

Département des Sciences de la Terre

Licence ès Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'étude

Étude hydrologique et simulation hydraulique pour la délimitation des zones inondables au niveau de la localité de Sidi Bou Othmane, province de Rehamna (Maroc)

Réalisé par : **Achouaq BAGY et Hasnaa BEN AMMI**

Soutenu le : 1er juillet 2021

Devant la commission d'examen composée de :

Encadrant	M. Mohammed JAFFAL,	FST Marrakech
Encadrant externe	M. Younes BAGARROU,	ABHT Marrakech
Examineur	M. Lahcen DAOUDI,	FST Marrakech

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Avant d'entamer les différentes parties de ce rapport, on tient tout d'abord à remercier ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces années d'étude.

Nous voudrions adresser nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre mémoire.

Nous tenant à remercier sincèrement notre encadrent Monsieur Mohammed Jaffal pour avoir dirigé nos travaux et pour son encouragement, ses conseils et sa disponibilité

Nous tenant aussi à remercier vivement tout le personnel de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et plus particulièrement Monsieur Younes Bagarrou pour l'encadrement de notre stage de fin d'études et pour les précieux conseils et la disponibilité dont il a fait preuve malgré ses multiples responsabilités. Il a minutieusement supervisé ce travail et il s'est fortement investi dans sa réalisation.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur Nabil Wardi pour ses conseils et pour les informations qu'il a mis à notre disposition durant notre stage à l'ABHT.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude au Professeur Mohamed El Mehdi Saidi pour le temps qu'il nous a consacré. Son aide a été d'une grande utilité pour l'aboutissement de travail.

Les mots ne suffisent pas pour remercier nos très chers parents pour leurs confiances, leurs sacrifices, leurs encouragements, leurs amours et leurs prières, merci infiniment.

Merci à nos chers sœurs et frères pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Table des matières

Outils de travail	4
Introduction	5
Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift	6
Chapitre I- Présentation de la zone d'étude	8
I.1- Situation géographique et administratif	8
I.2- Contexte géologique	3
I.3- Diagnostic de la situation actuelle	6
I.3.1- Problématique d'inondations à Sidi Bou Othmane	6
I.3.2- Crue historique	6
I.4- Contexte climatique	8
Chapitre II- Etude hydrologique	10
II.1- Délimitation du bassin versant	10
II.1.1- Réseau hydrographique	11
II.1.2- Caractéristiques géométriques du bassin versant	14
II.2- Caractéristiques topographiques	17
II.2.1- Hypsométrie du bassin versant	17
II.2.2- La pente	21
Chapitre III- Calcul des débits de pointe	23
III.1- Introduction	23
III.2- Temps de concentration	23
III.3- Calcul des débits de pointe	26
III.1- Méthodes empiriques	26

III.2- Méthode rationnelle	29
III.3- Méthode d'ajustement et transposition	32
III.4- Etablissement de l'hydrogramme de crue	36
Chapitre IV- Modélisation hydraulique et délimitation des zones inondables	39
IV.1- Etapes de la modélisation	39
IV.1.1- Données d'entrée	39
IV.1.2- Paramètre du modèle	42
IV.1.3- Simulation des crues pour une période de retour de 100 ans et carte des zones inondables	43
V- Conclusion	46
Références bibliographiques	47
Annexe 1	48
Annexe 2	49

Outils de travail

ArcGIS

ArcGIS est un ensemble de logiciels SIG (Systèmes d'informations géographiques) réalisé par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

- Arc Map : Permet d'éditer les fichiers en format géodatabase.
- Arc Hydro est un ensemble de modèles de données et d'outils qui fonctionnent sous ArcGIS pour prendre en charge les analyses de données sur les ressources hydriques superficielles.

HYFRAN-PLUS

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques. Ce logiciel a été développé par l'équipe du professeur Bernard Bobée (professeur Emérite à l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement INRS-ETE, Québec). Le critère d'information bayésien est utilisé pour déterminer la distribution qui s'ajuste le mieux aux données étudiées.

HEC-RAS

Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables.

Introduction

Les inondations représentent l'un des risques naturels le plus dévastant à l'échelle globale. Leurs impacts sont de plus en plus ressentis à cause de la conjugaison de deux facteurs principaux. Le premier concerne l'accroissement de l'aléa engendré par les changements climatiques qui expliquent le comportement devenu plus aléatoire et violent des phénomènes hydroclimatiques. Le second facteur est lié à l'accroissement de la vulnérabilité provoquée par la croissance démographique et l'expansion des activités anthropiques. Il en résulte une augmentation du risque, menaçant les populations riveraines, les infrastructures et les biens. En effet, il est évident que le risque d'inondation résulte de la présence d'un cours d'eau susceptible de déborder après de fortes précipitations. Cependant, la vulnérabilité à cet aléa augmente fortement avec le développement urbain car des situations de risques peuvent être créées là où il n'y en avait pas auparavant, d'où la nécessité d'une maîtrise de l'occupation des sols en zones inondables.

Au Maroc, après une longue période de sécheresse, les dernières décennies ont enregistré des chiffres record des précipitations, des crues et des inondations qui ont touché plusieurs villes à l'échelle nationale. Parmi les inondations qui ont atteint des ampleurs de catastrophe naturelle en provoquant le décès de plusieurs personnes on peut citer celles de l'Ourika en 1995, de l'Oued El Maleh en 2002 et Tanger, Nador, Fnidek, et Boulmane en 2008.

La présente étude concerne le centre de Sidi Bou Othmane qui fait partie de la province des Rehamna. Cette localité souffre des débordements récurrents des eaux issues des Chaabas de Chems et de Sidi Mbarek. Son contexte climatique semi-aride, son environnement hydro-géomorphologique et pluviométrique favorise le déclenchement des crues éclairées caractérisées par des grandes vitesses et des temps de montée assez courts.

Le présent rapport est structuré en quatre chapitres. Le premier est consacré à une présentation générale de la zone d'étude. Le deuxième chapitre comprend l'analyse par système d'information géographique (SIG) des différents paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant afin de comprendre les causes des variations des régimes hydrologiques et leur contribution dans la genèse des crues. Le troisième chapitre concerne le calcul des débits de pointe. Le quatrième et le dernier chapitre porte sur la modélisation hydraulique et l'élaboration d'une carte des zones inondables.

Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift

L'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 pour mission d'évaluer, de planifier, de développer et de gérer les ressources en eau au niveau de sa zone d'action. Cette dernière représente une aire d'investigation globale d'environ 24800 Km², comprenant deux ensembles hydrauliques : les bassins du Tensift (19800km²) et les bassins du Ksob-Igouzoulen (5000Km²).

Elle compte administrativement :

- La totalité de la préfecture de Marrakech et des provinces d'Essaouira et de Youssoufia.
- La majeure partie des provinces d'Al Haouz et de Chichaoua.
- Une partie des provinces de Kelaa des Sraghnas, de Rhamna et de Safi

L'Agence de Bassin Hydraulique du Tensift est chargée de :

- Réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeage ainsi que les études hydrologiques, hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant au plan quantitatif que qualitatif.
- Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- Réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les
- Inondations en collaboration avec les Collectivités locales.
- Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvements d'eau accordées.
- Réaliser toutes les mesures de qualité et appliquer les dispositions de la loi 10-95 et des lois en vigueur relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargée de l'environnement.
- Proposer et exécuter les mesures adéquates pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau ou pour prévenir les risques d'inondations.

Extrait de la loi 10/95

Chapitre I :

Présentation de la zone d'étude

Chapitre I- Présentation de la zone d'étude

I.1- Situation géographique et administratif

Le centre de Sidi Bou Othmane est localisé au centre du Maroc à 32 km au nord de la ville de Marrakech et à 30 km au sud de Benguerir. On y accède à partir de Marrakech en empruntant la route nationale 9 en direction de Casablanca. La localité de Sidi Bou Othmane se situe à la limite entre le massif des Jebilet et la plaine de la Bahira au nord de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT) (Fig. 1).

Sur le plan administratif, Sidi Bou Othmane est une municipalité de la province des Rehamna qui fait partie de la région de Marrakech-Tensift-Al Haouz. Il est desservi par la route nationale 9 et relié aux localités avoisinantes par les routes provinciales 2002, 2108, 2111 et 2114. Selon le recensement de 2014, la population de cette commune compte 9178 habitants (Tableau 1).

Tableau 1: Population de Sidi Bou Othmane selon le recensement de 2014

	Ménages	Population	Etrangers	Marocains
Province de Rehamna	57 514	315 077	65	315 012
Cercle de Sidi Bou Othmane	17 169	99 011	33	98 978
Municipalité de Sidi Bou Othmane	1 873	9 181	3	9 178

A l'échelle régionale, le réseau hydrographique se compose de nombreux oueds dont la longueur peut atteindre une vingtaine de kilomètres et où les eaux ne circulent que par temps de pluies. Ces derniers sont tributaires au nord de la plaine de la Bahira et au Sud de l'oued Tensift longe le massif des Jebilet le long de sa bordure méridionale. L'un des faits marquants de l'hydrologie de cette région réside dans l'existence du lac endoréique de Sed El Majnoun qui se situe 35 km à l'Est du centre de de Sidi Bou Othmane et qui constitue l'exutoire naturel de l'oued Sedrat et de ses affluents, après passage par oued Baratmi, oued Oayed, les larges zones d'épandage entre Sellam El Gherrab et bled Behira et enfin dayet Lahib près d'Al Gourich.

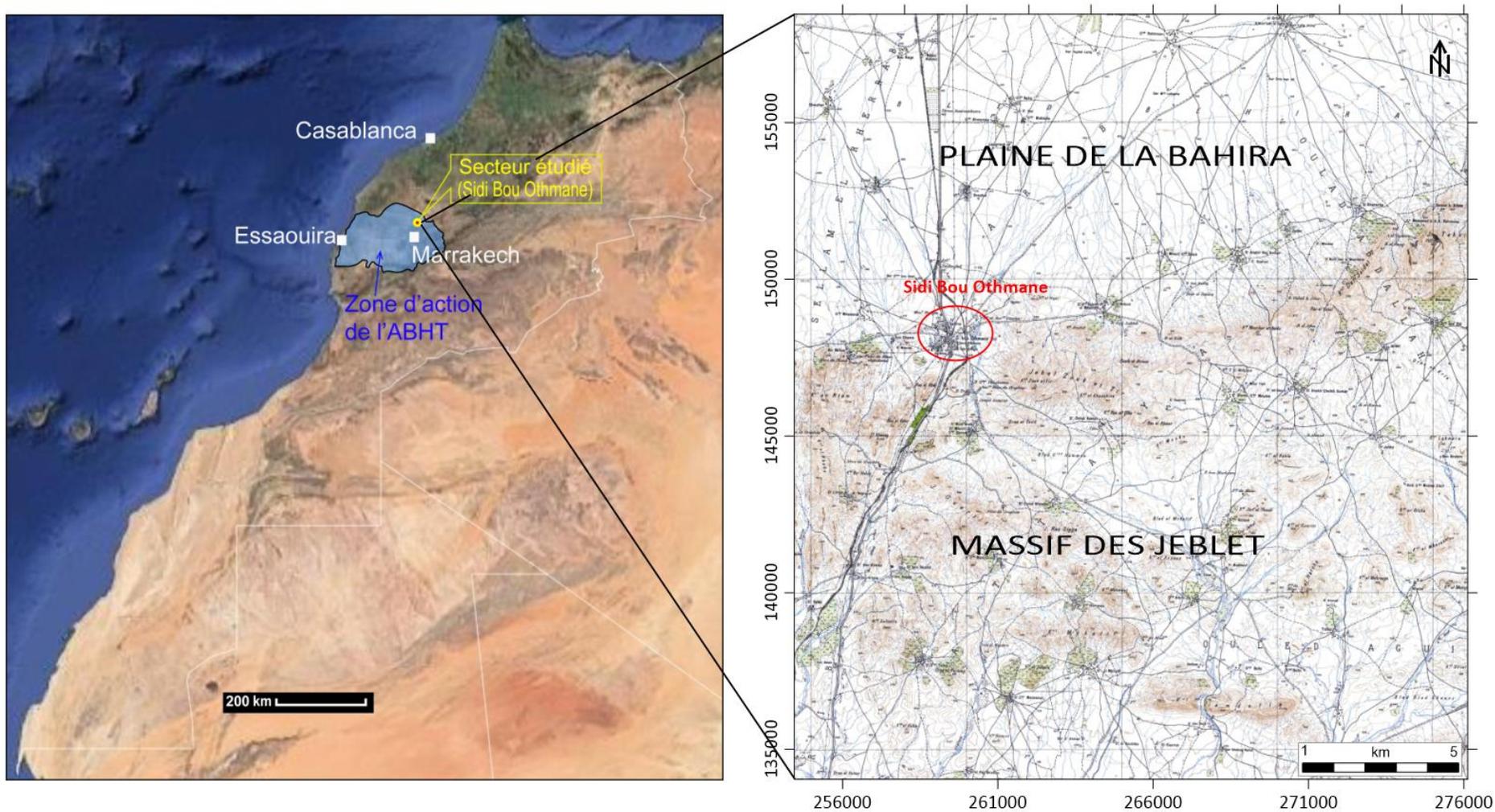


Figure 1 : Situation générale de la zone d'étude.

La figure 2 montre que la zone de Sidi Bou Othamane est caractérisée par un réseau hydrographique dont le développement a eu lieu à la faveur des reliefs du massif des Jebilet. Les ramifications de ce réseau indiquent que le ruissellement se fait du nord vers le sud sur le versant méridional de ce massif et du sud vers le nord sur son versant septentrional. Localisé sur ce dernier versant, le centre de Sidi Bou Othmane subit les écoulements des eaux de surface qui ruissellent le long des talwegs qui traversent cette localité. Cet écoulement se fait vers le nord y compris le long des deux Chaabas qui font l'objet de la présente étude (Fig. 3) et dont les exutoires se situent au niveau des sites de Chems et de Sidi Mbarek situés à l'ouest du centre de Sidi Bou Othamane. Les coordonnées Lambert de ces exutoires sont indiquées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2: Les coordonnées Lambert des exutoires Chems et Sidi Mbarek

	X	Y
Exutoire Chems	257522.3	148414.6
Exutoire Sidi Mbarek	257777.7	148326.2

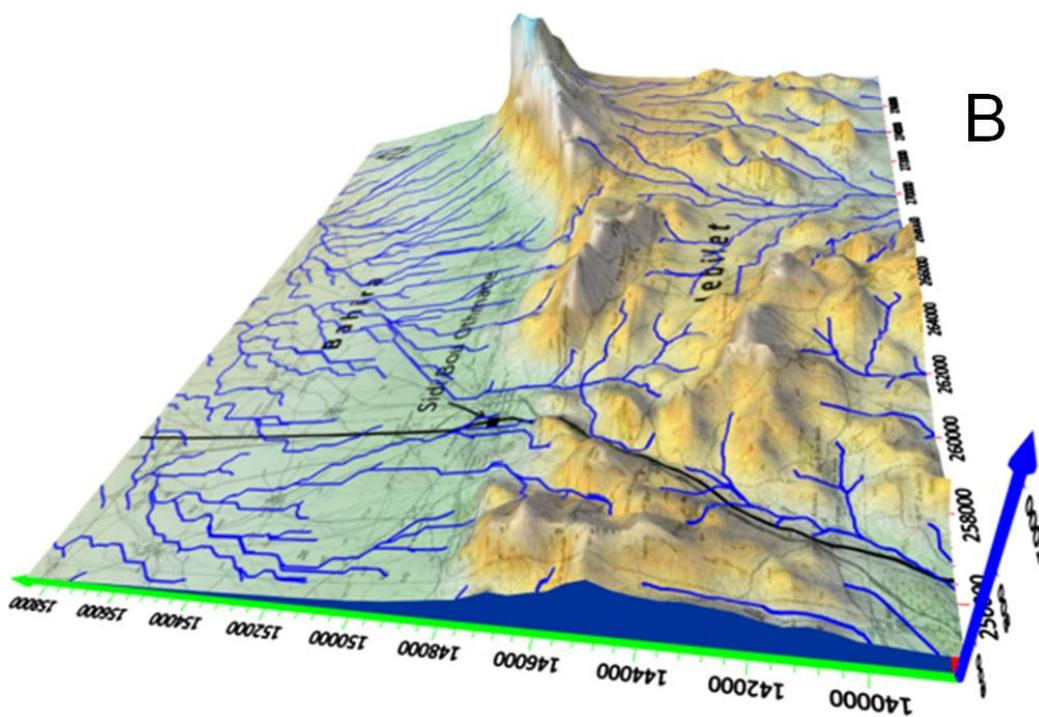
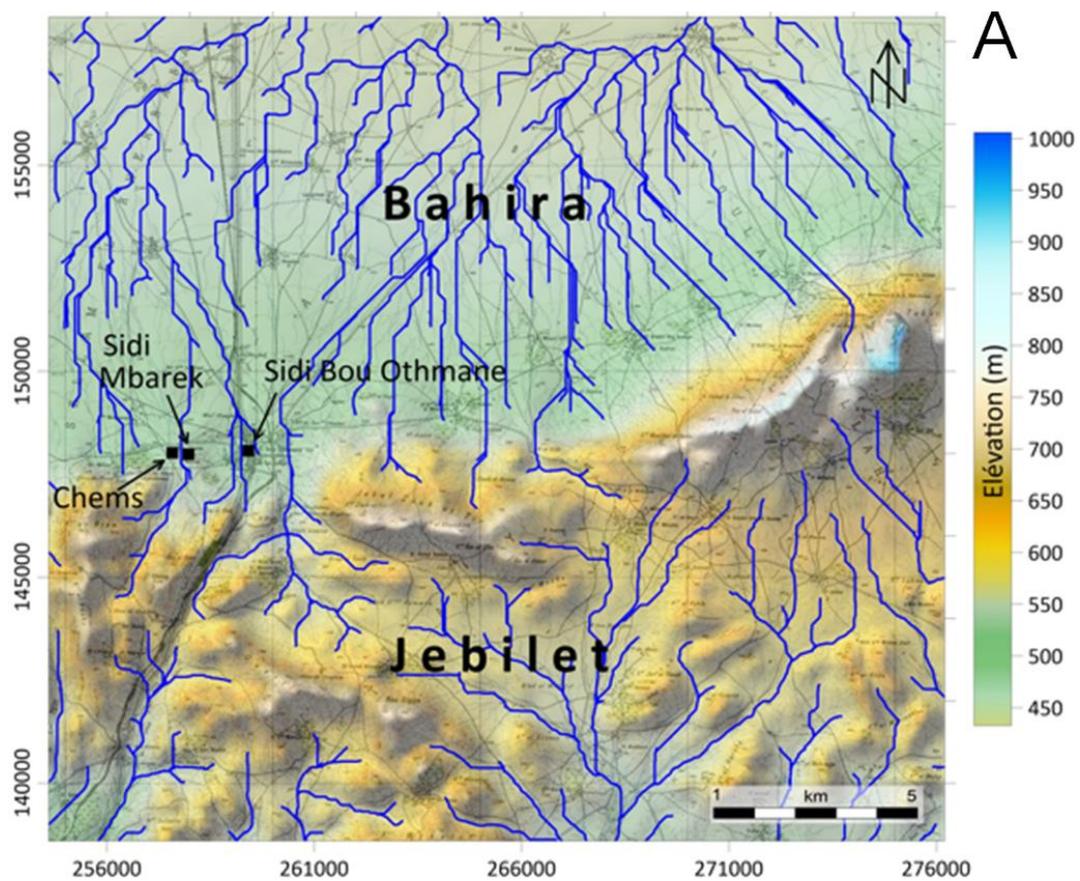


Figure 2 : Représentation de la topographie et du réseau hydrographique de la zone de Sidi Bou Othmane sous forme d'un relief ombré (A) et d'une perspective 3D (B).

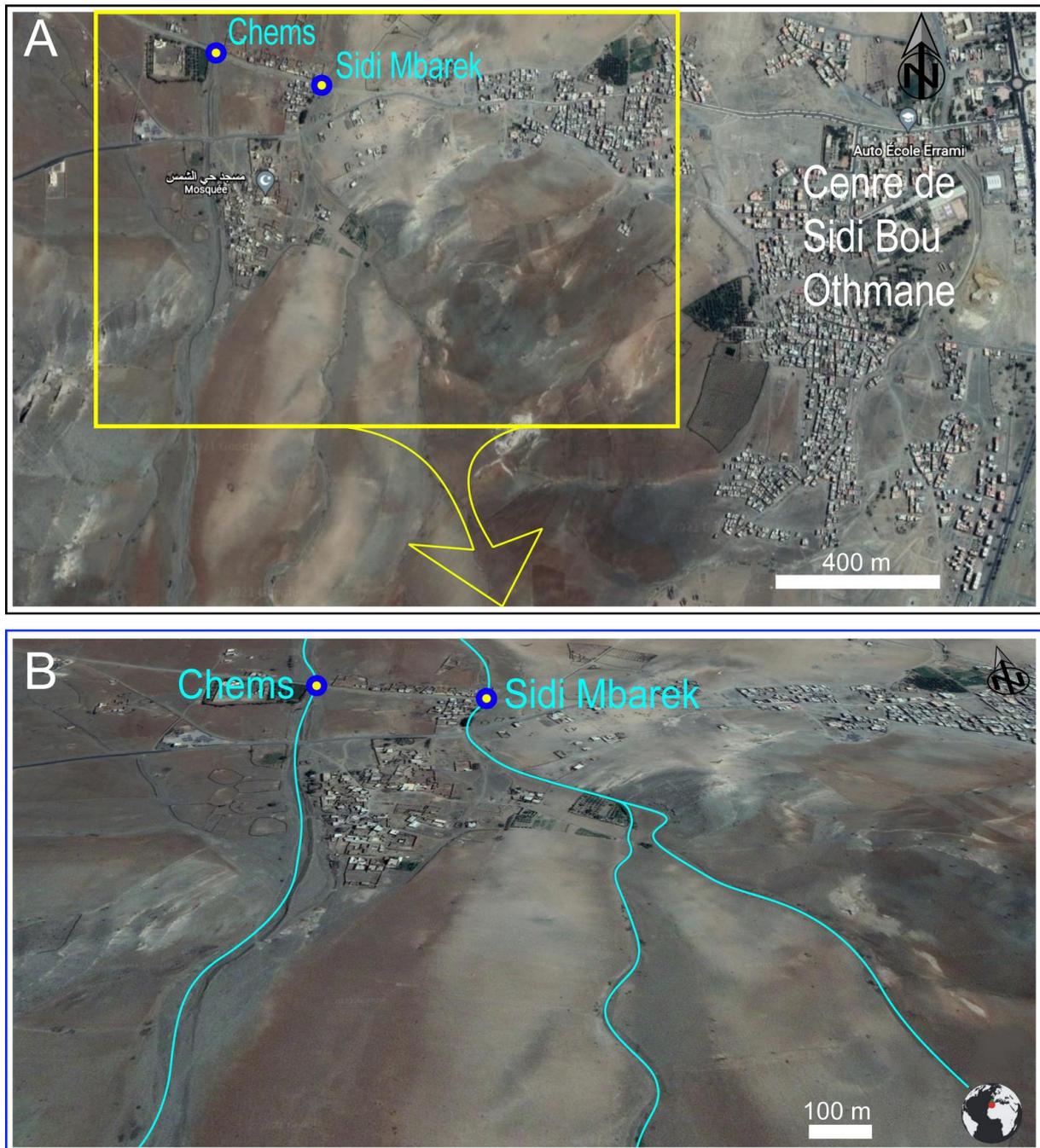


Figure 3 : Image Google Earth montrant la localisation des exutoires des deux Chaabas étudiées par rapport au centre de Sidi Bou Othmane (A) et le tracé des talwegs de ces Chaabas sur une vue Google 3D d'un extrait de la même image (B).

I.2- Contexte géologique

Le secteur étudié se situe au niveau de la bordure nord du massif des Jebilet centrales à la limite avec le bassin de la Bahira. L'unité centrale des Jebilet est principalement formée d'une entité volcano-sédimentaire baptisée série de Sarhlef, représentée en couleur bleu clair sur la figure 4 (Huvellin, 1977). Cette série, attribuée au Viséen supérieur Namurien, est constituée de Shales fins à passés lenticulaires, de calcaire bioclastiques et de grès. Leur dépôt a été accompagné d'une activité volcanique (Huvellin, 1977 ; Bordonaro, 1983 ; Aarab, 1995 ; Essaifi, 1995) pré-orogénique très intense, qui se manifeste par des épanchements de laves acides et basiques, ainsi que par des cinérites, des jaspes et des tufs acides auxquels sont associées des minéralisations sulfurées connues dans les Jebilet centrales.

Stratigraphiquement, deux séries principales sont reconnues dans les Jebilet centrales (Bordonaro, 1983) (Fig. 5) :

- **Une série basale** dite série de Sarhlef constituée principalement de pélites et caractérisée par une activité volcanique qui commence par des manifestations laviques (brèches, tufs, etc.) et se poursuit par un volcanisme extrusif à caractères basiques (Viséen Supérieur Namurien).
- **Série sommitale** essentiellement carbonatée, appelée série de Teqzim et formée de calcaires micro-conglomératiques et bioclastiques à la base et de pélites et grès au sommet (Viséen supérieur-Namurien).

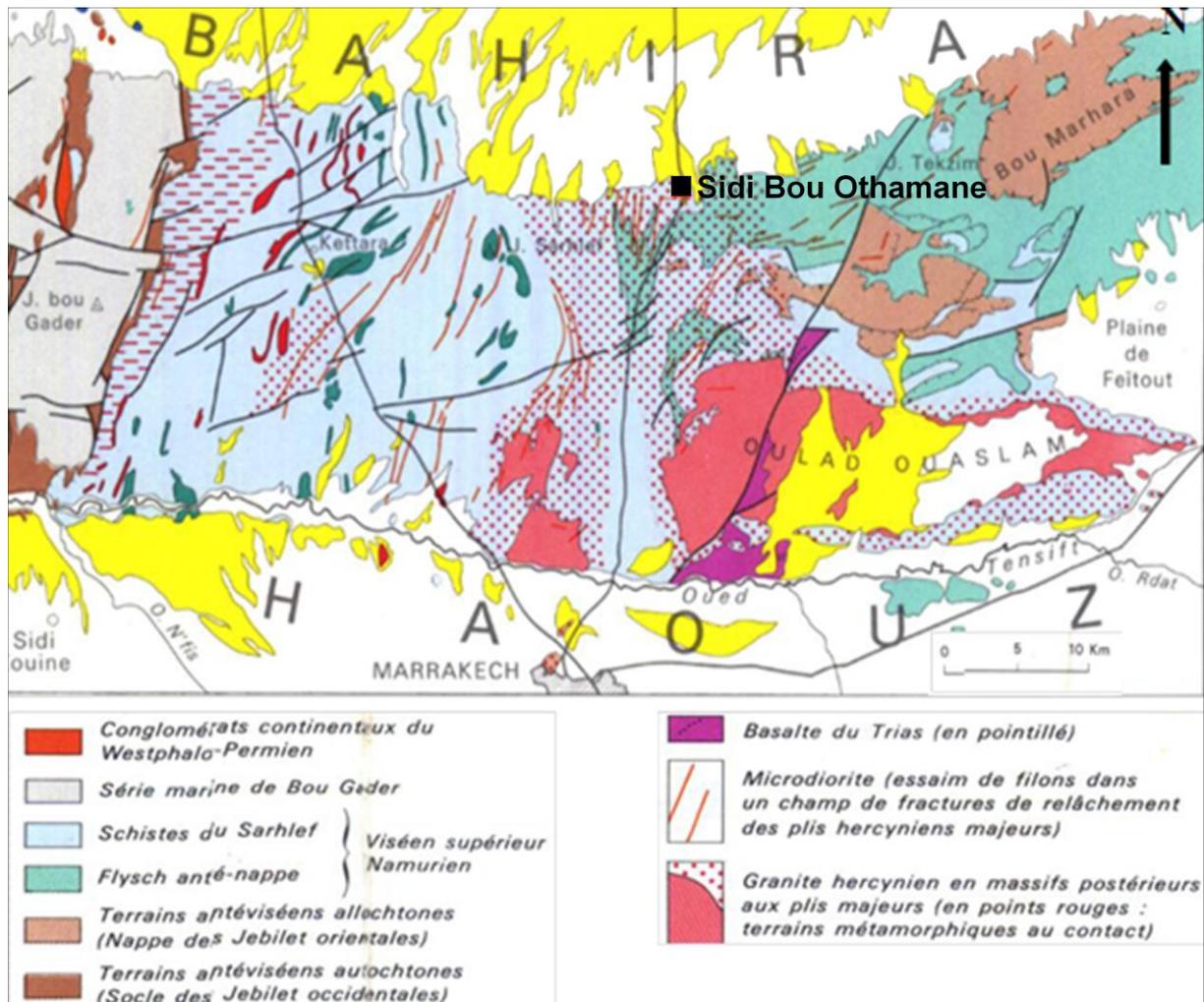


Figure 4 : Carte géologique du massif des Jebilet centrales (Huvelin, 1977).

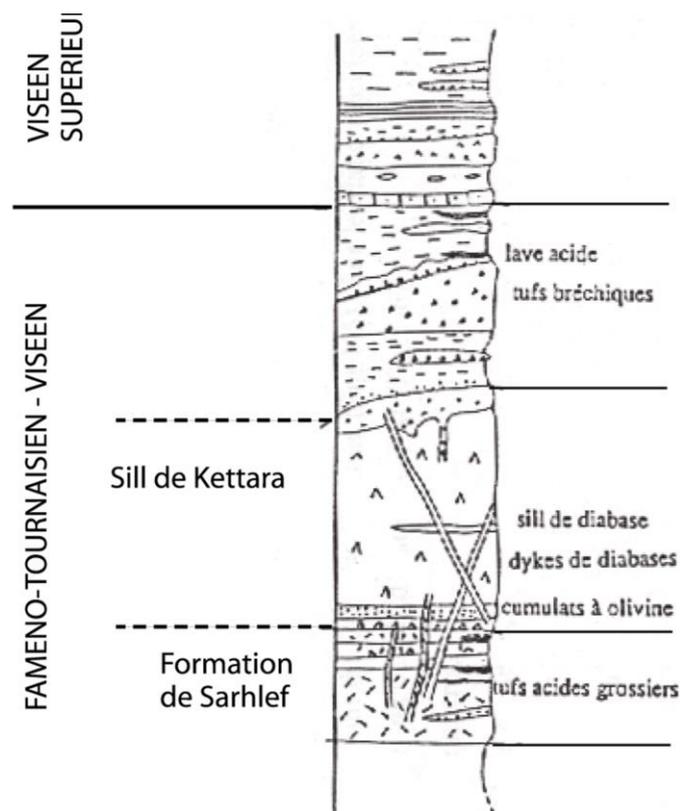


Figure 5 : Log stratigraphique synthétique des Jebilets centraes (Extrait de Hathouti, 1990).

Une importante faille sépare le massif des Jebilet centrales de la plaine de la Bahira. Cette dernière représente une fosse subsidente à comblement essentiellement miocène, pliocène et quaternaire (Fig. 6).

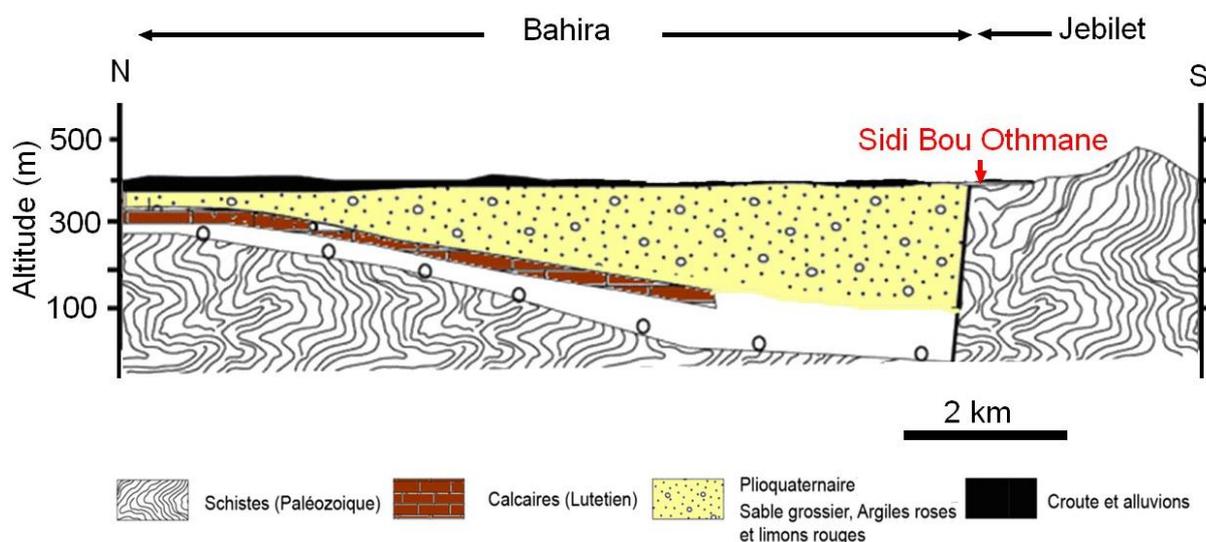


Figure 6 : Coupe géologique à travers la plaine de la Bahira passant par Sid Bou Othmane (Extrait de Karroum, 2015).

I.3- Diagnostic de la situation actuelle

I.3.1- Problématique d'inondations à Sidi Bou Othmane

Le risque d'inondations à Sidi Bou Othmane est conditionné par les aspects suivants :

- **Les aléas**

La ville de Sidi Bou Othmane se situe au piémont de petits Chaabas dénudées qui réagissent rapidement (moins d'une heure) aux orages qui surviennent sur les reliefs des Jebilet.

- **La vulnérabilité**

Bien que la majeure partie de la ville de Sidi Bou Othmane soit localisée en dehors des lits d'écoulement des eaux de surface, les constructions au rez-de-chaussée des habitations en position frontale avec les Chaabas se retrouvent submergées en cas de crues importantes. Le Douar Oulad Massaoud est particulièrement vulnérable aux débordements de Chaaba Chems. Cette dernière ne traverse pas le douar précité mais une brèche dans sa rive gauche au Sud-Est de celui-ci laisse passer les écoulements des eaux de ruissellement par temps de grandes crues.

- **Les enjeux**

La prévention contre la perte de vie humaine lors des crues rapides des cours d'eau qui traversent les zones habitées est un enjeu majeur pour les autorités concernées par la gestion de la problématique des inondations. Ceci dit, selon les informations disponibles, il n'y a jamais eu de dégâts humains liés aux inondations à Sidi Bou Othmane jusqu'à ce jour. L'enjeu majeur est de limiter les conséquences de cet aléa sur les biens et d'éviter que ça développe en dégâts humains dans le futur, en agissant de sorte à maintenir l'urbanisme des futures extensions du plan d'aménagement à un niveau homogène à celui des quartiers existants.

I.3.2- Crue historique

L'historique des inondations qui ont eu lieu à Sidi Bou Othmane révèle que celle survenue en 2014 représente incontestablement l'événement qui a le plus marqué les esprits des gens comme ça a été rapporté par les témoignages de la population locale,

recueillis surtout auprès des personnes les plus âgées. En effet, des débordements torrentiels des eaux de ruissellement ont brusquement envahi certains quartiers suite à des pluies diluviennes qui se sont brutalement abattues sur la région (Fig. 7).



Figure 7 : Niveau d'eau atteint lors de la dernière grande crue.

I.4- Contexte climatique

La zone de Sidi Bou Othmane fait partie d'une région où règne un climat semi-aride. Les pluies se produisent principalement entre octobre et avril, avec des pluies estivales occasionnelles. La moyenne des précipitations à long terme entre 1973 et 2015 est de 206 mm, bien que la moyenne des précipitations varie considérablement d'une année à l'autre. Les valeurs minimales des précipitations sont enregistrées entre mai et juillet. Par conséquent, il y a deux saisons distinctes : une saison sèche et une saison humide. D'après le diagramme ombrothermique, entre le mois d'octobre et avril sont considérés comme des mois humides, tandis que les autres mois sont considérés comme des mois secs (Fig. 8). La température moyenne varie de 13,3 °C à 30 °C (Karroum et al. 2017).

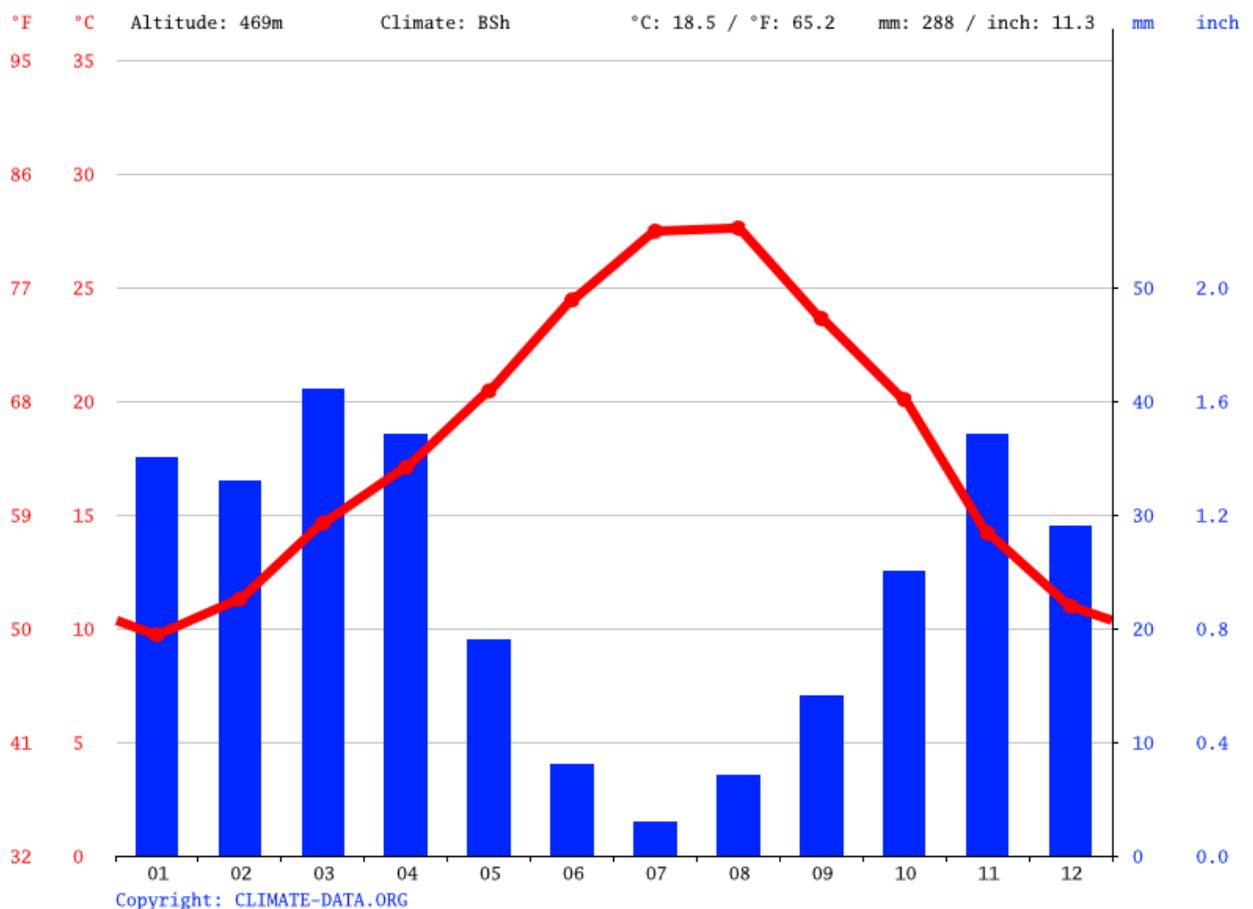


Figure 8: Diagramme Ombrothermique de la zone d'étude.

Chapitre II :

**Etude hydrologique des bassins
versants de la zone de Sidi Bou
Othmane**

Chapitre II- Etude hydrologique

Ce volet de la présente étude a pour objectif de comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins versants étudiés, moyennant la détermination de leurs caractéristiques physiographiques, morphologique, et du réseau hydrographique qui les draine. Cette étape de l'étude est indispensable car les caractéristiques précitées influencent fortement la réponse hydrologique des bassins versants, en particulier en ce qui concerne le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Pour la mener à bien, une prise en main du logiciel AcrGIS a été nécessaire au début du stage. Ce logiciel a été ensuite utilisé pour la délimitation du bassin versant, le tracé automatique du réseau hydrographique, la détermination des caractéristiques géométriques des bassins versants, de leur hypsométrie, et de leur pente.

II.1- Délimitation du bassin versant

La délimitation d'un bassin versant par rapport l'exutoire d'un cours d'eau est une opération qui consiste à déterminer les surfaces qui contribuent à alimenter l'écoulement de ce cours d'eau. Le bassin versant englobe l'ensemble des surfaces le long desquelles se produisent les ruissellements des eaux de surface qui convergent vers le cours d'eau en question et s'écoulent vers son exutoire.

Dans le cas de la présente étude, cette opération a concerné les des deux Chaabas Chems et Sidi Mbarek qui traversent la zone de Sidi Bou Othmane (Fig. 3). La délimitation des bassins versants de ces talwegs a été effectuée à l'aide de l'extension Archydro du logiciel ArcGIS. Ce module analyse le relief topographique autour des Chaabas à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et détermine les différents bassins versants et le réseau ainsi que leurs réseaux hydrographiques. Le MNT que nous avons utilisé possède une résolution de 30, il est disponible sur le web à partir du site (geograchid.blogspot.com) (Fig. 9).

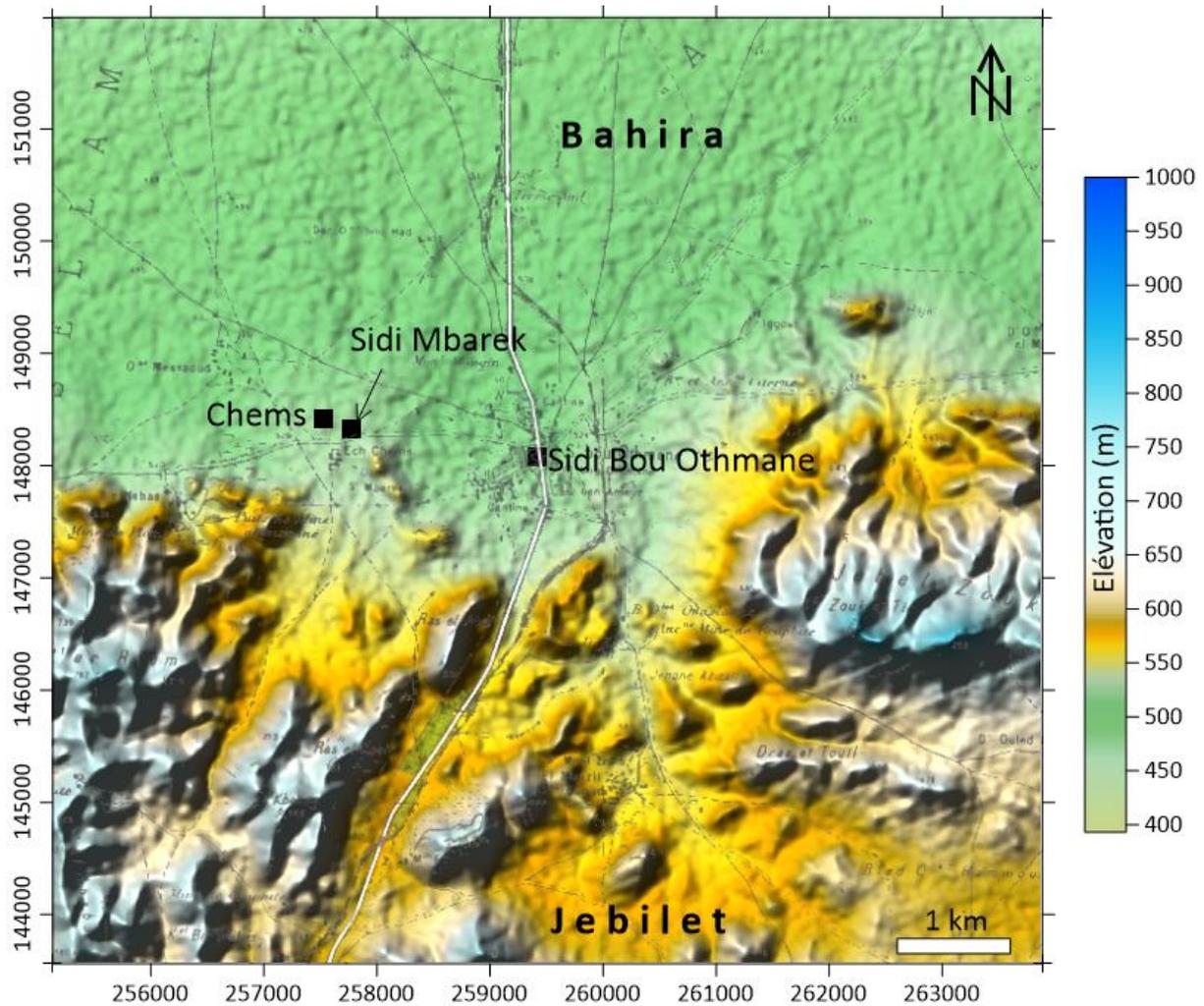


Figure 9: Modèle numérique du terrain de la zone d'étude établi à partir de données d'une résolution de 30 m.

II.1.1- Réseau hydrographique

Le traitement du modèle numérique de terrain de la zone de Sidi Bou Othmane par le module ArcHydro a permis de délimiter les petits bassins versant des deux Chaabas Chems et Sidi Mbarek et le tracé du réseau hydrographique correspondant. Les résultats de ce traitement sont présentés sur le figure 10. Ils montrent la forme allongée des deux bassins versants selon une direction NE-SW. En ce qui concerne le réseau hydrographique, on note que pour les deux Chaabas, le cours d'eau principal qui draine le bassin versant collecte les ruissellements des eaux de surface et les acheminent vers l'exutoire situé au nord du bassin (Fig. 10 et 11).

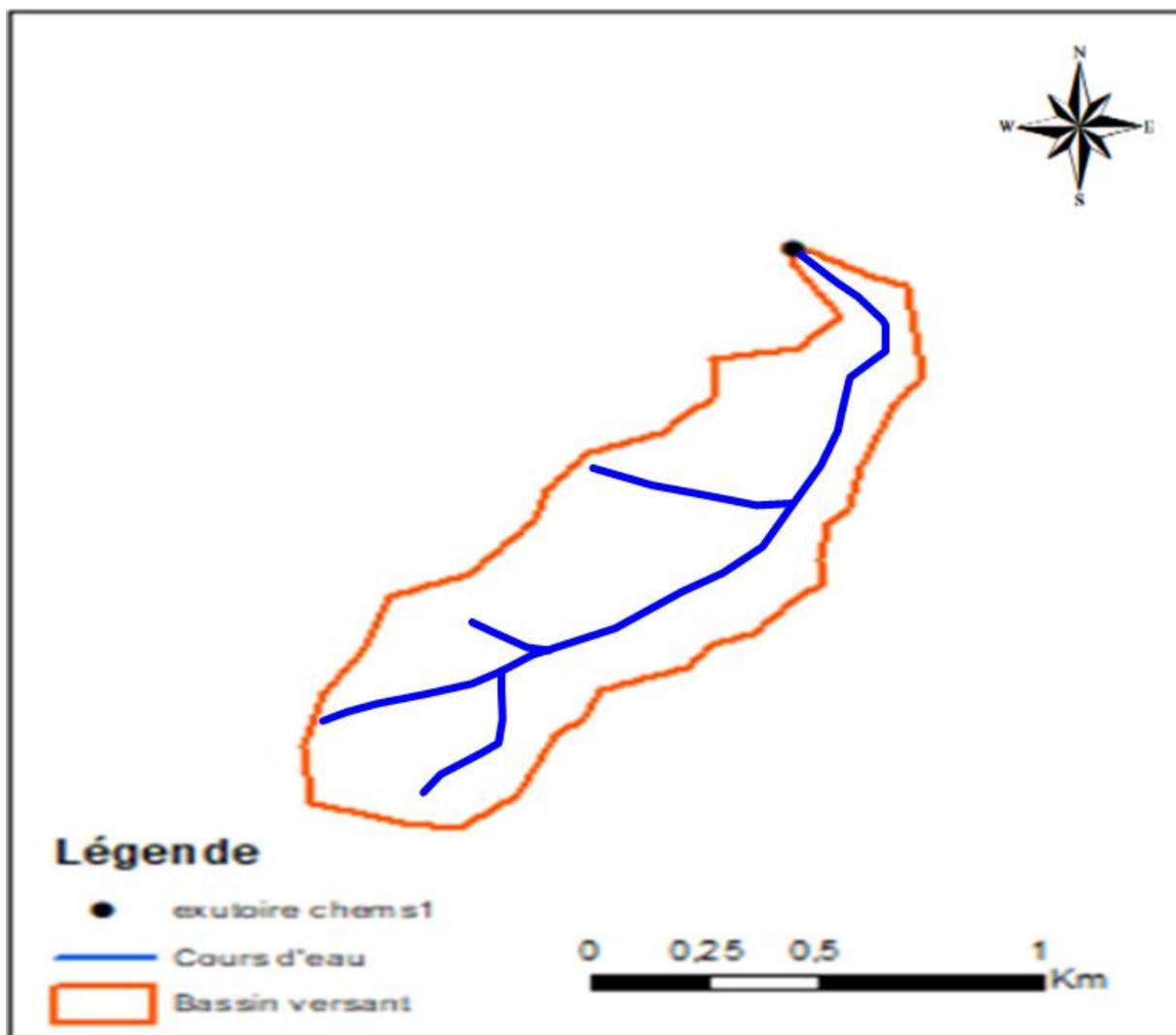


Figure 10: Bassin versant et réseau hydrographique de Chems

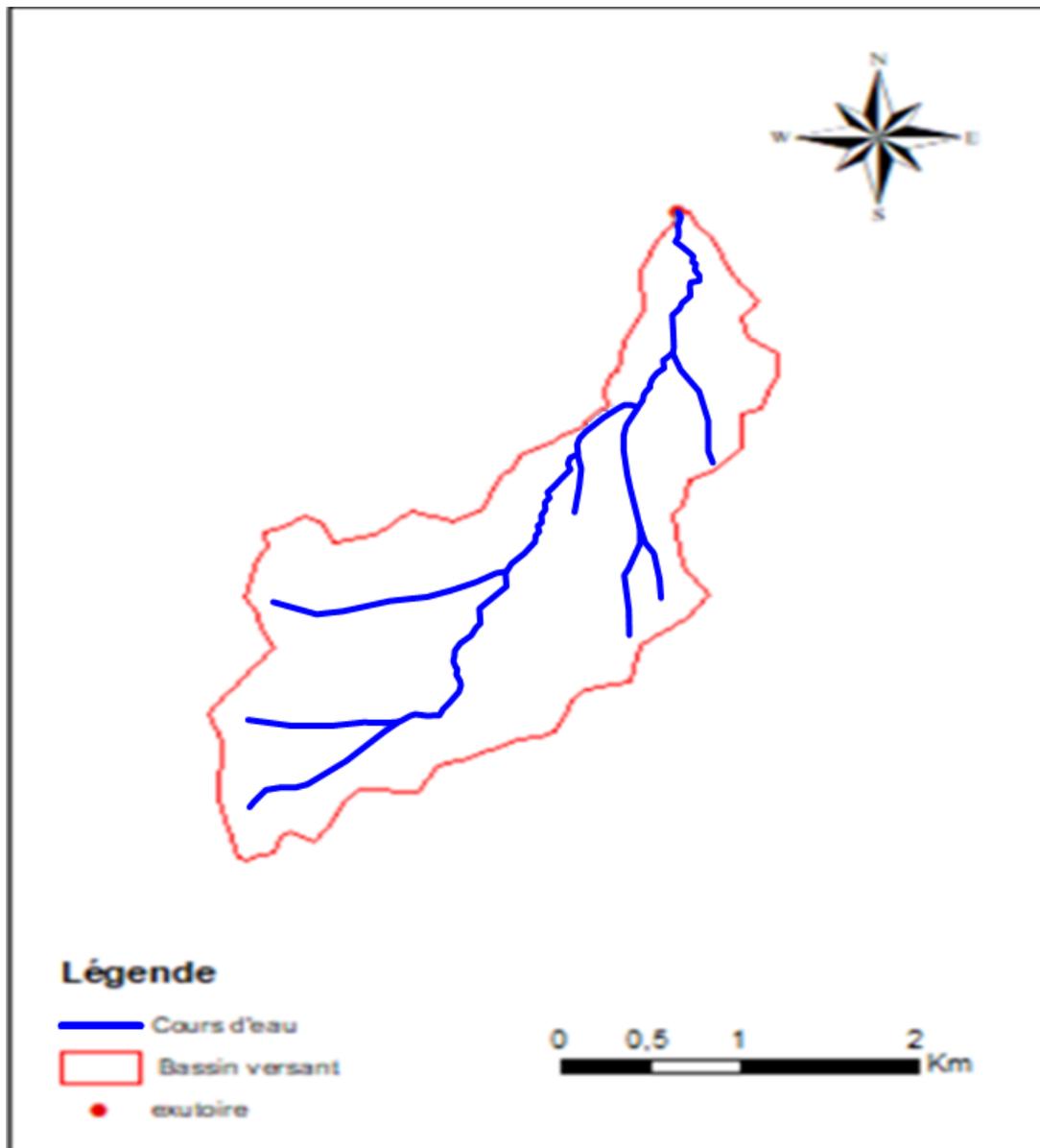


Figure 11: Bassin versant et réseau hydrographique de Sidi Mbarek

II.1.2- Caractéristiques géométriques du bassin versant

❖ Superficie et périmètre

Un bassin versant est délimité par la ligne de crête des reliefs topographiques limitrophes qui représentent une ligne de partage des eaux de surface qui ruissellent sur ces reliefs. La longueur de cette ligne correspond au périmètre du bassin versant et sa superficie représente l'aire de la surface délimitée par cette ligne.

Dans le cas de la présente étude, le logiciel ArcGIS a été utilisé pour délimiter les bassins versants des deux Chaabas étudiées et déterminer leur superficie et leur périmètre.

❖ Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité de Gravelius est admis par la communauté des hydrologues comme étant un paramètre qui caractérise la forme d'un bassin versant. Cet indice est défini par le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant même superficie:

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

P : périmètre du bassin en Km

A : Air du bassin en Km²

KG : Indice de compacité de Gravelius

❖ La longueur du cours d'eau

La longueur d'un bassin versant correspond au plus long parcours possible d'une goutte d'eau en terme de temps d'écoulement et non du plus long parcours métrique entre les crêtes du bassin et son exutoire. Cette distance est exprimée en km.

❖ Indice de forme de Horton

L'indice de forme de Horton est un paramètre sans dimension qui correspond au rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.

$$KH = \frac{A}{L} \times \frac{1}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Avec :

A : Air du bassin en Km²

L : Longueur du cours d'eau le plus long en Km

$KH < 1$ si la forme du bassin est allongée

$KH > 1$ si la forme du bassin est ramassées

❖ Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent d'un bassin versant est un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie que le bassin. Sa longueur (Leq) et sa largeur (leq) se calculent à partir des relations suivantes :

$$Leq = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$leq = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$\begin{cases} leq \times Leq = A \\ Leq + leq = \frac{P}{2} \\ K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \end{cases}$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

A : la superficie du bassin versant en Km²

Leq : Longueur du rectangle équivalent en km

leq : Largeur du rectangle équivalent en km.

❖ Dénivelée

La dénivelée représente la différence d'altitude, exprimée en mètre, entre deux points de la surface de la Terre. Pour un bassin versant, la dénivelée correspond à l'écart en élévation entre le point le plus haut et le point le plus bas du bassin.

$$DI = H_{MAX} - H_{MIN}$$

Le calcul de l'ensemble des paramètres décrits ci-dessus pour les deux bassins versants étudiés a donné les résultats suivants présentés dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3: Les caractéristiques physiques des bassins versants Chems et Sidi Mbarek.

Paramètre	Chems	Sidi Mbarek
Superficie (Km ²)	1.00	5.64
Périmètre (Km)	6.86	17.16
Altitude max (m)	686	767
Altitude min (m)	527	522
Indice de Gravilius	1.87	2.02
Longueur du cours d'eau (Km)	2.72	6.23
Indice de Horton	0.13	0.14
Longueur du rectangle équivalent (Km)	3.09	7.84
Largeur de rectangle équivalent (Km)	0.32	1.31
Dénivelée (m)	159	245

II.2- Caractéristiques topographiques

II.2.1- Hypsométrie du bassin versant

L'hypsométrie est la mesure des élévations topographiques par rapport au niveau de la mer. Cette section, on s'intéresse à l'analyse des variations de ces élévations au sein des deux bassins versants étudiés, basée sur la représentation de la surface de ces bassins en fonction de son altitude sous forme de diagrammes et de courbes (Fig. 12 et 13 et Tableau 4) et de cartes hypsométriques (Fig. 14 et 15).

❖ La courbe hypsométrique

C'est une courbe où l'on représente en abscisse le pourcentage de la surface totale du bassin versant qui se trouve au-dessus des altitudes portées sur l'axe des ordonnées. Cette courbe est obtenue en mesurant les surfaces comprises entre certaines tranches d'altitude délimitées par les courbes de niveaux.

❖ Le diagramme hypsométrique

Le diagramme hypsométrique est une représentation graphique où l'on reporte en abscisse la valeur de la superficie partielle comprise entre deux tranches d'altitudes successives portées en ordonnées.

Tableau 4: Répartition hypsométrique des bassins versants Chems et Sidi Mbarek.

Oued	Altitudes (m)	Superficie (Km ²)	Superficie (%)	Pourcentage au-dessus de la limite inférieure
Oued Sidi Mbarek	522-560	1.15	20.39	100
	560-600	1.01	18.04	79.61
	600-641	1.32	23.55	61.57
	641-680	1.25	22.32	38.02
	680-767	0.88	15.7	15.7
Oued Chems	527-556	0.31	31.15	100
	556-579	0.26	25.77	68.85
	579-602	0.24	24.34	43.08
	602-632	0.13	13.4	18.74
	632-686	0.05	5.34	5.34

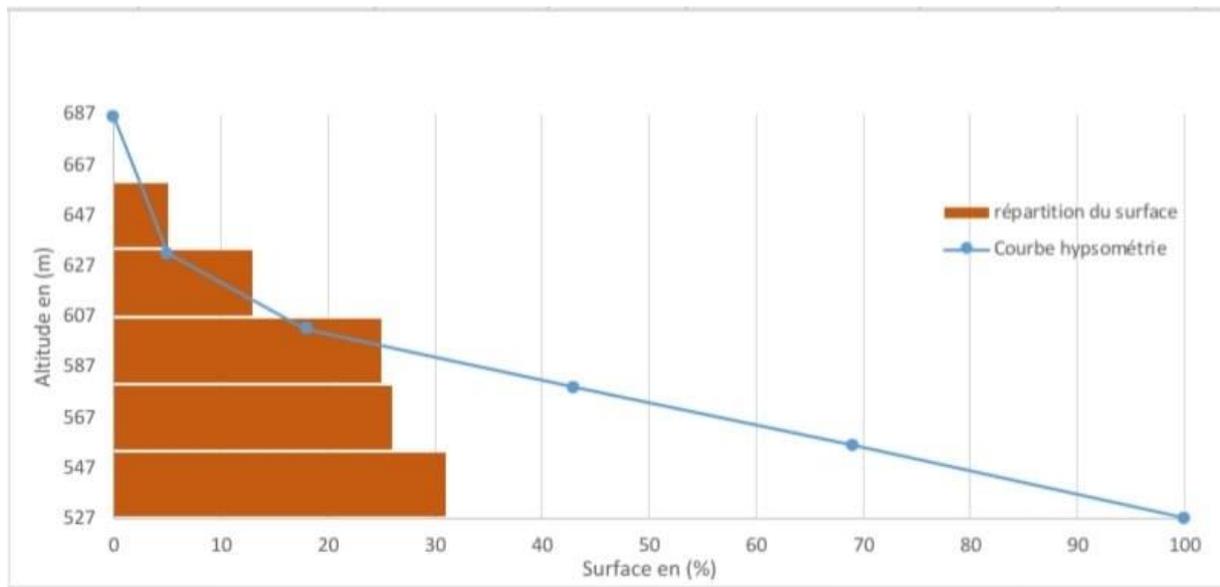


Figure 12 : Courbe et diagramme hypsométrique de bassin versant Chems.

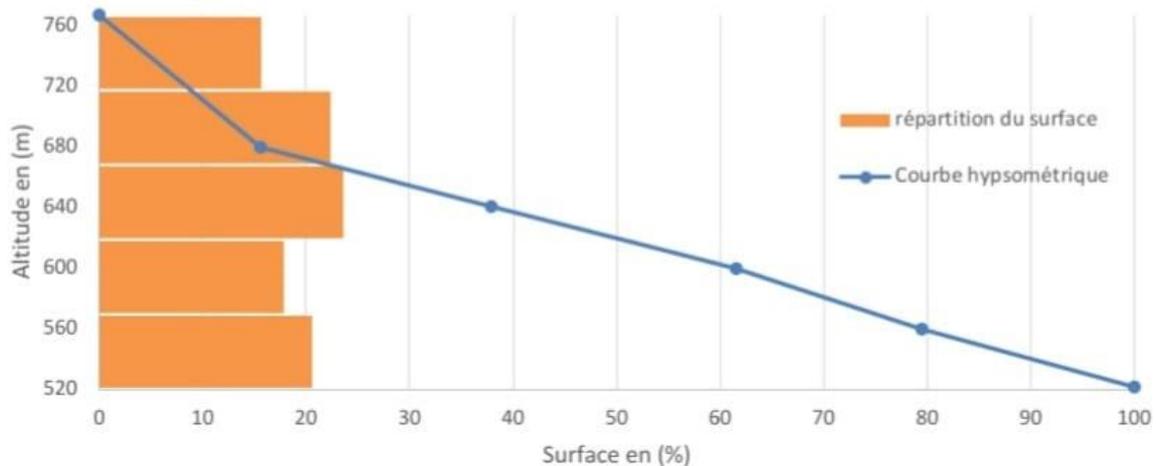


Figure 13 : Courbe et diagramme hypsométrique de bassin versant Sidi Mbarek.

Pour le bassin versant Chems :

- L'altitude maximum de 686m correspond au sommet du bassin versant.
- L'altitude minimum (exutoire) de 527m.
- L'altitude moyenne est 576 m.

Pour bassin versant Sidi Mbarek :

- L'altitude maximum de 767m correspond au sommet du bassin versant.
- L'altitude minimum (exutoire) de 522m.
- L'altitude moyenne est 619 m.

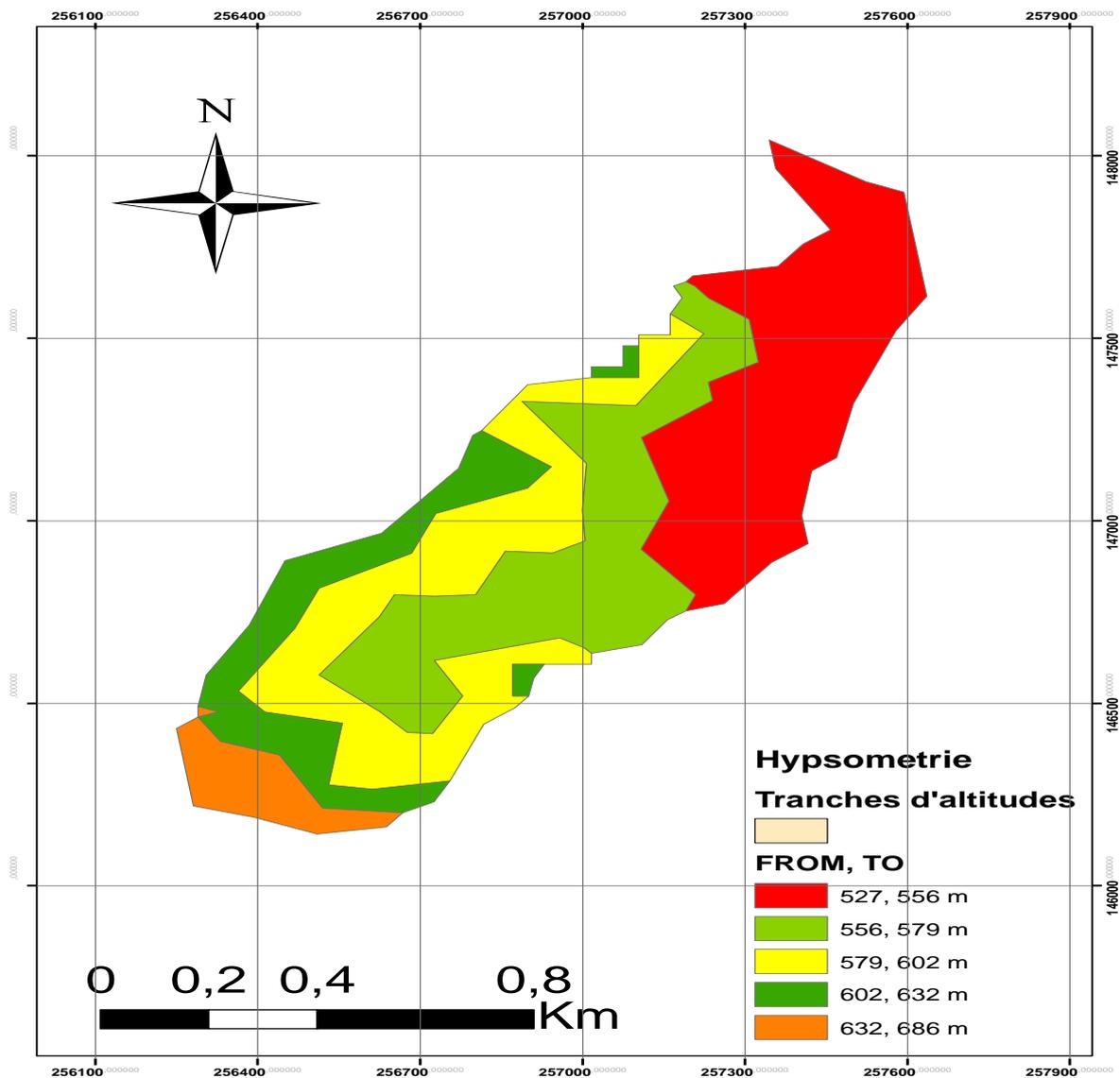


Figure 14: Carte hypsométrique du bassin versant Chems.

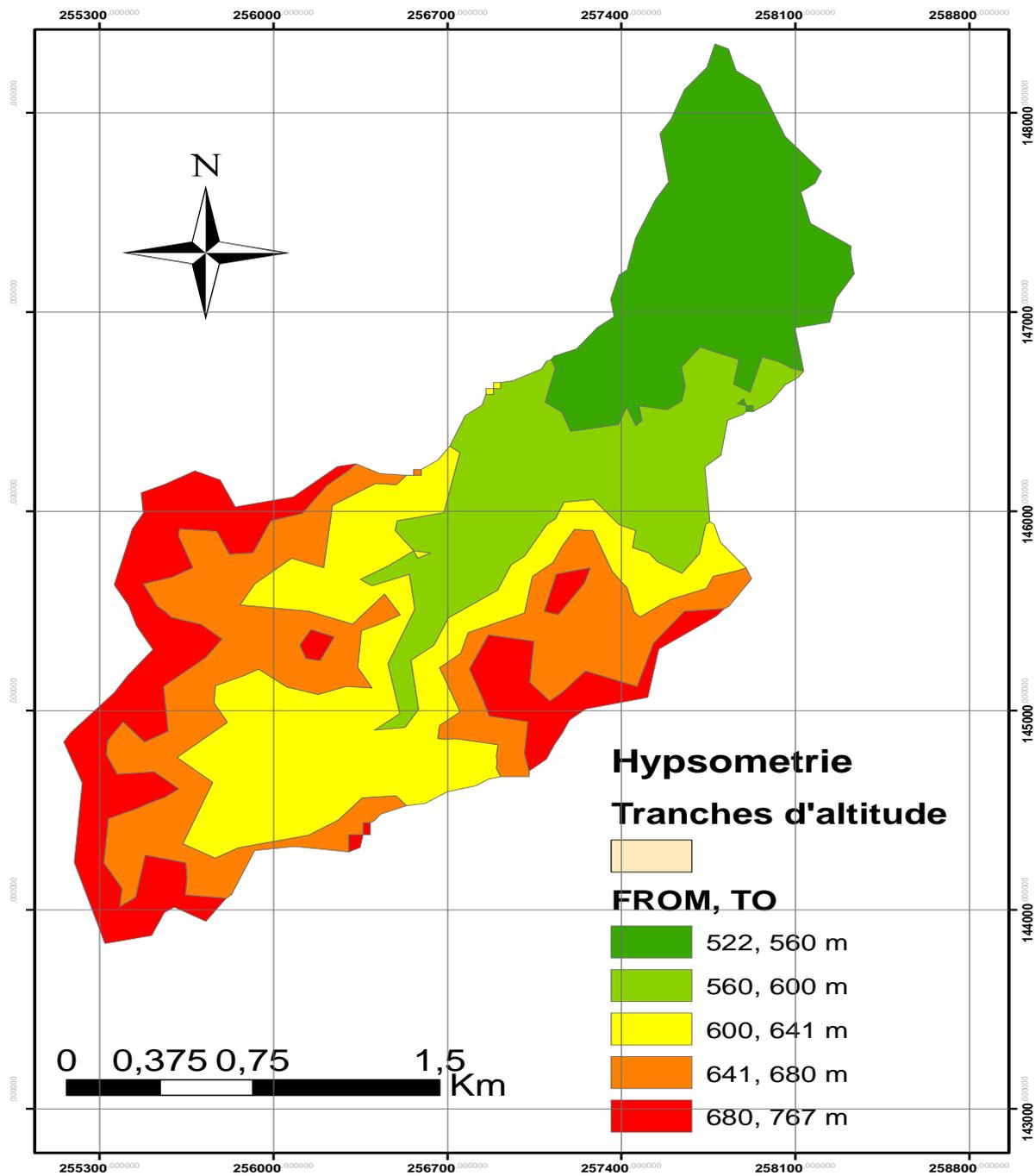


Figure 15: Carte hypsométrique du bassin versant Sidi Mbarek.

II.2.2- La pente

La pente du relief topographique influence fortement l'importance de l'écoulement des eaux de surface sur ces reliefs. En effet, la vitesse de l'écoulement est d'autant plus forte que la pente est grande. La pente est donc un paramètre qui conditionne le ruissellement, sur les versants et détermine en partie le temps de réponse (temps de concentration) du cours d'eau. Elle varie de façon plus ou moins irrégulière pour un même cours d'eau selon les structures géologiques traversées et diminue généralement d'amont en aval. La pente d'un bassin versant est estimée pour son cours d'eau principal.

❖ Pente moyenne du cours d'eau principal (PMCP)

$$P_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad \text{en m/km}$$

Où H_{max} et H_{min} représentent les altitudes extrêmes relevées sur le cours d'eau principal du bassin versant.

L : longueur du cours d'eau principal.

Le calcul de la pente moyenne du cours d'eau principal a donné les résultats suivants :

Bassin versant Chems : **58.1 m/km**

Bassin versant Sidi Mbarek : **31.62 m/km**

Ainsi, les deux bassins versants étudiés Chems et de Sidi Mbarek ont respectivement pour pente moyenne **5,8%** et **3,16%**.

Chapitre III :

Calcul des débits de pointe

Chapitre III- Calcul des débits de pointe

III.1- Introduction

Le but de ce chapitre est de faire une étude hydrologique visant à mieux connaître les crues au niveau de notre zone d'étude, en particulier en ce qui concerne les aspects relatifs au débit de pointe. Ce paramètre est d'une importance capitale pour la simulation hydraulique des deux bassins versants Chems et Sidi Mbarek qui fait l'objet du prochain chapitre. Dans un premier temps, nous avons estimé le temps de concentration en utilisant différentes formules. Ensuite, ne disposant pas de données hydrométriques sur les deux bassins versants étudiés, les débits de pointes relatifs aux crues dans ces deux bassins ont été calculés les méthodes suivantes :

- Méthodes empiriques : Mallet Gauthier, Hazan-Lazareviç et Fuller ;
- Méthode rationnelle ;
- Méthode d'ajustement ;
- Analogie avec les bassins versants limitrophes à l'aide de la formule de transposition de Franco-Rodier

III.2- Temps de concentration

On définit le temps de concentration, T_c , comme étant le temps nécessaire à une goutte pour atteindre l'exutoire du cours d'eau principal d'un bassin versant à partir du point le plus éloigné de cet exutoire sur l'ensemble bassin. Le temps de concentration est une caractéristique du bassin qui dépend essentiellement de la superficie de celui-ci, des pentes, de la longueur et de la densité du réseau hydrographique. La paramètre T_c peut être estimé par de formules empiriques, dont certaines sont plus adaptées au contexte du Maroc.

❖ Formule de Giandotti

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

Avec :

T_c : Temps de concentration en heures

S : Surface du bassin en km^2

L : Longueur du cours d'eau principale (le plus long) en km

Hm : Dénivelé du talweg en m (Différence entre l'altitude moyenne et son altitude min à l'exutoire)

❖ **Formule de Kirpich**

$$Tc(h) = 0,945 \frac{L^{1,155}}{H^{0,385}}$$

Avec :

L : Longueur du talweg le plus long en km

H: Dénivelé du talweg en m

❖ **Formule de Ventura**

$$Tc(h) = 0,1272\sqrt{S/I}$$

Avec :

S : Surface du bassin en km^2

I : Pente moyenne du talweg en m/m

❖ **Formule Van Te Chow**

$$Tc(h) = (0,868 \times \frac{L^3}{H})^{0,385}$$

Avec :

L : Longueur du talweg le plus long (km)

H : Dénivelé max du talweg en m

❖ **Formule Espagnole**

$$Tc(h) = 0,3 \times (\frac{L}{I^{0,25}})^{0,77}$$

Avec :

L : Longueur du talweg le plus long en km

I : Pente moyenne du plus long talweg en m/m

L'application de ces formules aux bassins versants de Chems et Sidi Mbarek a permis d'obtenir les résultats suivants (Tableau 5).

Tableau 5: Récapitulatif des diverses valeurs du temps de concentration.

Formules	Temps de concentration en heures	
	Chems	Sidi Mbarek
Formule de Giandotti	1.43	2.40
Formule de Ventura	0.53	1.77
Formule de Kirpich	0.43	0.94
Formule de Van Te Chow	0.43	0.94
Formule Espagnole	1.12	2.38

La valeur du temps de concentration retenue correspond à la moyenne des valeurs proches.

La moyenne des valeurs donne la valeur finale du temps de concentration de nos bassins versants:

Pour bassin versant Chems

$$T_c = \frac{1.43 + 0.53 + 0.43 + 0.43 + 1.12}{5} = 0.79 \text{ heures}$$

Pour bassin versant Sidi Mbarek

$$T_c = \frac{2.4 + 1.77 + 0.94 + 0.94 + 2.38}{5} = 1.69 \text{ heures}$$

La délimitation des bassins versants et les calculs de leurs différentes caractéristiques physiques, géomorphologiques et hydrologiques, on peut procéder au calcul des débits de pointe et de comprendre ainsi les causes et les conséquences de variation du régime hydraulique et son comportement lors d'une venue de crue.

III.3- Calcul des débits de pointe

III.1- Méthodes empiriques

Les formules empiriques sont nombreuses et il faut être conscient de la fragilité et de l'étroitesse du champ d'application de chacune d'elles. Ne perdons pas de vue que ces relations sont basées sur l'analyse de données recueillies dans des bassins aux conditions climatologiques et topographique particulières, et qu'on ne peut sans vérification les exploiter à d'autres bassins ayant des conditions différentes de celles pour lesquelles elles ont été établis.

❖ Méthode de Mallet-Gautier

$$Q(T) = 2K \log_{10}(1 + aH(T)) S \sqrt{(1 + 4 \log_{10} T - \log_{10} [S])} / \sqrt{L}$$

Avec :

Q(T) : Débit de pointe en m³/s pour la période de retour T

K : Coefficient variant de 0,50 à 6,00 (0,5 pour les grands bassins et 6 pour les petits bassins)

a : Coefficient variant de 20 à 30

S : Superficie du bassin versant en (Km²)

L : Longueur du plus long talweg (km)

Au Maroc les valeurs habituellement utilisées sont K = 2 et a = 20

Tableau 6: Débits calculés par la formule Mallet-Gautier

Paramètres utilisés						Débits calculés (m ³ /s)			
Nom BV	K	a	H(T) en mm	S	L	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
CHEMS	2	20	265	1	2.72	20.2	22.5	25.2	27.1
SIDIMBAREK	2	20	265	5.64	6.23	69.4	78.6	89.3	96.7

❖ Méthode de Fuller II

$$Q(T) = (1 + a \log T)(S^{0.8} + \frac{8}{3}S^{0.5}) \frac{4}{3} \frac{N}{100}$$

Avec :

Q(T) : Débit de pointe en m³/s de récurrence T.

a : Coefficient variant entre 0,7 et 0,8 au Maroc. Nous adoptons a = 0,8.

- 0.7 < a < 0.8 : Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées.
- 0.8 < a < 2: Pour les régions arides.
- 3 < a < 3.5: Pour les oueds sahariens.

T : Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100 ans).

S : Superficie du bassin versant en Km².

N : Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne. Nous prenons N = 85.

- N = 80 pour la plaine.
- N = 85 pour les régions accidentées.
- N = 100 en montagne.

Tableau 7: Débits calculé par la formule Fuller II.

Paramètres utilisés				Débits calculé (m ³ /s)			
Nom BV	a	A (km ²)	N	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
CHEMS	0.8	1	85	7.48	8.48	9.80	10.80
SIDI MBAREK	0.8	5.64	85	21.06	23,87	27.60	30.42

❖ Méthode de HAZAN - LAZAREVICK

La méthode d'Hazan et Lazarevic a été développée au Maroc. Elle donne le débit millénial en fonction de la superficie du bassin versant. Elle se base sur la formule suivante :

$$Q(1000 \text{ ans}) = K1 \times S^{K2}$$

Avec :

S : superficie du bassin versant en Km²

K1 et K2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie annuelle. (Voir tableau 2 de l'annexe). En nous basant sur la géographie et la

pluviométrie de la zone d'étude, nous avons attribué à ces deux paramètres les valeurs suivantes : **K1 =9.38 et k2=0.742.**

La transposition des débits des crues milléniales aux débits de récurrence T est obtenu par la formule du Fuller I :

$$Q(T) = Q(1000) \times (1 + a \log T)/(1 + a \log(1000))$$

Avec :

Q(T) : Débit de pointe en m³/s de récurrence T

a : Coefficient régional variant de 0.8 à 2 pour la partie nord du Maroc, 2 à 3.5 pour le Rif Occidental.

Nous prenons a = 0.8 (Voir tableau 1 de l'annexe)

Tableau 8: Débits calculé par la formule HAZAN-LAZAREVIC.

Paramètres utilisés					Débits calculé (m ³ /s)			
Nom BV	A (km ²)	a	K1	K2	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
CHEMS	1	0.8	9.38	0.742	4.96	5.63	6.51	7.17
SIDI MBAREK	5.64	0.8	9.38	0.742	17.92	20,32	23.48	25.88

Les tableaux 9 et 10 ci-dessous synthétisent les débits de pointes calculés les différentes formules empiriques. Ces résultats montrent que les valeurs obtenues par la formule Mallet-Gautier sont largement supérieures à celles des deux autres méthodes.

Tableau 9: Résultats des débits de pointe calculés par les formules empiriques pour le bassin versant de Chems.

Débits m3/s			
	HAZEN-LAZAREVICK	FULLER II	MALLET-GAUTIER
Q (10)	17.92	21.06	69.4
Q(20)	20.32	23.87	78.6
Q(50)	23.48	27.60	89.3
Q(100)	25.88	30.42	96.7

Tableau 10: Résultats des débits de pointe calculés par les formules empiriques pour le bassin versant de Sidi Mbarek.

Débits m3/s			
	HAZEN-LAZAREVICK	FULLER II	MALLET-GAUTIER
Q (10)	4.96	7.48	20.2
Q(20)	5.63	8.48	22.5
Q(50)	6.51	9.80	25.2
Q(100)	7.17	10.80	27.1

III.2- Méthode rationnelle

❖ Formule de la méthode rationnelle

Cette méthode est bien adaptée aux petits bassins versants dont la superficie n'excède pas 150 km^2 . Elle admet que la fréquence ou la période de retour du débit maximum déterminé est égale à celle de la pluie maximale moyenne observée dans le bassin au cours de la durée T_c .

$$Q_{max}(T) = \frac{C I(T_c, T) S}{3.6}$$

$I(T_c, T)$: Représente l'intensité de la pluie moyenne maximale tombé au cours de T_c et de période de retour T.

I : exprimée en mm/h

S : la superficie du bassin en km^2

C : le coefficient d'écoulement moyen

T_c : le temps de concentration du bassin, exprimé en heures

Q_{max} : Calculé en m^3/s

❖ Intensité

L'intensité correspondante au temps de concentration de période de retour T est donnée par :

$$I(T, t_c) = a(T) \times t^{-b(T)}$$

Avec :

t : temps de concentration en heures

I : intensité en mm/h

a, b : Paramètres de Montana.

Les paramètres de Montana **a** et **b** ont été déterminés de l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift (Tableau 11). Les intensités de pluie calculées par la formule ci-dessus pour les périodes de 10, 20, 50 et 100 ans au niveau des deux bassins étudiés sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 11: Les coefficients de Montana

Période de retour T	a	b
2 ans	3.017	0.638
5 ans	4.799	0.617
10 ans	6.000	0.611
20 ans	7.156	0.608
50 ans	8.657	0.605
100 ans	9.782	0.604

Tableau 12: les intensités calculées dans chaque temps de retour T.

Bassin versant	Intensité de pluie (mm/h)			
Nom BV	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Chems	34.2	40.8	50.4	57
Sidi Mbarek	21	25.8	31.8	36

❖ **Coefficient de ruissellement**

Les coefficients de ruissellement recommandé par l'organisme français SETRA (Service des Etudes sur le Transport, les Routes et leurs Aménagements) pour des bassins versants de superficie inférieure à 100 km², sont présentés dans le tableau 13 ci-dessous.

Tableau 13: Coefficient de ruissellement par SETRA (novec)

Nature de la couverture végétale	Petits bassins de 0 à 10				Grands bassins de 10 à			
	Une pente de :							
	Moins de 5%	De 5% à 10%	de 10% à 30%	Plus de 30%	Moins de 5%	De 5% à 10%	De 10% à 30%	Plus de 30%
Plates formes et chaussées de routes	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Terrain dénudé ou à végétation non couvrant, terrains déjà entachés par l'érosion	0.80	0.85	0.90	0.95	0.70	0.75	0.80	0.85
Cultures couvrantes, céréales hautes, terrains de parcours, petite brousse clairsemée	0.75	0.80	0.85	0.90	0.52	0.60	0.72	0.80
Prairies, brousses denses, savane à sous-bois	0.70	0.75	0.80	0.85	0.30	0.36	0.42	0.50
Forêt ordinaire en futaie, sous-bois touffus	0.30	0.50	0.60	0.70	0.13	0.20	0.25	0.30
Grande forêt primaire	0.20	0.25	0.30	0.40	0.15	0.18	0.22	0.25

Les coefficients de ruissellement deux bassins versants étudiés Chems et Sidi Mbarek ont été estimés respectivement à 0.85% et 0.80%. Ils sont tous les deux dépourvus de végétations et possèdent des pentes faibles de l'ordre de 5 à 10% pour Chems et 0 à 5% pour Sidi Mbarek.

Tableau 14: Débits calculés par la méthode rationnelle

Nom bassin versant	Débits calculés par la méthode rationnelle en m ³ /s			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Chems	8.07	9.63	11.9	13.45
Sidi Mbarek	26.32	32.34	39.85	45.12

III.3- Méthode d'ajustement et transposition

Cette méthode est basée sur des données de débits instantanés maximaux annuels recueillis au niveau du bassin versant concerné. Durant la présente étude, l'ajustement a été effectué en utilisant les données des débits enregistrées au niveau de la station hydrologique de Sidi Rahal, la plus proche des deux bassins versants étudiés. Cette tâche a été effectuée à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS qui permet d'ajuster les données par plusieurs modèles probabilistes et de retenir le meilleur. Ce logiciel offre la possibilité d'ajuster les données selon les lois prédéfinies de Gumbel, Gamma, Gev, Lognormale et Exponentielle. Pour chaque loi, on obtient un tableau récapitulatif des paramètres statistiques (Tableau 15). La loi retenue est celle qui donne le meilleur ajustement et dont les critères d'information d'Akaike (AIC) et Byésien (BIC) sont les plus faibles (Fig. 16).

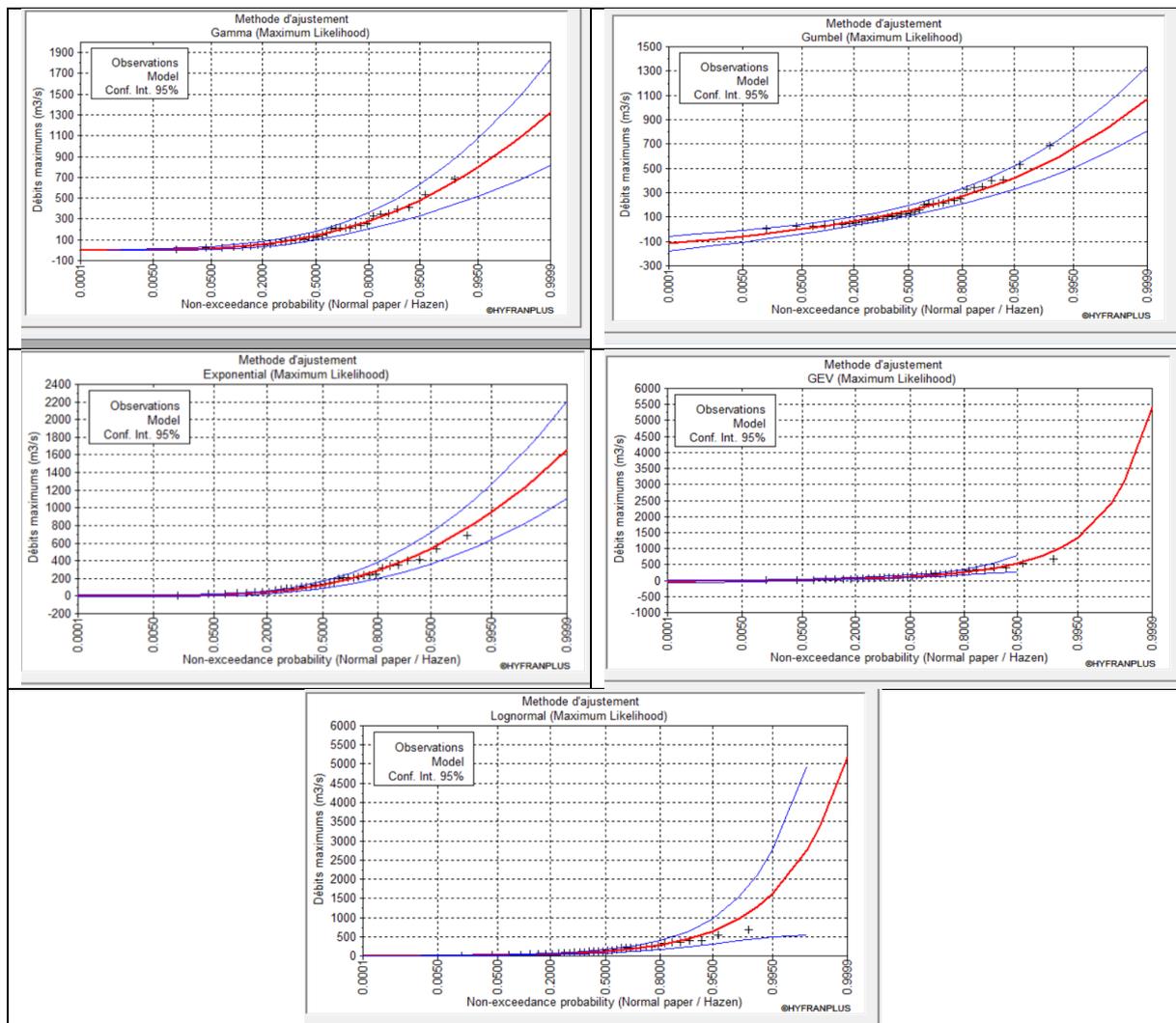


Figure 16: Ajustement graphique des débits maximaux instantanés enregistrés au niveau de la station de Sidi Rahal selon différentes lois statistiques.

❖ Analyse des critères statistiques

Le tableau 15 ci-dessous présente les critères d'information d'Akaike (AIC) et Byésien (BIC) obtenus pour les différentes lois statistiques utilisées pour l'ajustement des données. Ces résultats montrent que la loi Gamma représente le meilleur ajustement de la variable débit maximale instantané.

Tableau 15 : Critères de comparaison des ajustements des données de débits de pointe à la station de Sidi Rahal selon différentes lois pour une période de 100 ans

Lois statistiques	AIC	BIC
Gamma	447.699	450.836
Exponential	449.761	452.928
Lognormal	451.255	454.423
GEV	452.600	457.351
Gumbel	454.577	457.744

Les débits de pointe retenus sont présentés dans le tableau 16. Leur examen permet de constater que pour les périodes de retour de 10 ans et 20 ans, les valeurs montrent une faible variation d'une loi à l'autre. Cependant, pour les grandes périodes de retour, les débits affichent de grands écarts entre les valeurs des différentes lois. On retiendra les estimations de la loi Gamma qui est plus adaptée à nos données.

Tableau 16: Estimation des débits de retour à la station de Sidi Rahal selon différentes lois d'ajustement

	Lois statistiques	Période de retour			
		10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Débit estimé (m³/s)	Gamma	382	480	608	703
	Exponential	414	539	703	828
	Lognormal	442	638	964	1270
	GEV	383	529	780	1030
	Gumbel	348	423	520	593

❖ Transposition

Afin de déterminer les débits de pointe des deux bassins versants étudiés qui ne sont pas jaugés, on se base sur la transposition des débits de la station de Sidi Rahal, la plus proche de notre zone d'étude, après détermination du coefficient de Franco-Rodier à l'aide de la formule suivante :

$$Q_p = 10^6 \cdot \left(\frac{S'}{10^8}\right)^{1-\frac{K_p}{10}}$$

Avec :

Q_p : débit de pointe m^3/S du bassin cible

S' : Surface du bassin cible en km^2

K : paramètre de Franco-Rodier

Le paramètre K est déterminé selon la surface du bassin d'origine (S) selon la formule suivante :

$$K = 10 \cdot \left[1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{Q}{10^6}\right)}{\ln\left(\frac{S}{10^8}\right)} \right) \right]$$

Avec :

S : Surface du bassin Sidi Rahal

Q : débit du bassin Sidi Rahal

Tableau 17: Débit calculé par la méthode Franco-Rodier

Périodes de retours	Débit de point Sidi Rahal	k_p	Débit de point Chems	Débit de point Sidi Mbarek
10	382	3.52	6.54	20.08
20	480	3.71	9.28	27.57
50	608	3.90	13.18	37.86
100	703	4.02	16.44	46.26

❖ Débits retenus

Les tableaux 18 et 19 synthétisent l'ensemble des résultats des calculs des débits de pointe par les différentes méthodes au niveau des deux bassins versants de Chems et de Sidi Mbarek. Parmi ces résultats, nous retenons ceux obtenus par la méthode rationnelle qui est la plus adaptée aux petits bassins versants, dont la superficie n'excède pas 150 km², tels ceux qui font l'objet de la présente étude. Cette méthode est recommandée par l'ABHT qui a une grande expérience dans ce genre d'étude à l'échelle régionale du grand du bassin versant de l'ouest Tensift.

Tableau 18: Débits obtenus par les différentes méthodes au niveau du bassin versant de Chems.

	Débits calculé en m^3/s			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Mallet-Gauthier	20.2	22.5	25.2	27.1
Fuller II	7.48	8.48	9.80	10.80
Hazan-Lazarevic	4.96	5.63	6.51	7.17
Méthode rationnelle	8.07	9.63	11.9	13.45
Franco-Rodier	6.54	9.28	13.18	16.44

Tableau 19: Débits obtenus par les différentes méthodes au niveau du bassin versant de Sidi Mbarek.

	Débits calculé en m^3/s			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Mallet-Gauthier	69.4	78.6	89.3	96.7
Fuller II	21.06	23,87	27.60	30.42
Hazan-Lazarevic	17.92	20,32	23.48	25.88
Méthode rationnelle	26.32	32.34	39.85	45.12
Franco-Rodier	20.08	27.57	37.86	46.26

III.4- Etablissement de l'hydrogramme de crue

Un hydrogramme de crue est un graphique indiquant le débit en fonction du temps à un point donné d'une rivière. La forme de l'hydrogramme de crue est indispensable dans la simulation hydraulique, la reconstitution de ce dernier repose sur la définition du temps de concentration et du débit de pointe.

Il y a plusieurs formes d'hydrogramme de crue qui diffèrent en termes d'existence de données hydrologiques. Dans le cas de notre étude on s'intéresse à élaborer un hydrogramme de crue exponentielle qui se base sur la formule suivante (Graphique 1 et 2) :

$$Q(t) = Q_p \times \frac{t}{t_c} \times \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right)^3$$

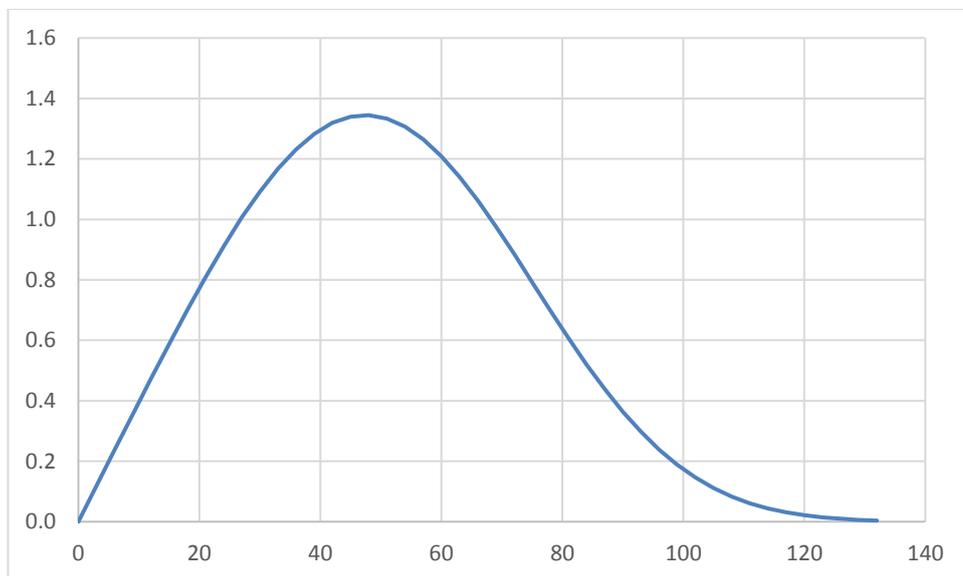
Avec :

Q :Débit à l'instant t (m^3/s)

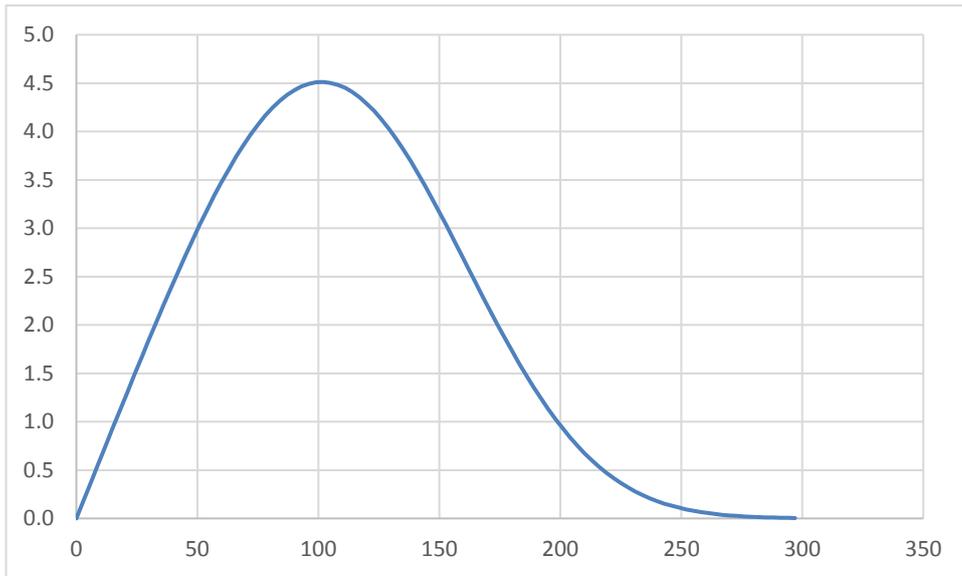
Q_p :Débit de pointe de la crue en (m^3/s) (Dans notre cas on a utilisé le débit centennale de la méthode rationnelle.)

t :Temps en (min)

t_c :Temps de pointe($t=t_c$ à $Q=Q_p$) en (min)



Graphique 1:Hydrogramme de crue centennale de Sidi Mbarek



Graphique 2: Hydrogramme de crue centennale de Chems

Chapitre IV :

**Simulation hydraulique et
délimitation des zones inondables**

Chapitre IV- Modélisation hydraulique et délimitation des zones inondables

La modélisation hydraulique permet de simuler le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés. L'un des outils informatiques qui permettent d'effectuer cette modélisation est le logiciel HEC-RAS, développé par le Centre d'Ingénierie Hydrologique de l'armée américaine (HEC-RAS, 2016). Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues en vue, notamment de prévoir les crues et leur impact.

Dans le cas de la présente étude, le programme HEC-RAS a été utilisé pour simuler la capacité hydraulique des deux chaâbas étudiées pour les crues de période de retour de 100 ans. Pour chacune de ces deux chaâbas, une telle capacité dépend notamment des apports générés par les bassins versants et de la morphologie du lit.

IV.1- Etapes de la modélisation

IV.1.1- Données d'entrée

❖ La topographie

Les données des élévations topographiques sont indispensables à la modélisation hydrologique. Elles servent à déterminer la forme géométrique du bassin versant étudié sur laquelle se base le calcul du modèle hydrologique. L'approche utilisée consiste à établir une série de profils topographiques à travers le lit du cours d'eau concerné (Fig. 17). L'élaboration de tels profils exige de disposer d'un fond de base qui peut être un modèle numérique de terrain, une carte topographique, etc. Bien entendu, la qualité des profils topographiques et la fiabilité des résultats de la modélisation dépendent du degré de précision et de la résolution des informations topographiques disponibles.

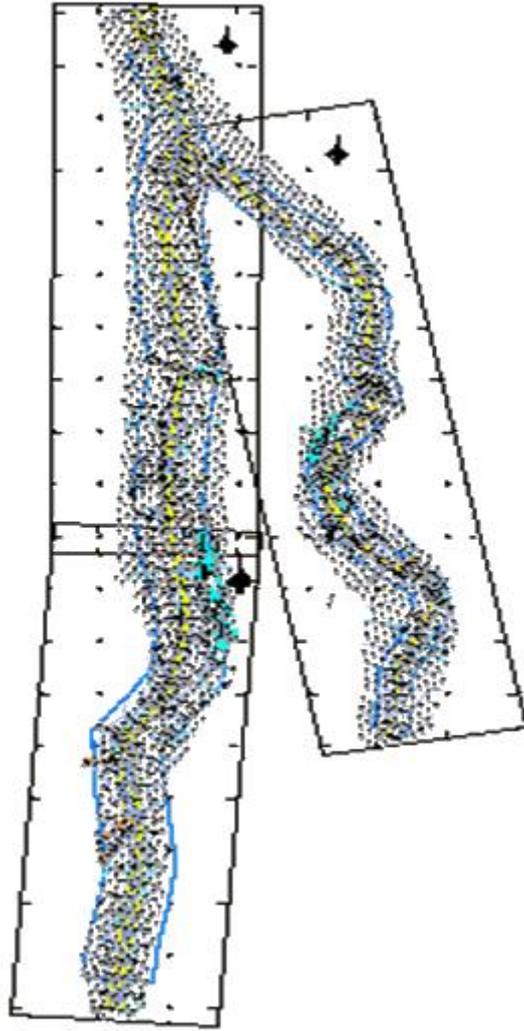


Figure 17: Profils topographique utilisés pour la simulation hydraulique des deux chaâbas

❖ Le modèle numérique du terrain

La disponibilité de données topographiques d'une résolution acceptable est nécessaire à la réussite de la simulation hydraulique. La base de données utilisée dans le cas de la présente étude est extraite d'un modèle numérique de terrain ayant une résolution st de 30 m, référencé dans le système de coordonnées Lambert du Nord du Maroc (Fig. 18). Ensuite, pour rendre les données plus compatible avec le programme HEC-RAS il a fallu convertir le MNT en format TIN (réseau triangulé irrégulier) développé par ESRI (Fig. 19).

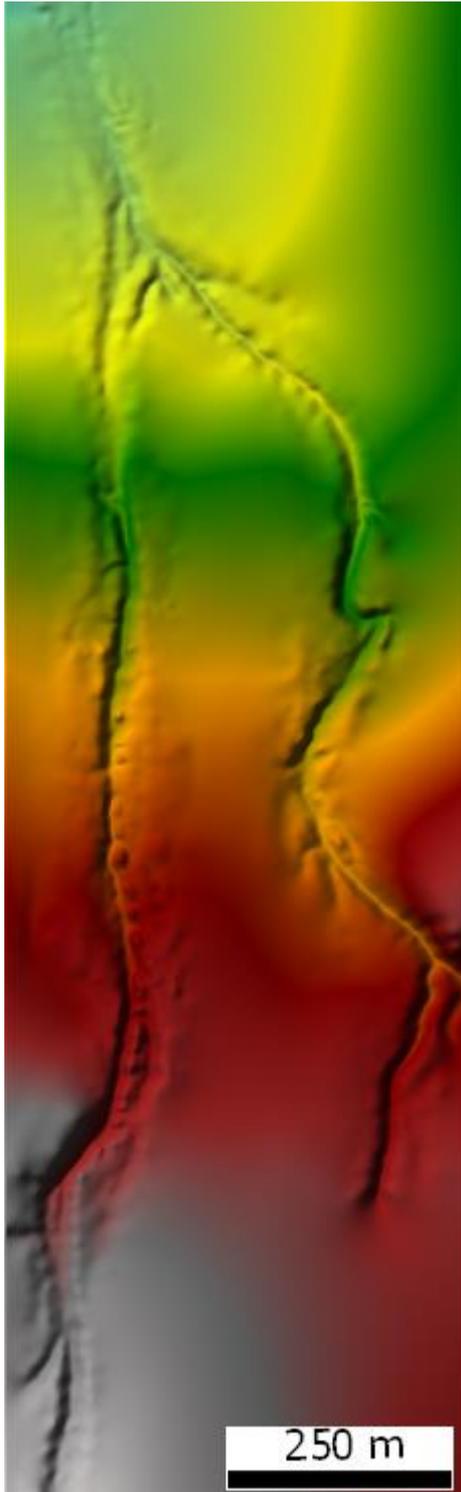


Figure 18: Modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation hydraulique

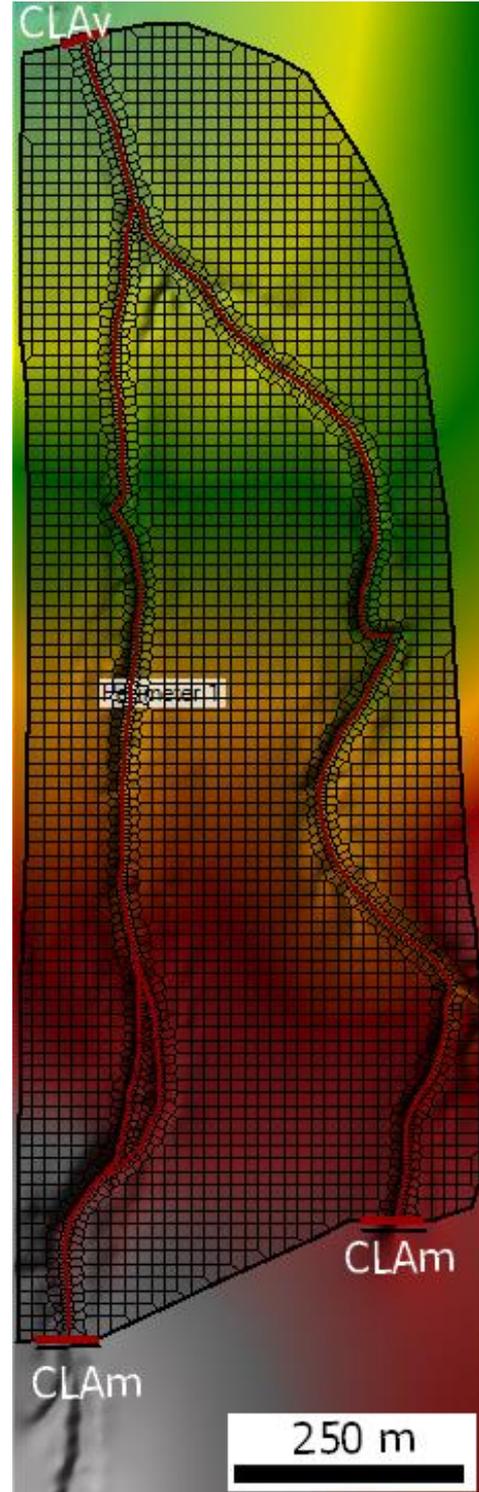


Figure 19: Délimitation et maillage de l'aire d'écoulement

IV.1.2- Paramètre du modèle

❖ Coefficient de Manning

Le coefficient de Manning est un paramètre qui représente la rugosité de la surface du lit du cours d'eau qui tend à freiner les écoulements. La résistance à l'écoulement dépend de l'effet conjugué de différents facteurs qui affectent la section du cours d'eau. Le calcul du coefficient de Manning peut être obtenu par des formules empiriques qui décomposent la résistance à l'écoulement en plusieurs parties prenant en compte la composition du lit, sa géométrie, la présence de végétation, etc. :

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4)m \quad (\text{Cowan 1956})$$

avec :

- n0 : valeur de base du Manning pour un canal droit uniforme
- n1 : irrégularités du fond
- n2 : variation de la géométrie du canal
- n3 : présence d'obstacles
- n4 : végétation
- m : facteur de correction des méandres

La valeur utilisée pour ce paramètre lors de la présente étude est 0.025 (voir Tableau A4, Annexe 2).

❖ Les débits de crues pour une période de retour de 100 ans et conditions aux limites

La modélisation hydraulique des chaâbas de Chems et de Sidi Mbarek est effectuée pour un régime permanent calculé en prenant en considération le débit de pointe uniquement. Ceci est justifié par le fait qu'on s'intéresse uniquement à l'étendue des lames d'eau générées par les débits de pointe, sans prêter attention à la durée des crues ni aux volumes d'eaux qui en résultent. Le modèle hydraulique calculé est encadré par deux conditions aux limites amont et aval définies comme étant les plans d'eau correspondant à une pente hydraulique égale à la pente du lit de l'oued.

Nous rappelons dans le tableau 20 ci-dessous le débit de pointe utilisé pour la modélisation hydraulique des deux chaâbas étudiées à la période de retour de 100 ans.

Tableau 20: Les débits retenus pour les chaabas de Chems et Sidi Mbarek pour différentes périodes de retour

Temps de retour	100 ans
Débit de pointe pour Chems	13.45
Débit de pointe pour Sidi Mbarek	45.12

IV.1.3- Simulation des crues pour une période de retour de 100 ans et carte des zones insondables

Après avoir intégré au logiciel HEC-RAS tous les paramètres nécessaires à la modélisation hydraulique, nous avons pu réaliser la simulation de l'étendue des eaux de crues qui correspondent à la période de retour de 100 ans. Les résultats de cette simulation sont illustrés sur les figures 20 et 21. Ces résultats montrent que les eaux de la crue centennale modélisée menacent plusieurs constructions situées en bordures des deux chaâbas. Il s'agit particulièrement des constructions de la zone A situées sur la rive droite de la chaâba Chems et de celles de la zone B localisées sur la rive gauche de la chaâba Sidi Mbarek. Les eaux débordent aussi sur la route qui traversent la zone d'étude. Plus loin en aval, là où les deux chaâbas se rejoignent, les eaux de la crue centennale submergent des terres agricoles au niveau de la zone C.

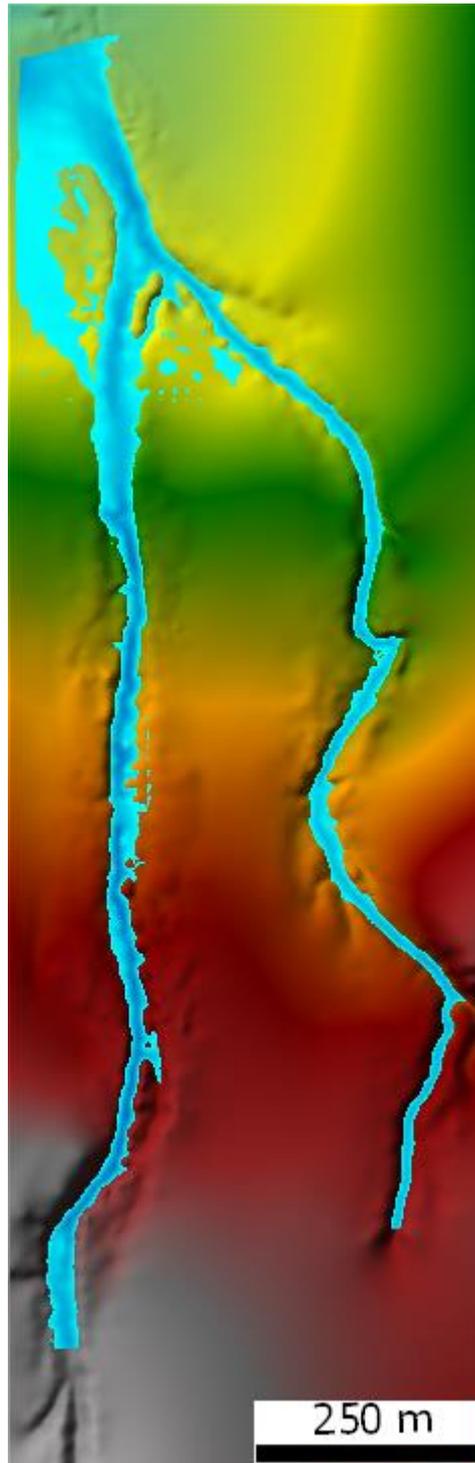


Figure 20 : Carte des zones inondables établie pour une période de retour de cent ans

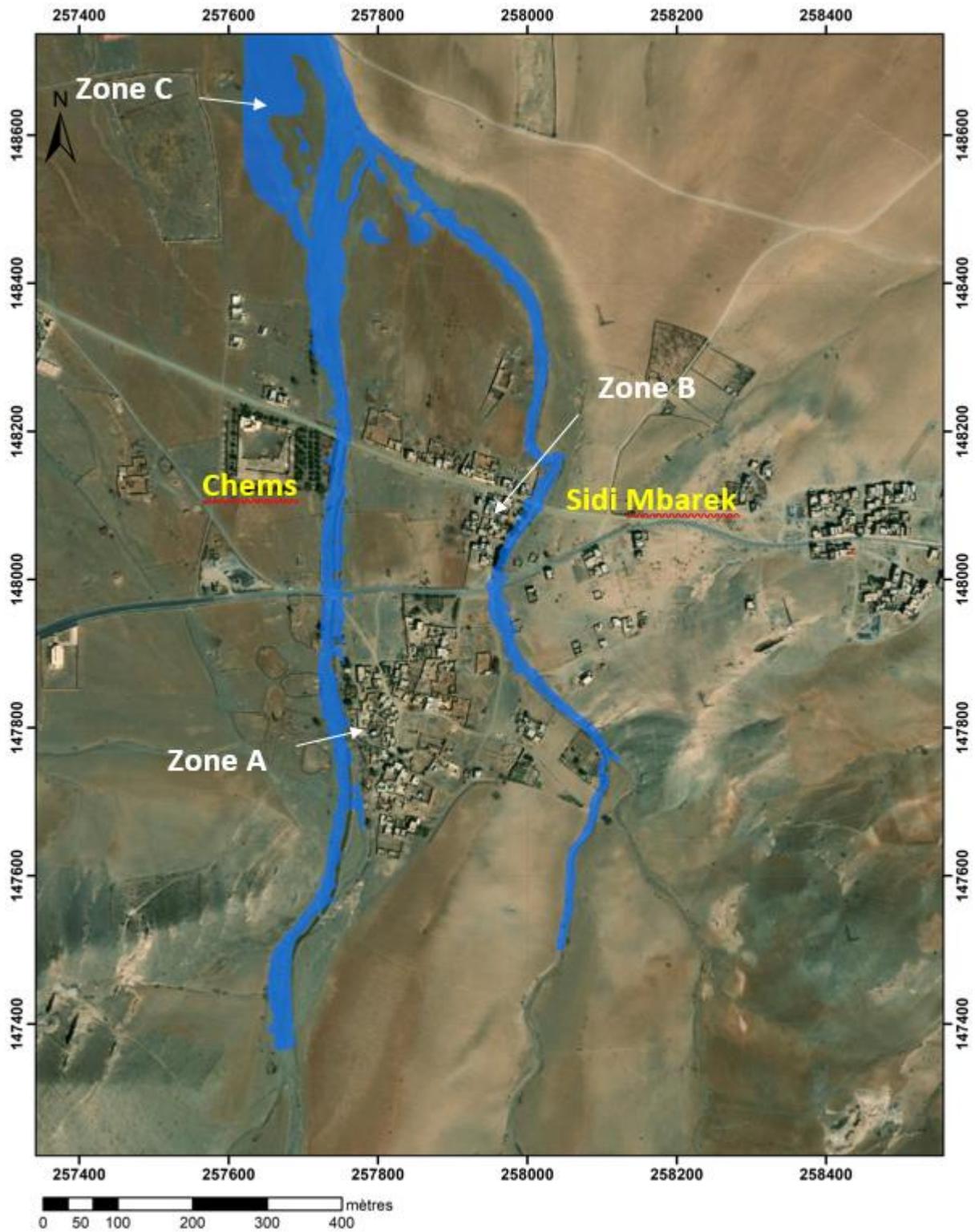


Figure 21 : Carte des zones inondables établie pour une période de retour de cent ans superposée à une image Google Earth de la zone d'étude

V- Conclusion

La présente étude hydrologique concerne les Chaabas qui drainent les petits bassins versants de Chems et de Sidi Mbarek, situées au niveau du centre de Sidi Bou Othmane dans la région de Marrakech. Elle a été menée dans le cadre de notre projet de fin d'études passé au sein de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift. Cette étude cible une zone qui souffre des débordements récurrents des eaux collectées par les deux chaabas précitées. Elle vise à délimiter les périmètres à risque d'inondation au sein de cette zone.

La première étape du travail a concerné le traitement des données relative au relief topographique de la zone d'étude à l'aide d'ARC-GIS qui a permis d'extraire l'ensemble des caractéristiques physiques nécessaires au calcul des temps de concentration par différentes méthodes. Ce dernier constitue un paramètre hydrologique très important pour l'estimation du débit de pointe.

La seconde étape a porté sur l'estimation des débits de pointe des deux bassins versants étudiés, pour plusieurs périodes de retour, en utilisant différentes méthodes. Les valeurs retenues sont celles de la méthode rationnelle qui est reconnue par l'ABHT comme étant la plus appropriée pour les petits bassins versants dans le contexte du Maroc.

Par ailleurs, la modélisation hydraulique réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS a permis de simuler la remontée des eaux de la crue centennale et de délimiter les zones inondables concernées par les débordements de ces eaux à l'échelle de la zone d'étude. Les cartes obtenues montrent que ces débordements menacent des constructions situées en bordure des deux chaâbas ainsi que des zones agricoles localisée en aval de celles-ci.

Pour faire face à cette situation, nous proposons un aménagement hydraulique qui consiste à construire un mur de protection le long de la berge des chaabas de Chems et Sidi Mbarek et de deux ouvrages de franchissements (ponts) qui assureront la traversée des deux chaabas.

Références bibliographiques

- Aarab E (1995) Genèse et différenciation d'un magma tholéiitique en domaine extensif intracontinental : l'exemple du magmatisme pré-orogénique des Jebilet (Maroc, Hercynien). Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad Marrakech, 253 p.
- Bordonaro, M. (1983). Tectonique et pétrographie du district a pyrhotine de Kettara (paléozoïque des Jebilet, Maroc). Thèse 3ème cycle, Université de Strasbourg, 132p
- Cowan W.L. (1956) Estimating hydraulic roughness coefficients, Agricultural Engineering, 37 (7) (1956), pp. 473-475
- Essaïfi, A. (1995). Relations entre magmatisme-déformation et altération hydrothermale : l'exemple des Jebilets centrales (Hercynien, Maroc), Mém. Géosci. Rennes, 66p.
- Hathouti, M. (1990). Étude gravimétrique et magnétique des amas sulfurés viséens de la région de Marrakech. Thèse d'université Montpellier 206p.
- HEC-RAS River Analysis System (2016) User's Manual V.5, 960p (<http://www.hec.usace.army.mil/software/>).
- <https://geograchid.blogspot.com/2016/05/fichier-kml-telecharger-mnt-dem-maroc.html>
- https://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique/Lecons/Lecon_II_1/Tableau_n.htm
- Huvelin P. (1977) Étude géologique et gîtologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Note et mem. Serv. Géol. Maroc 232 bis 307p.
- Karroum M. (2015) L'apport de la géophysique et de la géochimie dans l'identification hydrogéologiques et la qualité des eaux de la plaine de la Bahira (Maroc centrale, Université Cadi Ayyad Faculté des sciences SEMLALIA – MARRAKECH, 210 p.
- Karroum, M. Elgettafi, M. Elmandour, A. Wilske, C. Himi, M. Casas, A. 2017. Geochemical processes controlling groundwater quality under semi arid environment: A case study in central Morocco. Science of the Total Environment Volume 609, 31 December 2017, Pages 1140-1151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.199>.

Annexe 1

Tableau A1

Valeur de a	Régions
0.7 à 0.8	Régions humides
0.8 à 2	Régions arides
3 à 3.5	Oueds sahariens

Tableau A2

Zone		Pluviométrie mm	K1	K2
Rif	Central	1000-1300	15.53	0.776
	Occidental	800-1000	9.78	0.793
	Oriental	600-800	7.58	0.808
Moyen atlas saharien		700-900	14.94	0.636
		500-700	13.51	0.613
		400-500	13.47	0.587
Haut atlas saharien		200-400	9.38	0.742

Tableau A3

Valeur de N	Région
80	Plaine
85	Relief accidenté
100	Montagne

Annexe 2

Tableau A4: Valeurs du coefficient n de Manning

NLCD Value	n Value Range	Description
11	0.025 - 0.05	Open Water - areas of open water, generally with less than 25% cover of vegetation or soil. This is for natural streams on mild to moderate slopes.
12	n/a	Perennial Ice/Snow - areas characterized by a perennial cover of ice and/or snow, generally greater than 25% of total cover.
21	0.03 - 0.05	Developed, Open Space - areas with a mixture of some constructed materials, but mostly vegetation in the form of lawn grasses. Impervious surfaces account for less than 20% of total cover. These areas most commonly include large-lot single-family housing units, parks, golf courses, and vegetation planted in developed settings for recreation, erosion control, or aesthetic purposes.
22	0.06 - 0.12	Developed, Low Intensity - areas with a mixture of constructed materials and vegetation. Impervious surfaces account for 20% to 49% percent of total cover. These areas most commonly include single-family housing units.
23	0.08 - 0.16	Developed, Medium Intensity -areas with a mixture of constructed materials and vegetation. Impervious surfaces account for 50% to 79% of the total cover. These areas most commonly include single-family housing units.
24	0.12 - 0.20	Developed High Intensity -highly developed areas where people reside or work in high numbers. Examples include apartment complexes, row houses and commercial/industrial. Impervious surfaces account for 80% to 100% of the total cover.
31	0.023 - 0.030	Barren Land (Rock/Sand/Clay) - areas of bedrock, desert pavement, scarps, talus, slides, volcanic material, glacial debris, sand dunes, strip mines, gravel pits and other accumulations of earthen material. Generally, vegetation accounts for less than 15% of total cover.
41	0.10 - 0.20	Deciduous Forest - areas dominated by trees generally greater than 5 meters tall, and greater than 20% of total vegetation cover. More than 75% of the tree species shed foliage simultaneously in response to seasonal change.