80.46	88.21

Tableau 10 : Débits calculés par la formule de FULLER II

• **Formule de Hazan-Lazarevic :**

La formule de Hazan Lazareviç a été développée au Maroc, en se basant sur la synthèse des informations dans différents bassins versants du territoire marocain. Elle donne le débit millénial en fonction de la superficie du bassin versant :

$$Q_{1000}=a \times S^b$$

Avec :

Q_{1000} : Débit de crue millénaire en m³ /s

S : Superficie du bassin en Km²

a et b : Coefficients variant avec la taille du bassin, dépendent de sa situation géographique et la pluviométrie annuelle

Le tableau ci-dessous représente les différents paramètres régionaux de Hazan-Lazarevic :

Zone	a	b	Pluviométrie (mm)
Rif central	15,55	0,776	1000-1300
Rif occidental	9,78	0,793	800-1000
Rif oriental	7,58	0,808	600-800
Moyen atlas	14,94	0,636	700-900
	13,51	0,613	500-700
	13,47	0,587	400-500
Haut atlas	9,38	0,742	200-400

Tableau 11 : Paramètres régionaux de Hazan Lazarevic

Le bassin d'Oukaimeden à douar Ait Lkak fait partie de Haut Atlas donc :

$$a=9.38 \quad \text{et} \quad b=0.742$$

➤ $Q_{1000}=128.79\text{m}^3/\text{s}$

On peut déduire les débits de récurrences autres que Q (1000) en utilisant la formule initiale de FULLER :

$$Q(T)=\frac{Q_{1000}\cdot(1+a \log T)}{1+a \log(1000)}$$

a : Coefficient régional, au Maroc **a=2**.

➤ **Débits obtenus :**

Périodes de retour (ans)	10	20	50	100
Débit calculé (m ³ /s)	55.19	66.27	80.91	92

Tableau 12 : Débits calculés par formule de Hazan Lazarevic

3.2 Méthode rationnelle :

Méthode simpliste qui permet une bonne approche des débits pour les petits bassins versants ($S < 25\text{km}^2$).

La méthode rationnelle suppose que l'intensité de la précipitation est uniforme sur le bassin versant entier. Théoriquement le ruissellement du bassin causé par une pluie uniforme d'intensité constante.

$$Q_p = \frac{C_r \times I \times A}{3,6}$$

Avec :

Q_p : Débit de pointe du bassin versant (en m^3/s).

C_r : Coefficient de ruissellement (sans unité).

A : Superficie du bassin versant (en km^2).

I (T, t c) : Intensité de la précipitation pour une durée de précipitation égale au temps de concentration (en mm/h).

- **Coefficient de ruissellement :**

Le coefficient de ruissellement représente la proportion de l'eau totale précipitée qui ruisselle. Pour garantir un dimensionnement suffisant des structures, il est préférable de prendre une valeur du coefficient C_r qui représente les pires conditions de ruissellement du bassin versant.

Le coefficient varie selon plusieurs facteurs tels que : la nature du terrain, la pente, l'intensité de précipitation, le degré de saturation...

Le tableau suivant représente les coefficients de ruissellements recommandé par le SETRA (Service des études sur le transport, les routes et leurs aménagements : Organisme français) :

COUVERTURE VEGETALE	MORPHOLOGIE	PENTE MOYENNE (%)	TERRAIN AVEC SABLE GROSSIER	TERRAIN ARGILEUX OU LIMONEUX	TERRAIN ARGILEUX COMPACT
Bois	Presque plat	0-5	0,10	0,30	0,40
	Onduleux	5-10	0,25	0,35	0,50
	Montagneux	10-30	0,30	0,50	0,60
Pâturage	Presque plat	0-5	0,10	0,30	0,40
	Onduleux	5-10	0,15	0,36	0,55
	Montagneux	10-30	0,22	0,42	0,60
Culture	Presque plat	0-5	0,30	0,50	0,60
	Onduleux	5-10	0,40	0,60	0,70
	Montagneux	10-30	0,52	0,72	0,82

Tableau 13 : coefficients de ruissellements par SETRA

-Pour notre bassin versant **Cr= 0,42**.

➤ **Débits obtenus :**

Périodes de retour (ans)	10	20	50	100
Débits calculés(m ³ /s)	92.96	113.43	139.52	159.75

Tableau 14 : Débits calculés par la méthode rationnelle

➤ On constate que le débit calculé par la méthode rationnelle (**Q₁₀₀=159.75m³/s**) dépasse les débits calculés par les méthodes empiriques qui sont proches.

➤ D'après Les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées pour le calcul des débits de pointe au niveau de bassin versant d'Oukaimeden à douar Ait Lkak sont synthétisés dans le tableau suivant :

	Débits de pointe en m ³ /s			
	T=10ans	T=20ans	T=50ans	T=100ans
Méthode de Fuller II	62.48	70.23	80.46	88.21
Méthode de HAZAN LAZAREVIC	55.19	66.27	80.91	92
Méthode rationnelle	93.26	113.43	139.52	159.75
Moyenne prouvée par les 2 premières formules	58.83	68.25	80.68	90.1

Tableau 15 : Débits de pointe des crues pour une période de retour T par différentes méthodes

4. L'hydrogramme de crue :

Un hydrogramme de crue est présenté sous forme d'une courbe en cloche dissymétrique indiquant le débit en fonction du temps à un point donné d'un cours d'eau. On la divise en quatre éléments : tarissement (avant la pluie), crue, décrue et tarissement (après la recension hydropluviométrique étudiée).

Cet hydrogramme est caractérisé par des temps :

- **Le temps de réponse T_p :** Temps écoulé entre les instants qui correspondent respectivement au centre de gravité d'une averse et au centre de gravité du ruissellement ou au débit de pointe.
- **Le temps de concentration t_c :** Temps que met le ruissellement d'une averse pour parvenir à l'exutoire depuis le point du bassin pour lequel la durée de parcours est la plus longue.
- **Temps de montée t_m :** Temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide (décelable par le limnigraphe) et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- **Le temps de base t_b :** Intervalle de temps entre le début et la fin du ruissellement produit par une averse

-Il existe des formes différents d'hydrogramme de crues :

- **Hydrogramme naturel :** obtenu en basant des données enregistrés de débits au niveau d'un cours d'eau jaugée.
- **L'hydrogramme synthétique :** établi à partir des paramètres du bassin versant et les caractéristiques des tempêtes consiste à simuler un hydrogramme naturel.

- **Hydrogramme unitaire sans dimension SCS** : basé sur un hydrogramme triangulaire simple établi en utilisant le temps de concentration et le débit du pointe.

L'hydrogramme unitaire sans dimension qui est adapté avec les conditions de notre bassin :

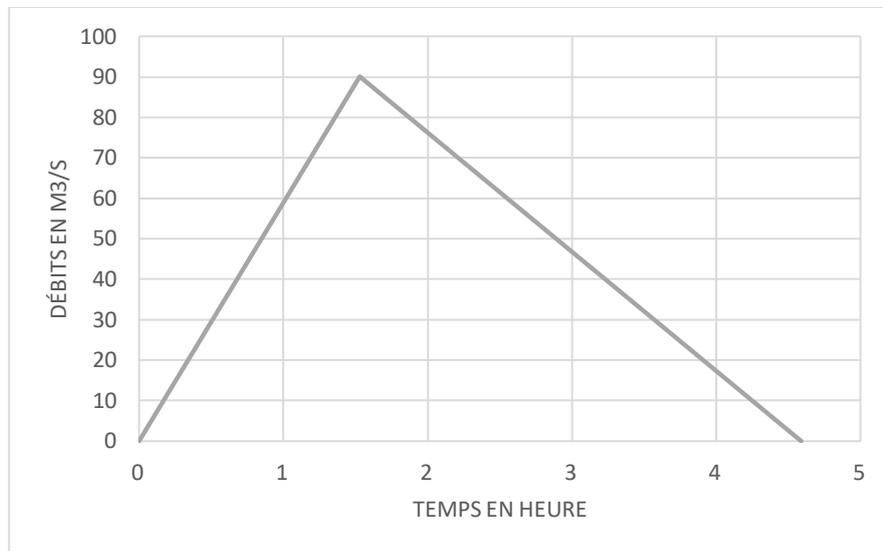


Figure 11 : Hydrogramme synthétique de crue centennale

Chapitre 3 : Simulation Hydraulique des zones inondables

I. Simulation hydraulique :

La stimulation hydraulique est une étude qui permet de déterminer les zones d'inondation.

Les objectifs de la stimulation sont :

- L'analyse du comportement d'un cours d'eau exposé à un phénomène hydrologique d'une période de retour donnée.
- La détermination des zones inondables.
- Le dimensionnement des constructions

On a deux modèles de simulation :

1. Modèle unidimensionnel :

La modélisation hydraulique unidimensionnelle (1D) repose sur la résolution des équations de Barré – Saint-Venant. Celle-ci est basée sur une série d'hypothèses dont les principales sont :

- L'écoulement est unidimensionnel (ou filaire) ;
- La répartition des vitesses est uniforme dans une section transversale donnée.
- La répartition des pressions sur une verticale est hydrostatique.

2. Modèle bidimensionnel :

La modélisation fine avec un modèle bidimensionnel (2D) se justifie dans les sites d'étude pour :

- acquérir des résultats de vitesses plus précis.
- Représenter un système hydraulique spécifique.
- Représenter des écoulements complexes engendrés par les écoulements en site urbain dense.
- Apporter des précisions indispensables sur les conditions locales d'écoulement

Pour notre cas on a fait une stimulation avec un modèle bidimensionnel (2D) .

- **Les étapes de simulation bidimensionnel :**

- ✓ **1^{ère} étape :** Importation la topographie

Pour modéliser l'écoulement d'eau dans un oued, on a besoin d'un support topographique qui visualise la structure du cours d'eau. Ce dernier peut être un modèle numérique de terrain haute résolution type LiDAR, un modèle numérique de terrain d'une résolution modeste ou un lever topographique de la zone d'étude (les courbes de niveaux du lever topographique doivent être converties en modèle numérique de terrain).

Pour notre cas, j'ai travaillé avec global mapper pour convertir un fichier AutoCad en MNT de résolution de 10m, puis je l'ai importé à Hec-Ras.

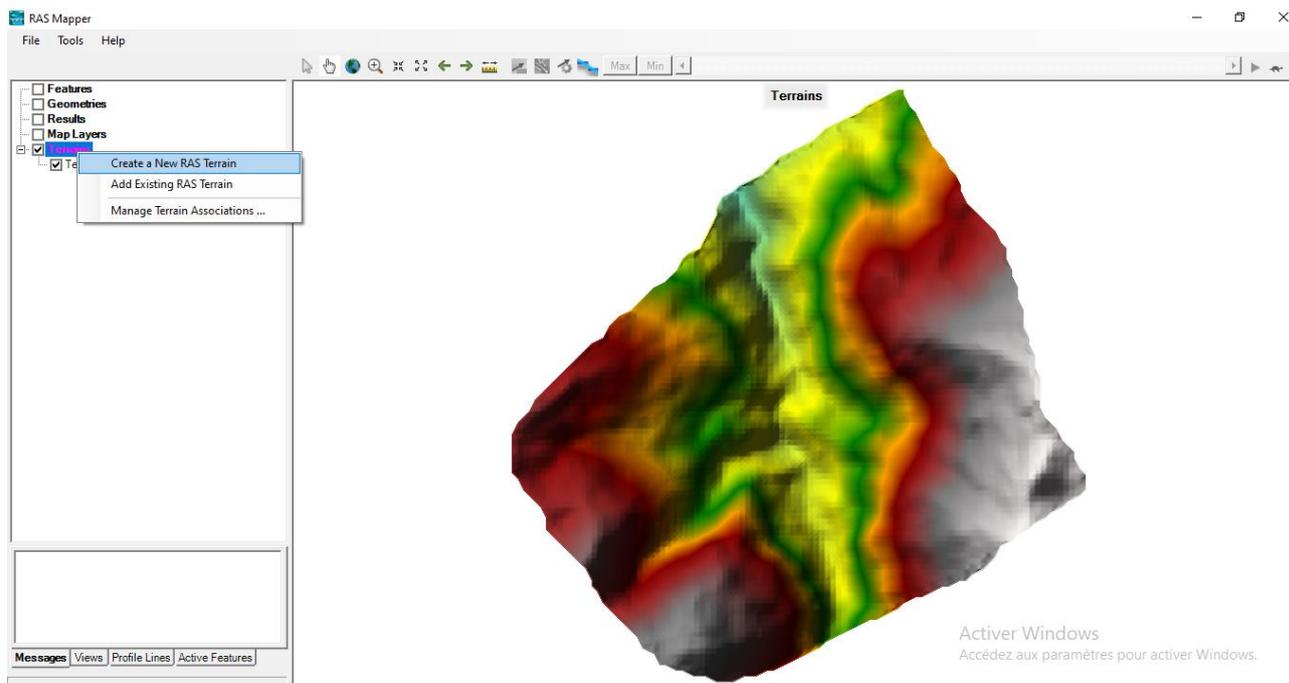


Figure 12 : Prise d'écran au niveau de l'interface d'importation de support topographique

- ✓ **2^{ème} étape** : Délimitation du surface d'écoulement et insertion des paramètres relatifs au milieu.

Cette étape consiste à déterminer la zone où l'eau va s'écouler et identifier le coefficient n de rugosité de Manning

-Coefficient de Manning :

Le coefficient de rugosité du lit permet d'avoir une modélisation plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse de l'eau sur le fond de l'Oued et sur les rives. Sur chaque profil en travers le coefficient de Manning sera fixé à **0,033** pour les rives de l'Oued d'Oukaimeden. Ce qui correspond à la valeur normale pour une rivière composée d'une granulométrie plus au moins grossière avec une végétation rivulaire. Les autres valeurs indicatives du coefficient de Manning, sont présentées sur le tableau suivant :

Les rives	0.033
Lits bétonnés	0.015
Lits naturels avec végétation	0.05 à 0.1

Tableau 16 : les valeurs indicatives de coefficient de rugosité

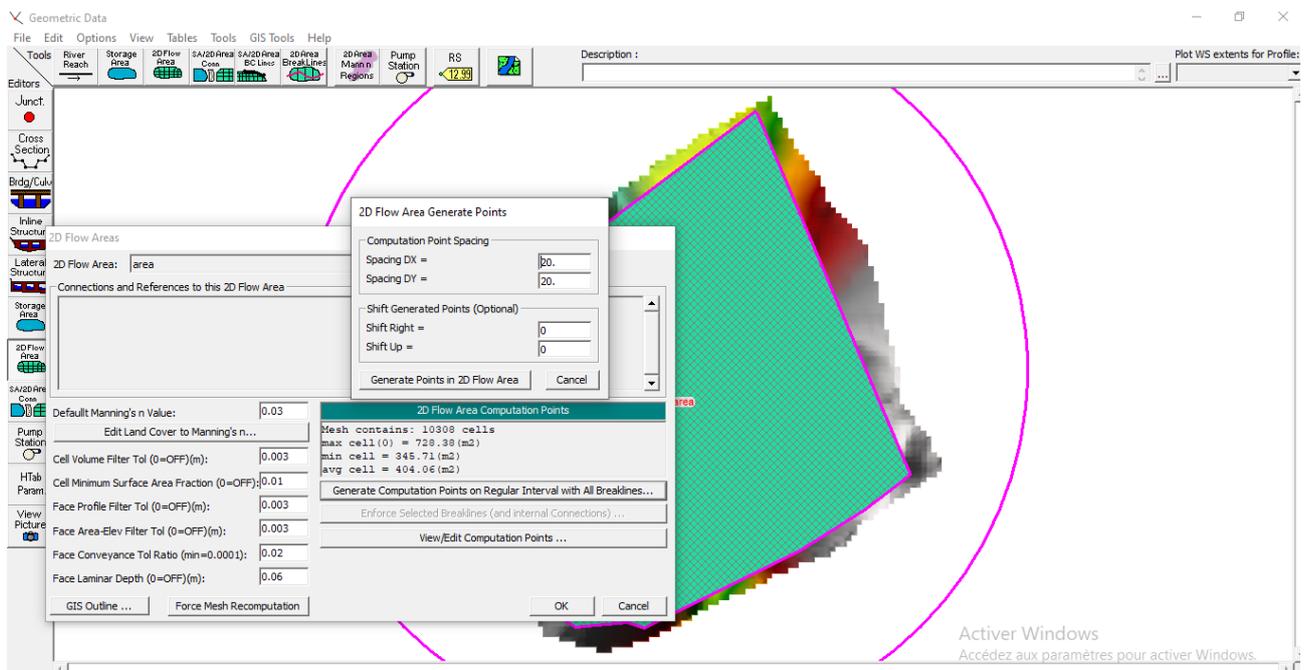


Figure 13 : Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation de la zone d'écoulement et insertion de coefficient Manning

✓ **3^{ème} étape : Détermination des conditions aux limites**

Cette étape consiste à indiquer la position de l'amont et l'aval au niveau du terrain. Et insérer les paramètres suivants pour chaque condition à la limite :

Condition amont(upstream) : Correspond à l'hydrogramme de crue centennale

Condition aval(downstream) : Correspond à la pente moyenne de l'oued au niveau du partie aval. La pente égale 0.2

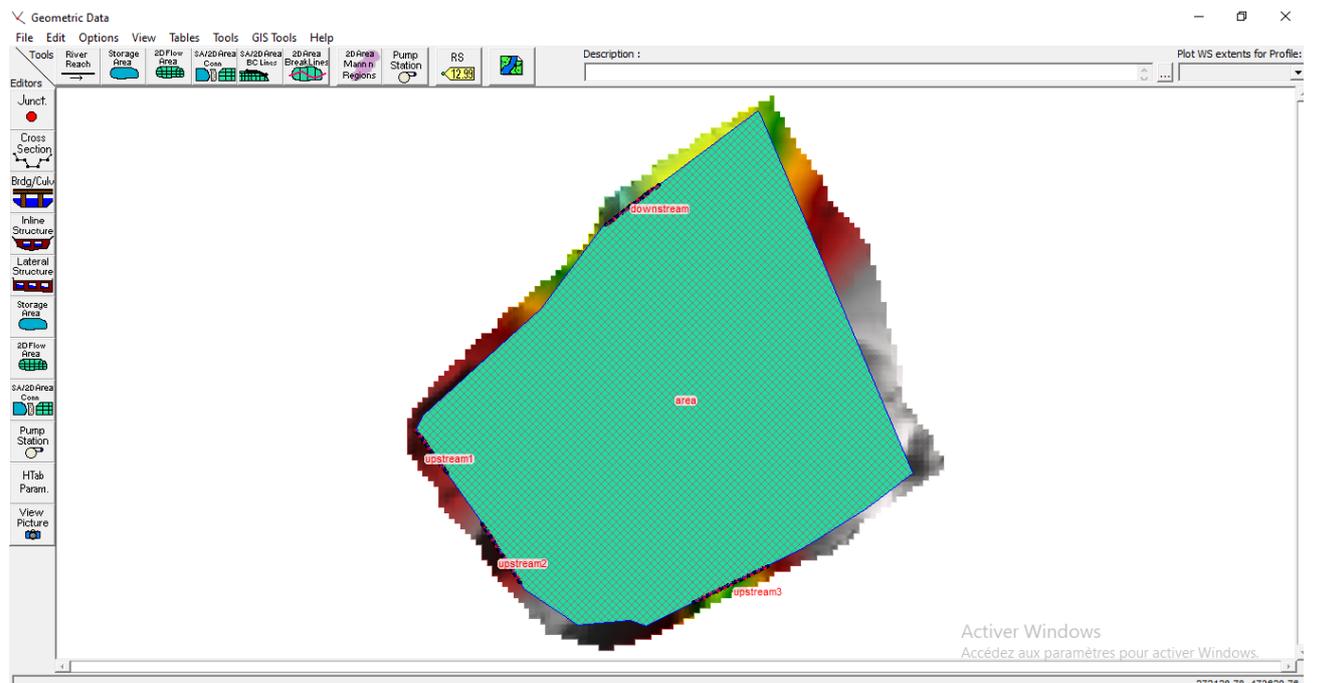


Figure 14 : Prise d'écran au niveau d'interface de délimitation des limites amont aval

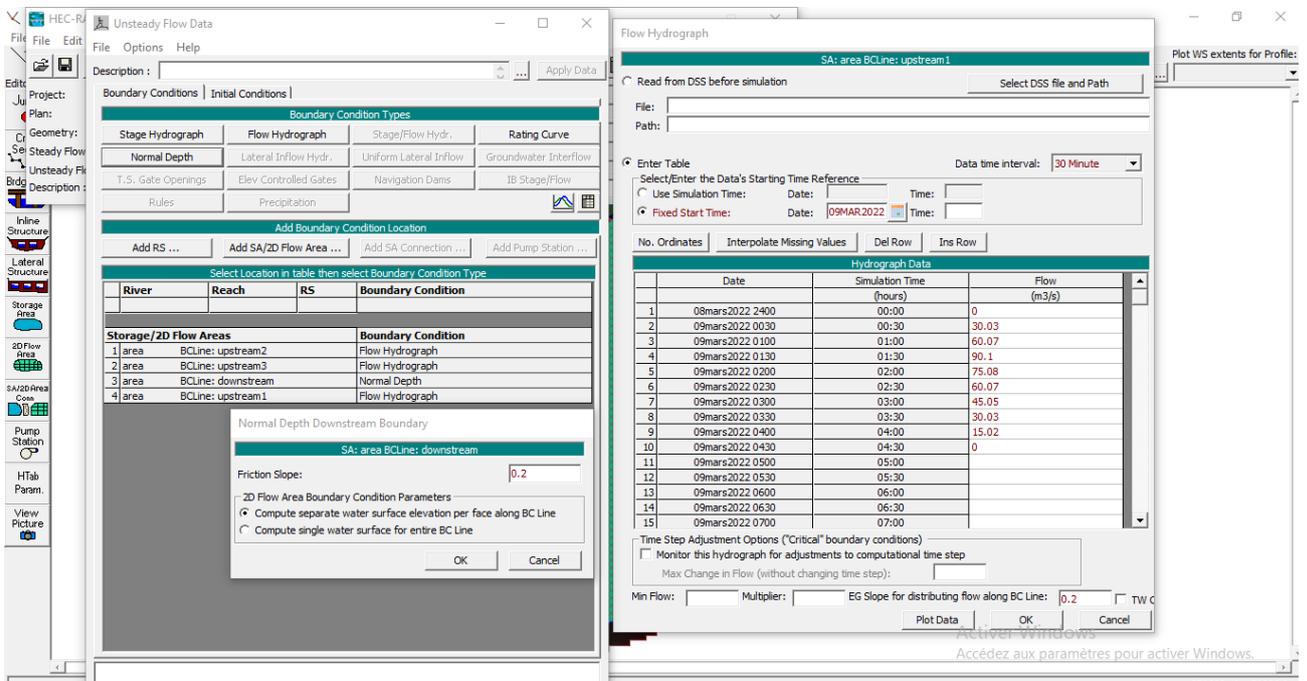


Figure 15 : Prise d'écran au niveau d'interface de définition les conditions aux limites

- ✓ **4^{ème} étape** : Initiation de la simulation et cartographie de la zone inondable

C'est la dernière étape de la simulation. La zone inondable va être affichée sur le terrain.

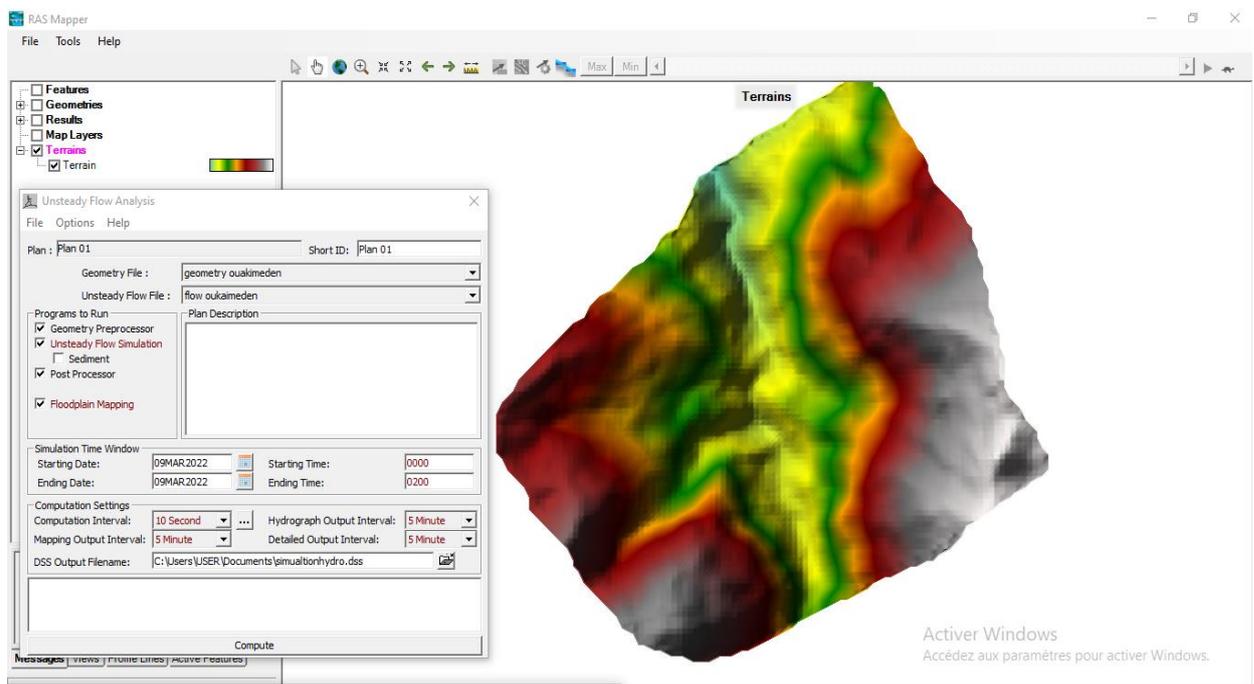


Figure 16 : Prise d'interface d'initiation de simulation

II. Résultats et interprétation :

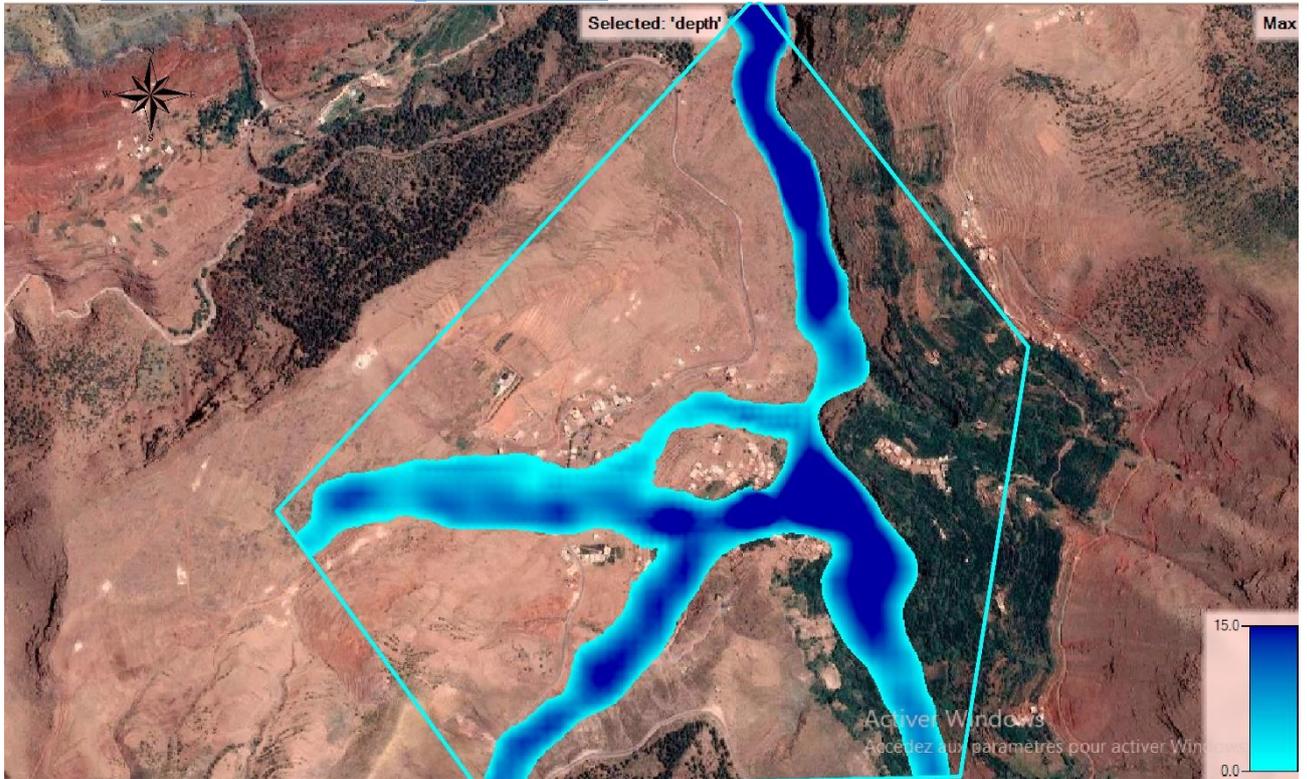


Figure 17 : Résultats de simulations de la zone inondables lors de la crue centennale

-On remarque que au moment du passage de la crue centennale, les eaux de l'oued vont déborder une partie de zone d'habitat (la partie aval) et également sur les parcelles agricoles située près des berges du douar. Cela peut provoquer des pertes matérielles et socio-économiques.

III. Plan de protection proposé :

D'après les résultats de la simulation hydraulique de notre zone d'étude. On peut proposer un plan de protection pour restreindre l'envergure des pertes en cas d'inondations.

- Eviter la construction des maisons à proximité de l'oued
- Construire une digue (levée de terre ou galet) pour canalisant le cours d'eau et faire obstacle à l'écoulement pour protéger les parties situées dans la zone inondable.
- Au niveau des parcelles agricoles, il faut renforcer la structure du sol surtout en hiver, en ajoutant une couche de sable par exemple sur les terrains argileux ou limoneux qui sont facilement érables à force d'écoulement de l'eau pour améliorer l'infiltration.
- Le drainage aussi est un moyen efficace d'assainir une zone inondée. Surtout en présence de sols argileux ou limoneux qui retiennent bien l'humidité, comme le cas de notre zone d'étude. ils peuvent creuse De tranchées régulièrement réparties sur le terrain ,profonds qui dépassent la couche fixe, puis les remplir gravier de granulats(agrégats de roche) ou de sable drainant pour permettre une évacuation un peu plus rapide de l'eau.

Conclusion :

L'étude présente s'est effectuée pour mieux comprendre la nature hydrologique et savoir les paramètres qui influencent l'écoulement du bassin d'Oukaimeden à douar Ait Lkak afin de délimiter les zones inondables.

Le bassin versant d'Oukaimeden à douar Ait Lkak est étendu sur une superficie de 34.14Km² et un périmètre de 27.58Km, d'une forme allongée avec un rectangle équivalent de longueur de 8.30 Km et largeur de 5.46 Km. Suivant l'analyse du courbe et de carte hypsométrique, les altitudes moyennes occupent la majorité de la surface du bassin, et les altitudes qui décroissent du sud-ouest vers nord-est

L'étude hydrologique nous a permis d'estimer les débits de crues au niveau non gaugé d'Oukaimeden Ait Lkak, à partir des différentes méthodes (méthodes empiriques, la méthode rationnelle) puisqu'il y a une absence des bassins jaugés aux alentours de notre bassin. Ce processus a permis d'estimer la crue centennale, qui serait de l'ordre de 90.1m³/s

La modélisation hydraulique fait avec le logiciel HEC-RAS a permis de délimiter, les zones qui peuvent être débordées par les eaux pour une période de retour de 100 ans.

Les résultats obtenus après la simulation hydraulique au cours de cette étude peuvent servir dans le choix des types d'interventions et d'actions pour l'aménagement des zones inondables en donnant une idée générale sur le comportement de l'oued d'Oukaimeden lors du dépassement de débits de pointe relatifs à des périodes de retour.

Cette étude réalisée au sein de l'agence du bassin hydraulique du Tensift, m'a donné l'opportunité d'appliquer les différentes informations et connaissances acquises durant mes études universitaires.

Références et Bibliographie :

BOUDHIK Asma, BOUFOUS Kaoutar, MAJDOULI Kouthar,2021. Apports du SIG dans la cartographie des zones inondables : Cas du bassin d'Amizmiz. Région de Marrakech –Tensift-Al Haouz, province d'Al Haouz, (Maroc), projet de fin d'étude, licence science et technique. EE, FST Marrakech,43p

EL HADAJI Ayoub, 2019. ETUDE DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS AU NIVEAU DU DOUAR LALLA AARIBA COMMUNE DE NFIFA, PROVINCE DE CHICHAOUA (MAROC), projet de fin d'étude, licence science et technique. EE, FST Marrakech, 42 p.

OUAHIDY Amina, CHOUKRI Maria,2018. Etude hydro-pluviométrique et estimation des débits de pointe du bassin versant de la Rheraya (Maroc), Mémoire de fin d'études, licence science et technique. EE, FST Marrakech,46p

GUY BERNADOTTE,2006. LA MÉTHODE RATIONNELLE GÉNÉRALISÉE : ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET PERFORMANCE DU MODELE, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC,130p

Cheggour, A. ,2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans bassin versant montagneux semi-aride et spacialisation par des SIG : Application au bassin versant de la RHERAYA,Haut atlas, Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech, 231p.

Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (2007), Atlas des zones inondables Marrakech, 162p.

Webographie :

https://www.areas-asso.fr/images/formations2013/hydrologie_11-06-2013_complet.pdf

<https://fr.slideshare.net/vrd123/formules-hydro>