



Croisement de l'approche hydrogéomorphologique et de la modélisation hydraulique pour une délimitation précise et fiable des zones inondables, application au centre territorial de Had Msila (Haut Inaouène, Maroc)

Hamid FATTASSE¹, Kamal LAHRICHI¹, Marouane Laaraj² Abdelmonaim OKACHA³

¹ Université sidi Mohamed ben Abdellah, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines saïs, (Laboratoire : L'espace, Histoire, Dynamique et Développement Durable), Fès, Maroc.

² Département de l'Environnement, Laboratoire LEFGE, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc, Route d'Imouzzer, B.P. 2202, 30 000 Fès, Maroc.

³ Département de Géographie, Université Cadi Ayyad, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Marrakech., Maroc.

Résumé : Le principal problème dans la détermination des zones exposées aux inondations réside dans la difficulté de définir les limites des zones inondables en fonction des données disponibles, car de nombreux facteurs influencent les inondations, tels que le relief, les précipitations et l'utilisation des terres. Dans la zone d'étude, située dans le bassin de l'Oued Had Msila aux pieds des montagnes de l'Atlas marocain, les chercheurs font face à des défis importants en raison du manque de données quantitatives et des terrains complexes. Une méthodologie intégrée a été utilisée, combinant l'analyse hydro-géomorphologique (basée sur des données géographiques, historiques et environnementales) et la modélisation hydraulique (qui repose sur des simulations mathématiques du flux d'eau) pour délimiter les zones inondables. Les résultats ont montré que les zones exposées aux inondations varient entre celles qui peuvent être précisément identifiées à l'aide de la modélisation hydraulique et celles qui nécessitent davantage de vérification avec des données de terrain. Une carte des zones à risque a également été créée à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG), ce qui aide à renforcer la résilience des communautés locales face aux catastrophes naturelles et à améliorer les stratégies de gestion des risques.

Mots clés : Zones inondables, Oued Had Msila, Hydro-géomorphologique, Modélisation hydraulique, Méthodologie intégrée.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.15103495>

1. Introduction

Les inondations sont considérées comme l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dévastatrices dans le monde, entraînant d'importantes pertes humaines et matérielles. Selon un rapport de l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2023), les inondations représentent la principale cause de 40 % des catastrophes naturelles au cours des deux dernières décennies. Elles sont souvent causées par des pluies torrentielles, la fonte des neiges ou des cyclones tropicaux, et ce phénomène s'est intensifié en raison des changements climatiques et des activités humaines non régulées, telles que la déforestation et l'urbanisation dans les zones à risque (Azidane et al. 2018).

Les inondations hivernales se caractérisent par leur répétition sur les mêmes cours d'eau ou sections de rivières, survenant généralement à la même période chaque année, ce qui les rend plus faciles à anticiper (Kichigina, 2021). La prévision des précipitations joue un rôle clé dans l'atténuation et la gestion des flux environnementaux, des inondations et des besoins en eau dans diverses régions (Alam et al. 2021). Néanmoins, la complexité des processus atmosphériques rend la prévision quantitative des précipitations particulièrement ardue (Prusov et al. 2019).



Dans la région de l'Afrique du Nord, les inondations se multiplient de manière significative en raison des changements climatiques et de la faiblesse des infrastructures dans de nombreuses régions. Dans un rapport de la Banque mondiale (2021), il est indiqué que cette région est devenue de plus en plus vulnérable aux inondations soudaines et saisonnières en raison des changements dans les schémas de précipitations et de l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. La région a connu plusieurs cas d'inondations ayant causé d'importantes pertes économiques, comme en Libye en 2023, où les inondations ont entraîné de lourdes pertes humaines et des déplacements internes massifs.

Face à des défis majeurs liés à la gestion de l'eau, qu'il s'agisse de rareté ou d'excédents, le Maroc partage les préoccupations de nombreux pays. Pour relever ces défis, il est essentiel d'étudier les variations temporelles et spatiales des systèmes hydrologiques dans les bassins versants, en particulier en matière d'inondations et de sécheresses. Cette analyse repose sur une compréhension approfondie des variables climatiques comme les précipitations, les températures et les débits d'eau. Une telle démarche facilite l'anticipation et la gestion des inondations, qui provoquent des pertes humaines et matérielles significatives, menaçant les infrastructures et les ressources agricoles des zones touchées, tout en freinant le développement local durable (ABHS, 2009).

L'évaluation des ressources en eau de surface est une démarche essentielle pour assurer une gestion optimale de cette ressource précieuse. En effet, elle constitue un outil fondamental permettant de mieux comprendre l'état des ressources hydriques. Cette connaissance approfondie contribue, directement ou indirectement, aux processus décisionnels, en soutenant des stratégies de gestion durable et adaptées aux besoins actuels et futurs. (Despax et al., 2017 ; Mishra, 2010 ; Boiten, 2020 ; Aldegheri, 1979).

Les stratégies classiques de gestion des inondations, fondées sur l'étude des données historiques et les prévisions climatiques, montrent des limites face à l'évolution rapide des conditions climatiques annuelles. Ces méthodes, bien qu'utiles, ne permettent pas de répondre de manière exhaustive aux défis liés à la réduction des impacts des inondations. L'approche hydro-géomorphologique, qui repose sur l'analyse des données hydrologiques et morphologiques, fournit des cartographies détaillées des zones inondables, mais son champ d'application reste circonscrit aux inondations fluviales. En revanche, l'approche hydraulique, axée sur la modélisation des écoulements d'eau, apporte une meilleure compréhension des processus dynamiques des inondations. La combinaison de ces deux approches offre une analyse plus globale et des solutions concrètes pour une gestion optimisée des risques liés aux inondations.

Le bassin de Had Msila est régulièrement exposé au risque d'inondation, qui résulte de l'élévation du niveau de l'eau dans un cours d'eau ou de son débordement au-delà de son lit naturel. Ce phénomène constitue l'un des principaux problèmes auxquels la population de ce bassin est confrontée, causant d'importants dégâts qui affectent les activités économiques, les infrastructures, ainsi que la stabilité sociale des habitants. Il est donc crucial de comprendre ce phénomène à travers sa description, l'analyse des causes de son apparition et des facteurs aggravants.

Le bassin de Had Msila est situé à l'avant des montagnes du Rif oriental, au nord de la ville de Taza, et appartient administrativement à la région de Fès-Meknès. Ce bassin couvre une superficie d'environ 73 kilomètres carrés (Fig. 1), et inclut le territoire de cinq groupes de douars : Taineste, Bni Ftah, Al-Kouzat, Had Msila, et At-Taïfa.

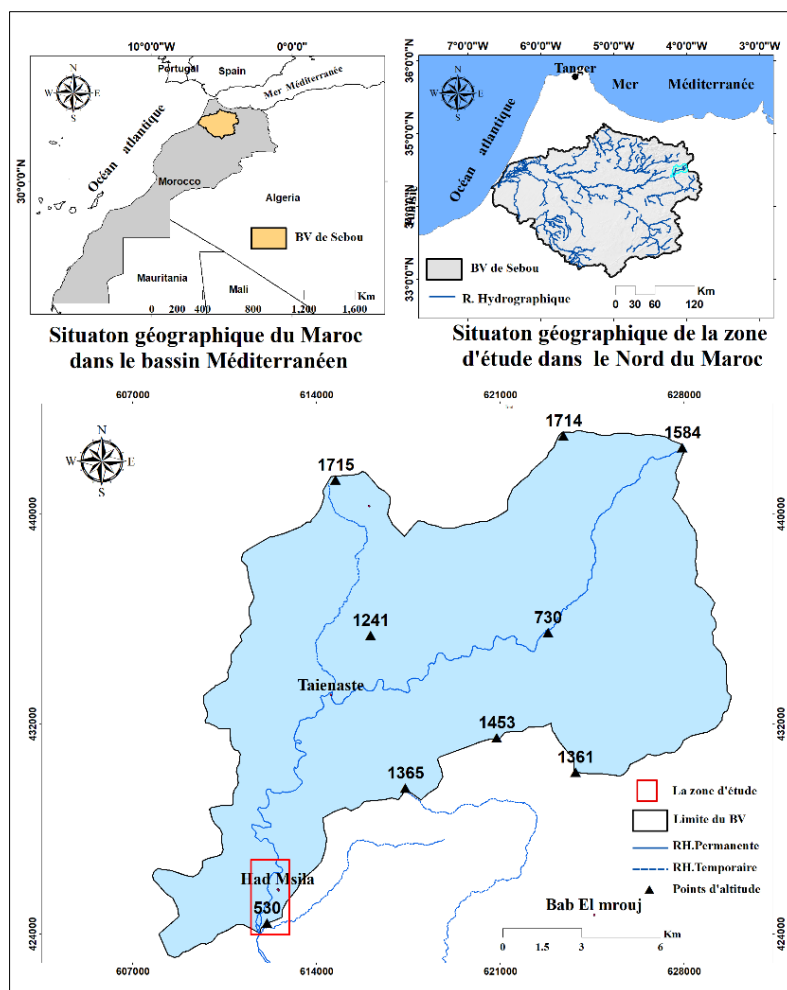


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Le bassin constitue un affluent important de l'Oued Inaouène, ce qui en fait une zone clé sur le plan hydrologique et géographique. Il se distingue par ses reliefs variés, ce qui augmente la probabilité d'occurrence des inondations. Les facteurs climatiques et hydrologiques, associés à l'activité humaine, aggravent le problème des inondations dans cette région. Par conséquent, l'étude de ce bassin représente une occasion de comprendre les dynamiques des inondations et de rechercher des solutions efficaces pour réduire leurs impacts négatifs sur les populations et les infrastructures.

Cette problématique reflète le besoin urgent de comprendre les dynamiques des inondations dans le bassin de Had Msila, afin de développer des stratégies préventives visant à réduire leurs impacts. Cela inclut l'amélioration des systèmes de drainage, la sensibilisation des populations aux risques, ainsi que l'adoption d'une planification urbaine durable prenant en compte la nature et le relief du bassin.

Les études, ainsi que les témoignages recueillis lors de l'enquête de terrain, révèlent que le bassin de Had Msila a connu plusieurs inondations marquantes au fil des ans. Parmi les plus significatives figurent celles des années 1996, 2001, 2003, 2009 et 2010, qui ont entraîné des pertes considérables en biens et en infrastructures. L'inondation du 11 novembre 2010 est l'une des catastrophes les plus graves qu'a connues le bassin au cours des dernières décennies. Ce phénomène était exceptionnel en raison de sa violence et de ses impacts négatifs sur la région, submergeant de vastes zones agricoles, détruisant des installations publiques et privées, et provoquant le déplacement de certaines familles en raison de la montée des eaux.

Le secteur de Had Msila s'étend sur une longueur de 3.3 km en passant le long de Centre territoriale de Had Msila à partir du pont de la mosquée jusqu'au nouveau Souk, La vallée de l'Oued constitue un lieu de villégiature des agriculteurs.

Le premier tronçon du secteur (Fig.2) caractérisé par un pont (x : 612.5, y : 427) situé à l'amont du tronçon près de la mosquée (photo 1), Il s'étend sur une longueur de 60 m, il représente une construction qui permet de franchir le chenal de l'Oued Lahdar. Ce pont supporte le passage d'hommes et des véhicules, Pour éviter toute forme de débordement d'eau lors de crues particulières, Grâce à ce pont, la population peut se déplacer vers les Centres territoriaux qui se situent à côté de la région, comme le Centre de Taineste.

A proximité de la route R508 (photo 2), la cour d'eau forme un méandre qui pourrait présenter un problème lors des inondations. C'est un défi auquel la population, allant vers les régions du Nord ou vers la Nord du BV, doit faire face.



Figure 2 : Image Satellitaire de secteur de Had Msila, tronçon 1.



Photo 1 : Situation du pont de mosquée (RR508).



Photo 2 - Situation de route R508.

Ainsi l'urbanisation des plaines alluviales, investies par des nouvelles constructions, à savoir des habitations, l'hôpital et une partie de la direction provinciale de l'agriculture de Taza commune rurale de Had Msila. De ce fait les berges du cours d'eau sont réduites. Un grand Souk, ancien, a été déplacé en 2016 vers un autre tronçon.

La figure 3 montre la confluence de l'Oued Lahdar et de l'Oued Rhnalla, dans une vaste plaine alluviale abritant un nouveau souk, représentant ainsi une grande étendue de plaine alluviale. Dans la rive droite de l'Oued Lahdar on trouve la route P5414 qui lie le Centre territoriale Rbàa El Fouki qui se situe au BV de Ouargha et le Centre territoriale Taineste qui se trouve au nord du BV de l'Oued Lahdar en passant par Had Msila. Dans la rive gauche on trouve le nouveau Souk qui se situe près de la cour d'eau (photo 3). Ce Souk a été construit en 2016, il constitue un lieu de rencontre entre les offreurs et les demandeurs et donc une source financement répondant aux besoins de la population de Had Msila et la population des régions voisines.

En aval de ce secteur on constate une confluence de l'Oued Lahdar avec oued Rhnalla, où le pont (x : 612, y : 424.5) représente le seul accès du sud de BV avec le nord (photo 4). Ce pont possède par des dimensions qui ne respectent pas les normes, ceci occasionne des problèmes d'inondations et donc l'isolation de la population de Had Msila.



Figure 3 : Image Satellitaire de secteur de Had Msila, tronçon 2.



Photo 3 : situation de mur protège le Souk.



Photo 4 : Situation du Pont reliant Had Msila et la ville de Taza (RR508).

2. Méthodologique et outils de travail

L'intégration de l'approche hydro-géomorphologique avec la modélisation hydraulique est une étape essentielle pour améliorer la prévision des inondations et identifier les zones les plus vulnérables aux risques. En combinant ces méthodologies, il est possible d'obtenir des résultats plus précis et de fournir une image globale des impacts des inondations dans les bassins versants.

L'approche hydro-géomorphologique repose sur l'étude des caractéristiques du terrain et de l'eau, ainsi que de l'historique des inondations dans la région concernée, ce qui permet d'obtenir des informations qualitatives sur la répartition spatiale des zones à risque. En revanche, la modélisation hydraulique offre une analyse quantitative détaillée des inondations, basée sur des critères techniques et scientifiques, tels que la vitesse de l'écoulement, la profondeur de l'eau et les trajectoires possibles des eaux en cas d'inondation.

En combinant ces méthodologies, une image plus claire et plus précise des limites des zones menacées par les inondations est obtenue, en tenant compte à la fois des facteurs naturels, environnementaux et des facteurs climatiques actualisés. Cette combinaison permet également de concevoir des solutions plus efficaces pour lutter contre les inondations, telles que la construction de barrages, le renforcement des systèmes de drainage et l'élaboration de stratégies pour mieux faire face aux impacts des inondations de manière plus durable.

Grâce à cette combinaison, il est possible d'obtenir un équilibre entre la compréhension qualitative de l'évolution des inondations en fonction de l'histoire de la région et de ses caractéristiques géographiques, et l'analyse quantitative des dynamiques de l'eau et de l'ampleur des impacts des inondations à toute période donnée.

Ainsi, il devient possible de planifier des interventions efficaces pour améliorer la capacité d'adaptation aux inondations et réduire les dommages humains et matériels.

2.1. Etude géomorphologique :

L'approche hydrogéomorphologique est une approche géomorphologique, appliquée aux vallées et plaines alluviales. C'est une approche naturaliste qui s'inscrit dans l'évolution récente de la géomorphologie fluviale (Ballais et al. 2009). Validée depuis 1996 par les ministères responsables de la prévention des dangers d'inondation, (Masson et al., 1996).

L'analyse hydrogéomorphologique de la vallée est destinée à mieux comprendre l'espace alluvial et le fonctionnement du cours d'eau. Cette méthode permet de préciser l'enveloppe maximale de la zone inondable d'un cours d'eau en s'appuyant sur l'analyse de la morphologie de la plaine alluviale. Elle fait appel à des connaissances géographiques et géologiques du secteur, ainsi qu'à des techniques de lecture de paysage et d'interprétation de documents.

Cette approche permet de délimiter, au sein des plaines alluviales, les zones qui sont exposées à des crues fréquentes, rares et exceptionnelles (lit mineur, moyen, majeur et majeur exceptionnelle) et celles qui ne sont jamais submergées, comme les terrasses.

La méthode hydrogéomorphologique repose sur l'analyse des différentes unités morphologiques constituant le plancher alluvial. Les critères d'identification et de délimitation de ces unités sont la topographie, la morphologie, la sédimentologie et les données relatives aux crues historiques, souvent corrélées avec l'occupation du sol.

La clé d'une interprétation hydrogéomorphologique fructueuse réside dans la combinaison de critères d'identification appartenant aux domaines de la morphologie, de la sédimentologie, de l'occupation du sol ou encore des données historiques.

2.1.1. La géomorphologie :

L'observation de la morphologie de la plaine alluviale a constitué souvent la porte d'entrée de l'interprétation. Le regard du géomorphologue intéresse l'identification des replats et des ruptures de pente ; ces derniers sont synonymes de changement d'unités, ainsi que vers les surfaces horizontales et subhorizontales, caractéristiques des formations alluviales (Derruau, 1974 ; Masson et al. 1996 ; Nanson et Croke, 1992).

Les cours d'eau d'ordre 3 à 4 minimum (Strahler, 1952, Ballais. et al. 2010), dans la zone de transfert (Shumm, 1977, in Ballais. et al. 2010) se caractérisent donc en général par l'existence de trois (parfois quatre) lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur (ordinaire et exceptionnel) (Fig. 4). L'ordination de Strahler est la plus communément utilisée et, nous servira de base, bien que son utilisation soit parfois difficile.

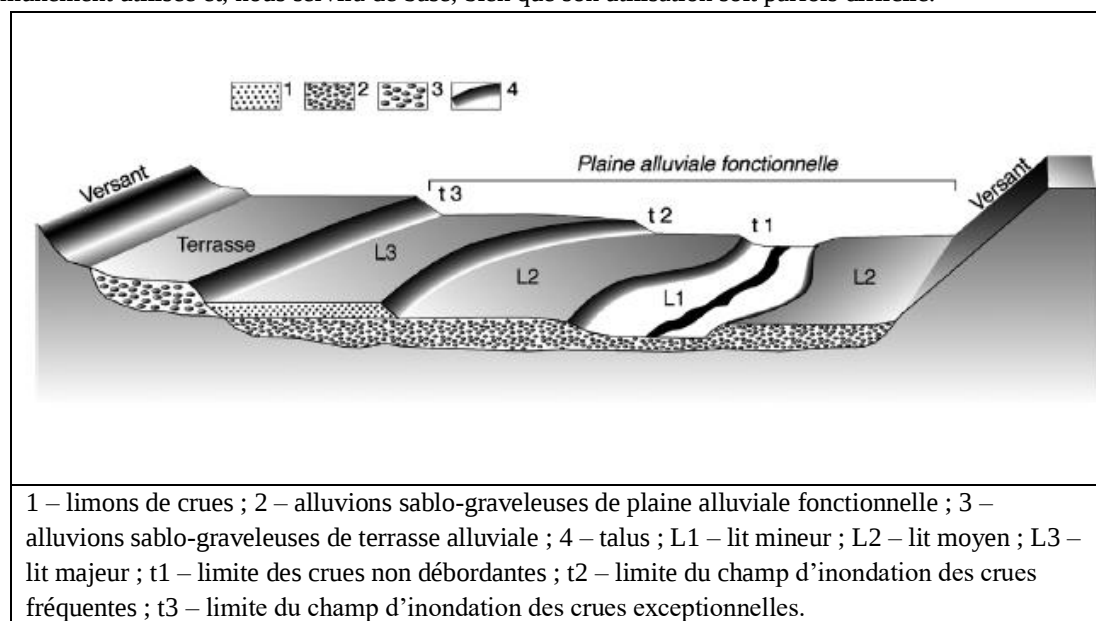


Figure 4 : Disposition relative des lits d'une plaine alluviale. (Ballais et al. 1997)

2.1.2. La sédimentologie :

Les unités de la zone inondable sont constituées de matériaux déposés par le cours d'eau tels que des limons, des sables, ou des matériaux plus grossiers, tels que des galets arrondis par le transport fluvial. A contrario, les unités de l'encaissant sont constituées de matériaux anguleux, ou surdimensionnés en comparaison de la capacité de transport du cours d'eau. L'étude de la sédimentologie est particulièrement intéressante lorsque des doutes subsistent sur la localisation de la limite de la zone inondable, par exemple entre le lit majeur et les colluvions qui adoucissent le talus externe du lit majeur par ruissellement diffus (Ballais et al., 2011; Delorme-Laurent, 2007; Diren, 2007; Dupont et al., 2005; Masson et al., 1996). La limite de la zone inondable, bien que peu nette morphologiquement, est délimitée par la différence de couleur des sols. De gauche à droite, on observe un dégradé de brun, (Nejjari ; EL Ghachi.2016). Ce dégradé met en lumière la présence de limons plus importante en lit majeur et une pédogénèse plus développée sur le versant.

2.1.3. L'occupation du sol :

L'identification des unités hydrogéomorphologiques peut s'appuyer sur des critères autres que la topographie et la sédimentologie telles que l'occupation du sol ou l'organisation du parcellaire et la couverture végétale naturelle.

Lorsque la végétation est bien représentée dans la plaine alluviale, elle reflète très fidèlement les conditions des unités géomorphologiques. En effet, la répartition des espèces végétales de la vallée alluviale reflète la relation entre ces espèces et l'étagement de la plaine alluviale. On observe ainsi un étagement de la végétation en fonction de son attitude.

La PA de l'O Lahdar se caractérise actuellement par une concentration humaine et des activités socio-économiques relativement importantes. En effet, plusieurs infrastructures, activités économiques et exploitations agricoles sont exposées aux effets de la dynamique de l'Oued Lahdar et particulièrement au risque d'inondation, liés aux débordements des oueds Lahdar et ses affluents. L'activité agricole était adaptée, à l'existence de l'aléa inondation, avant la période contemporaine : le lit majeur était réservé aux cultures annuelles, le lit moyen ne serait pas cultivé et serait parfois utilisé en prairie.

De manière générale, l'aspect traditionnel de l'utilisation du PA, associant cultures herbacées, persiste toujours. Au niveau des cultures, on assiste à une dominance très nette des cultures irriguées vu que les plaines alluviales se caractérisent généralement par la présence d'une nappe peu profonde, et de sols profonds et fertiles, favorables à l'agriculture.

Un certain nombre d'éléments d'occupation du sol affectent le fonctionnement de l'Oued, notamment en faisant obstacle aux écoulements. Pour cette raison, les modes d'utilisation de la PA sont influencés par de nombreux facteurs, dont les structures agraires, les caractéristiques du milieu physique, ainsi que les interventions anthropiques sur la PA.

2.2. Etude hydraulique :

En plus de l'approche hydro-géomorphologique, l'approche hydraulique est l'un des outils les plus importants utilisés dans l'étude et la prévision des inondations. Elle repose sur la modélisation mathématique des caractéristiques de l'écoulement de l'eau dans les rivières et les cours d'eau, y compris la vitesse de l'eau, sa profondeur et l'étendue des inondations. Ces modèles offrent des analyses détaillées sur la manière dont l'eau se propage lors des inondations, ce qui permet de déterminer plus précisément les zones les plus exposées au risque. Elle débute par la mise à disposition des éléments essentiels au fonctionnement du modèle hydraulique et l'identification des zones à risque d'inondation dans le bassin. Cette identification des processus se déroule en quatre étapes :

2.2.1. Identification de la géométrie d'un cours d'eau (Construction du Modèle) :

La qualité de la modélisation hydraulique repose sur des données topographiques précises et bien résolues. Pour une étude à grande échelle, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est idéal, offrant une représentation fidèle du terrain tout en nécessitant moins de points. Le MNT de la vallée de l'Oued Lahdar a été créé à partir de courbes de niveau et de points topographiques, avec une précision altimétrique élevée (1m). Des règles strictes, selon Kreis (2004), assurent la précision des profils en travers pour une analyse fiable des résultats.

La création de cette base de données géométrique a été réalisée à l'aide de l'outil HEC-GeoRas, intégré dans le programme ArcMap. Les couches développées ont ensuite été importées dans le logiciel HEC-RAS pour poursuivre la construction de cette base de données. Cette étape, qui constitue l'assemblage de la base géométrique préliminaire, a pour objectif de définir toutes les couches formant la structure de la vallée au niveau des centres de Had Msila, telles que la rivière, les berges, les trajets d'écoulement, etc. (Fig. 5).

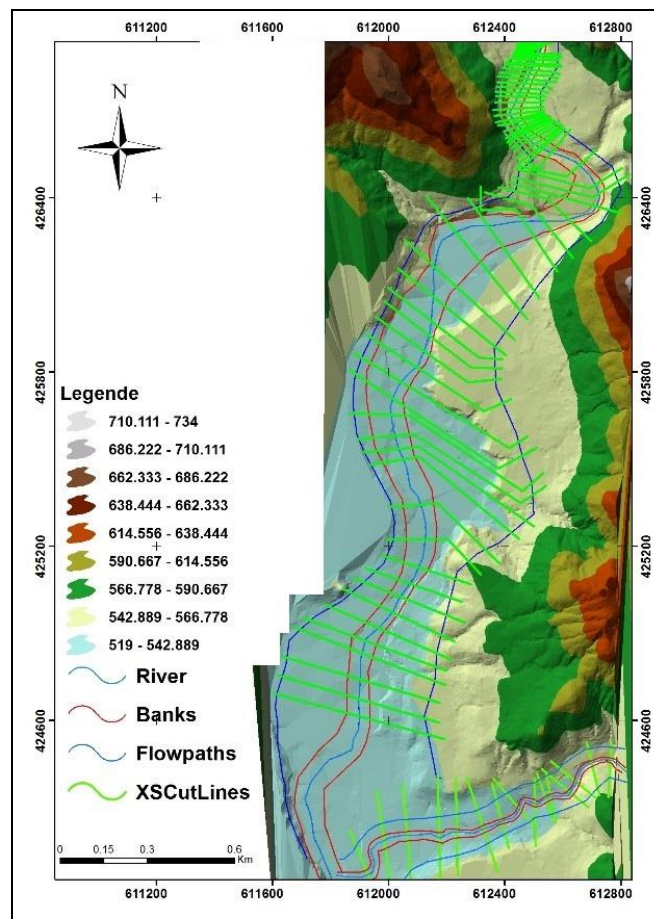


Figure 5 : la géométrie de la zone d'étude développée par HEC-GEORAS sous ARCGIS.

Les résultats de la géométrie du tronçon seront intégrés dans le logiciel HEC-RAS pour incorporer les débits extrêmes prédéfinis par Fattasse et al. (2023), ainsi que les paramètres physiographiques, tels que la pente et la rugosité du lit. Cette intégration permettra de calculer la répartition du débit le long du profil de l'oued, menant à une simulation de l'extension hydrologique. Les résultats des calculs effectués avec HEC-RAS seront ensuite transférés vers l'outil SIG ArcGIS pour la création de cartes des zones inondables et des étendues des crues.

2.2.2. Coefficients de rugosité et conditions limites pour la simulation hydraulique

Les coefficients de rugosité et les conditions limites sont des éléments essentiels pour la simulation hydraulique, car ils influencent directement la précision des résultats.

Coefficients de rugosité : Ces coefficients représentent la résistance de l'écoulement de l'eau sur les surfaces du lit de la rivière et des berges. Ils sont généralement exprimés à l'aide de la valeur de *Manning* (n), qui varie en fonction des caractéristiques du sol, de la végétation et de l'irrégularité du terrain. Des valeurs plus élevées de n indiquent une plus grande résistance à l'écoulement, tandis que des valeurs plus faibles reflètent un écoulement plus fluide.

Conditions limites : Les conditions limites sont utilisées pour définir les paramètres aux frontières du modèle hydraulique. Cela inclut les conditions d'entrée et de sortie de l'écoulement, comme les débits ou les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval. Elles peuvent être déterminées en fonction des données de terrain ou des résultats de prévisions

hydrologiques et permettent de simuler l'écoulement de manière réaliste tout au long du modèle. Ainsi, une simulation hydraulique en régime permanent a été réalisée en utilisant les cinq valeurs de débits obtenues par Fattasse et al. (2023), correspondant aux périodes de retour de 10, 20, 50, 100 et 1000 ans (Tabl.1).

Table 1 : Débits adoptés pour la simulation hydraulique.

Cours d'eau	Q en m ³ /s pour différentes fréquences (Q _{PT})				
	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans	T=100 ans	T=1000 ans
O. Lahdar (au niveau de Had Msila)	236.8	245.58	566.68	761.22	907.65
O. Rhnalla (au niveau de Had Msila)	22.52	50.46	130.22	196.30	290.41

L'intégration correcte de ces deux éléments dans la simulation est cruciale pour obtenir des prévisions fiables concernant les inondations et les dynamiques hydrauliques dans la zone étudiée.

2.2.3. Calage et validation :

Pour affiner le modèle, nous avons procédé à son étalonnage. Cette étude utilise deux types d'événements pour valider le modèle : une inondation simulée avec une période de retour de 50 ans et l'inondation réelle du 11 novembre 2010. L'évaluation des résultats s'appuie sur l'erreur quadratique moyenne (MSE), un indicateur servant à mesurer la précision des simulations. En plus Pour garantir la fiabilité des résultats obtenus par l'intégration des approches hydrogéomorphologique et hydraulique, il est essentiel de valider ces résultats à l'aide de données historiques. L'approche historique, qui repose sur l'analyse des événements passés de crues et d'inondations, constitue un outil précieux pour évaluer la pertinence des modèles prévisionnels. Elle permet de confronter les zones inondables identifiées par les modèles à celles réellement affectées par les inondations dans le passé.

De plus, cette validation historique peut aider à ajuster les résultats des modèles en tenant compte des particularités locales, comme les changements dans l'utilisation des sols, les modifications de l'infrastructure ou les transformations climatiques. En croisant les informations obtenues à partir des approches hydrogéomorphologique et hydraulique avec les données historiques, il devient possible de formuler des prévisions plus robustes et de mieux cibler les zones à risque, ce qui améliore la gestion des risques et la préparation face aux futures crues.

3. Résultats :

3.1. Cartographie des zones inondables dans le secteur modélisé avec HEC-RAS

L'objectif de la modélisation est de simuler les crues de l'Oued Lahdar au niveau de Centre Had Msila, sur différentes périodes de retour, puis de produire des cartes des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement pour la crue de référence. Ces informations serviront à établir ultérieurement les cartes des zones inondables (Fig. 6).

L'analyse des cartes obtenues a révélé la vulnérabilité de plusieurs infrastructures pour cause de submersions des crues de l'Oued. Ces zones sont menacées par certaines crues dont le débit de pointe dépend de la période de retour correspondante. Ce zonage du risque de submersion permet de cartographier les zones exposées au risque d'inondation de l'Oued Lahdar, par l'approche hydraulique, (Fig.6).

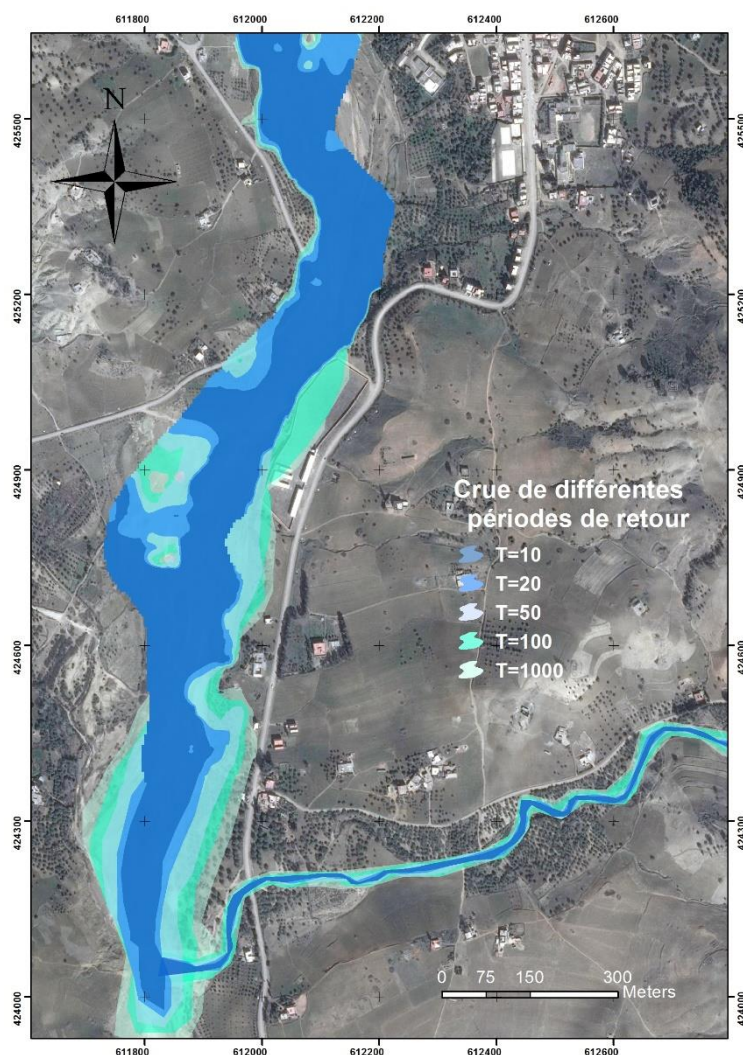


Figure 6 : Carte des zones inondables de l'Oued Lahdar au niveau de l'amont de Centre Had Msila, pour différentes périodes de retour.

L'effet de débordement s'accroît en allant de l'amont vers l'aval du Centre de Had Msila, c'est-à-dire du pont de la mosquée vers la confluence d'Oued Rhnalla. Les résultats obtenus montrent que le débordement commence à partir d'un débit de $229.05 \text{ m}^3/\text{s}$ de cours d'eau d'Oued Lahdar pour le période de retour 10ans, et le débit de $75.35 \text{ m}^3/\text{s}$ d'Oued Rhnalla pour le période de retour cinquantennales. Tandis que pour les débits rares et exceptionnels on observe plusieurs sections débordantes. Celles-ci se concentrent dans le Centre, au niveau du pont de la mosquée et du méandre au voisinage de la route R 508. Ceci revient à l'impact du développement de l'habitation anarchique dans la plaine alluviale qui cause le rétrécissement de la section de l'Oued, et par la suite la réduction de la capacité de transit du débit. D'autre part, les ponts qui coupent le tronçon d'étude, sont inéligibles, causant ainsi une surélévation de la hauteur de l'eau.

Le pont de la mosquée (x : 612.5, y : 427) est le seul ouvrage de franchissement dans ce secteur ; Il relie le Centre de Had Msila au Centre de Taineste. Ce pont devrait connaître des submersions répétées pour des périodes retour à partir de 100 ans. Ce risque qualifié de fréquent engendre en plus de l'arrêt du trafic des véhicules et des personnes, l'isolement des agglomérations de part et d'autre de l'Oued Lahdar.

Analyse des résultats présentés dans la figure 6, montre que plusieurs sites se trouvent dans la zone à risque d'inondations ; dont les principaux sont le souk, des habitats, des tronçons routier, le pont, etc.

Le Souk de Had Msila est un site d'intérêt socioéconomique important. Il est le principal établissement générateur de revenu pour la Commune. Il permet l'approvisionnement des habitants du village et des douars avoisinants. Ce souk s'étend, à la faveur d'un replat, de la route en direction de l'axe du chenal de l'Oued Lahdar. Malgré les confortements répétés de sa muraille externe, le sapement des berges de l'Oued Lahdar, lors des crues

rare, menacent sa stabilité. La figure montre que le souk se situe sur un replat inondable par les crues de retour de 50 ans.

La figure 6 montre que le tronçon de la route R508 sur la rive gauche de l'Oued Lahdar est inondé en partie par des crues d'une période de retour de 10 ans ; la submersion des terrains de la rive droite n'est que partiellement inondé par les crues décennales. En revanche, ce tronçon risque d'être inondé en totalité lors des crues dont la période de retour dépasse les 10 ans.

La même figure présente les degrés du risque d'inondation du tronçon de la route RP5412 en rive droite. En effet, environ 1km est submergé par la crue cinquantennale. En effet, la crue de 11/11/2010 a provoqué de lourds dégâts à la chaussée, dont les fréquents travaux de confortement et de protection n'ont pas réussi à protéger contre le risque d'inondation.

La figure montre aussi la submersion d'une partie du Souk, lors des crues centennales de l'Oued Lahdar et la submersion du pont (x : 612, y : 424.5) par les crues de l'Oued Rhnalla, avant la confluence avec l'Oued Lahdar. Ce pont est situé à l'entrée du Centre Had Msila et assure un trafic important de piétons et de véhicules.

3.2. Validation du modèle

L'analyse des archives historiques des crues, des témoignages locaux et des rapports d'événements extrêmes passés permet de renforcer les limites des zones inondables déterminées par les modèles. Par exemple, des études menées par les autorités locales ou des chercheurs dans des régions particulières peuvent fournir des informations cruciales sur les zones qui ont été les plus touchées par les inondations, les niveaux d'eau atteints, et la fréquence des événements.

Le tableau ci-dessous montre les résultats de la validation du modèle hydrologique utilisé pour simuler les inondations du 11 novembre 2010. Les données observées sur le terrain ont été comparées aux valeurs obtenues par simulation. Cette validation a été réalisée sur trois stations réparties dans la zone d'étude, et les écarts entre les hauteurs observées et simulées ont été examinés pour évaluer la précision du modèle.

Tableau 2 : Validation avec l'inondation du 11 novembre 2010

Station	Hauteur observée (m)	Hauteur simulée (m)	Écart (m)
Premier site	3,60	3,58	-0,02
Deuxième site	3,30	3,32	+0,02
Troisième site	3,90	3,85	-0,05

Les résultats de la calibration et de la validation du modèle hydraulique confirment sa fiabilité. Les écarts entre les hauteurs simulées et observées lors de l'inondation du 11 novembre 2010 sont faibles, ce qui reflète la précision du modèle et la validité des paramètres ajustés, comme le coefficient de Manning. Par ailleurs, le modèle a montré une grande robustesse pour prédire des événements similaires, ce qui renforce sa capacité à anticiper de futures inondations et à orienter les stratégies de gestion des risques. Avec un MSE de 0,015 m², la validation confirme l'utilité pratique du modèle, particulièrement pour les zones présentant des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques analogues.

3.3. Cartographie des zones inondables par l'approche hydrogéomorphologique :

Les cartes hydrogéomorphologiques des zones inondables de l'O Lahdar ont été effectuées sur le tronçon proche de la C. Had Msila. Les enveloppes ainsi définies ont été confortées aux témoignages recueillis sur le terrain et les enquêtes sur les crues historiques. Les Fig. 7 et Fig. 8 synthétisent la cartographie hydrogéomorphologique à la cartographie de l'utilisation du sol pour produire une cartographie du risque d'inondation.

Les unités hydrogéomorphologiques de la zone inondable, dans la vallée de l'Oued Lahdar au niveau de Had Msila, sont constituées de matériaux déposés par le cours d'eau tels que des limons, de sables, ou des matériaux plus grossiers, tels que des galets arrondis par le transport fluvial. A contrario, les unités de l'encaissant sont constituées de matériaux anguleux, ou surdimensionnés en comparaison à la capacité de transport du cours d'eau. L'étude de la sédimentologie est particulièrement intéressante lorsqu'il subsiste des doutes sur la localisation de la limite de la zone inondable : par exemple entre le lit majeur et des colluvions qui adoucissent le talus externe du lit majeur par ruissellement diffus (Ballais *et al.* 2011 ; Delorme-Laurent, 2007 ; Diren, 2007 ; Dupont *et al.* 2005 ; Masson *et al.* 1996).

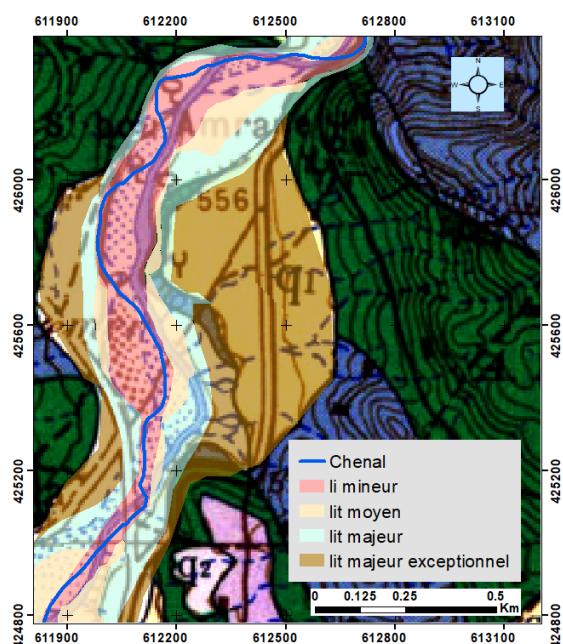


Figure 8 : Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 1, C. Had Msila).

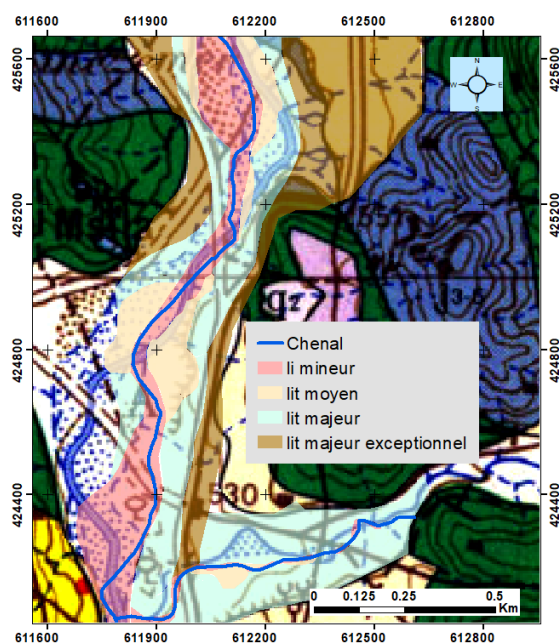


Figure 9 : Cartographie hydrogéomorphologique des lits de la plaine alluviale de l'Oued Lahdar (tronçon 2, C. Had Msila).

L'extension latérale du lit mineur y est fortement limitée. La délimitation du lit moyen est plus délicate. L'aménagement significatif de ce secteur a modifié les formes naturelles. Par conséquent, en plusieurs endroits, l'extension spatiale du lit moyen se borne aux remblais des fondations et aux remblais routiers, ce qui explique ses frontières plutôt rugueuses. Pour ce qui est l'extension du lit majeur, sa limite se retrouve soit sur le pied de talus de terrasses bien définies, soit aux pieds des versants qui bornent la vallée. Ce lit submersible par des crues rares à exceptionnelles cinquantennales à centennales et comme par exemple celles enregistrées l'année de 1987 dans la station de Had Msila. Nous pouvons être amenés à distinguer un lit majeur ordinaire et un lit majeur exceptionnel sur certains endroits. Les résultats produits dans la cartographie montrent que l'étendue des zones touchées par ces inondations rares est importante et que ces phénomènes peuvent toucher les installations humaines.

Les relations entre chenal, lit mineur, lit moyen et lit majeur dans la vallée de Had Msila varient d'un point à un autre, en fonction du régime de ce cours d'eau et d'autres facteurs que nous développons plus loin. La limite la plus nette est celle qui se place entre le lit mineur et le lit moyen, sous forme de berges, hautes de plusieurs décimètres ou plus, (Photo 5).



Photo 5 : Morphologie des talus de la plaine Alluviale à l'aval C. Had Msila.

La photo 5 illustre l'exemple de plusieurs sites dans la vallée de l'O. Lahdar, montrant le lit moyen à surface horizontale ou subhorizontale, mais offrant, dans son détail, une topographie très irrégulière. Cette irrégularité est due à la présence de chenaux de crue formés par les courants qui débordent du lit mineur. Les dynamiques alluviales possibles sur cette surface sont donc multiples. Des courants très rapides peuvent circuler dans les chenaux et d'autres, beaucoup plus lents en dehors de ces chenaux sont fréquents dans ces milieux (Delorme-Laurent, 2007). Lors des montées des eaux, des écoulements préférentiels peuvent ré-utiliser ces chenaux.

3.4. Croisement des résultats d'approches différentes et validation de la délimitation des zones inondables

La figure numéro 10 a été créée en combinant les résultats de la modélisation hydraulique et de la méthode hydro-géomorphologique, ainsi que l'identification des zones ayant subi des inondations historiques. Ce processus a utilisé un ensemble varié de données, y compris les traces des inondations historiques observées sur le terrain, les données des organismes compétents tels que les agences gouvernementales et les institutions locales responsables de la gestion des ressources en eau et des catastrophes, ainsi que des entretiens oraux avec les habitants locaux qui possèdent des connaissances traditionnelles sur l'histoire de la région et son exposition aux inondations.

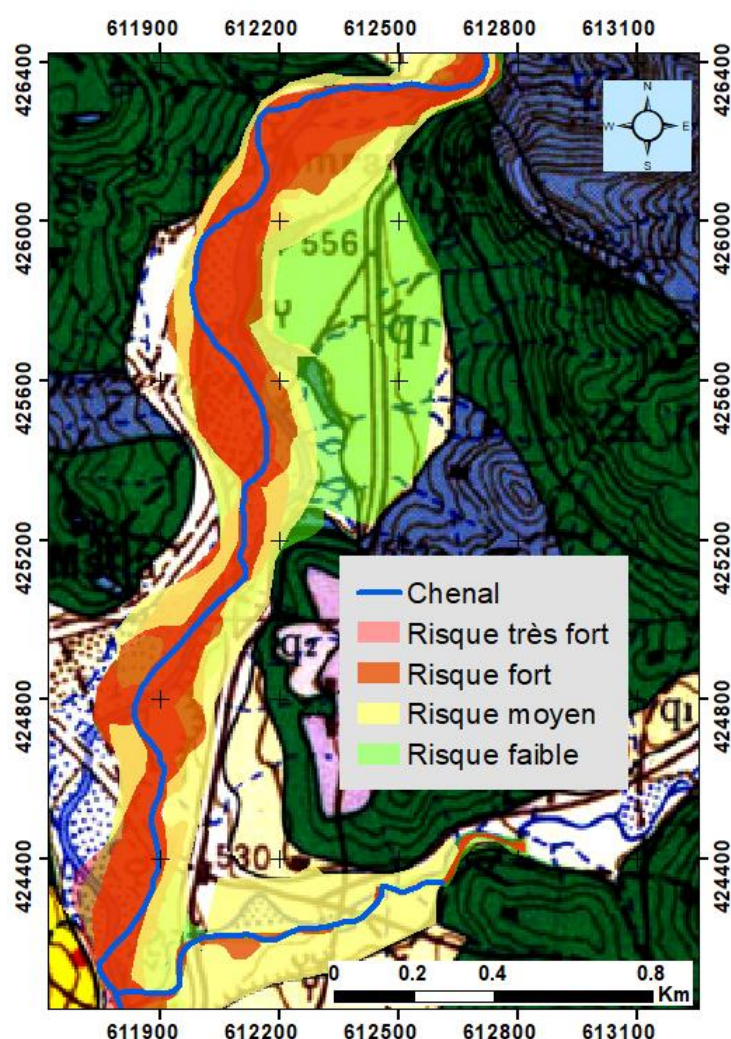


Figure 10 : Croisement des résultats d'approches différentes

Par exemple, les deux méthodes peuvent être utilisées pour analyser l'impact des inondations sur les infrastructures telles que les routes et les bâtiments le long des rives de l'oued Lahdar. Voici une comparaison des résultats :

- **Route RP5412, rive droite** : Cette route constitue un bon exemple de l'impact des inondations récurrentes. La modélisation hydraulique indique que la route est susceptible d'être submergée en cas d'une crue avec une période de retour de 50 ans. Les données numériques disponibles montrent que la distance affectée par l'inondation atteint environ 1 kilomètre. Cela correspond aux témoignages sur le terrain fournis par les habitants locaux concernant l'historique des inondations dans cette zone.

- **Bâtiments commerciaux du marché local** : Les bâtiments du marché local peuvent être fortement impactés par les inondations, en particulier celles ayant une période de retour de 100 ans. Dans ce cas, la modélisation hydraulique contribue à identifier avec précision les zones sujettes à l'inondation. La méthode hydrogéomorphologique renforce ces résultats en se basant sur des témoignages historiques et des observations sur le terrain.

Bien que les deux méthodes puissent produire des résultats similaires dans certains cas, il existe une différence dans la précision des détails et les domaines sur lesquels chaque méthode se concentre :

- **Pont sur l'oued Rhnalla** : Une différence notable peut être observée entre la modélisation hydraulique et la méthode hydro-géomorphologique lors de l'étude d'un pont situé aux coordonnées (x : 612, y : 424,5). La modélisation hydraulique montre que le pont est exposé à l'inondation en raison du débit d'eau avant le point de jonction avec l'oued Lahdar. La modélisation fournit des données quantitatives précises sur les niveaux d'eau et leur débit. En revanche, la méthode hydro-géomorphologique repose sur l'analyse de terrain et la topographie, ce qui peut manquer de précision dans les détails quantitatifs comme la profondeur de l'eau et la vitesse du courant.

- **Zones centrales de Had Msila** : Dans ce cas, la modélisation hydraulique montre des cartes précises des inondations avec des détails sur la profondeur de l'eau et les vitesses de débit, tandis que la méthode hydro-géomorphologique utilise une approche qualitative qui intègre des cartes d'utilisation des terres et des données topographiques, ce qui peut entraîner une variabilité dans la classification des risques.

Dans le domaine de l'évaluation des inondations, il existe des différences claires entre la modélisation hydraulique et la méthode hydro-géomorphologique, que l'on peut distinguer à travers certains aspects principaux sur le terrain.

L'une des différences fondamentales réside dans les sources et les données. La modélisation hydraulique repose principalement sur des données quantitatives, telles que les mesures de débit et la vitesse de l'eau, ce qui permet une représentation précise des dynamiques des inondations. Ces données offrent une compréhension globale de la nature de l'eau pendant les inondations, comme les zones de débit rapide ou lent, ainsi que les effets du relief sur la répartition de l'eau.

En termes de précision temporelle, la modélisation hydraulique se distingue comme un outil plus apte à fournir des prévisions précises pour l'avenir basées sur des scénarios spécifiques. Cette capacité la rend idéale pour la planification future et la détermination de l'évolution possible des inondations en raison des changements climatiques ou des activités humaines. En revanche, la méthode hydro-géomorphologique se concentre souvent sur l'étude des inondations passées et la reconstitution des événements anciens à l'aide de données de terrain. Bien que cette méthode aide à comprendre l'historique des inondations, elle manque de la capacité à fournir des prévisions précises pour les scénarios futurs.

En ce qui concerne la couverture spatiale, la modélisation hydraulique offre une couverture complète et uniforme des zones menacées par les inondations. Elle est capable de simuler les débits sur de vastes zones et de fournir des cartes prédictives des inondations à grande échelle, ce qui en fait un outil idéal pour réduire les risques futurs. En revanche, la méthode hydro-géomorphologique peut rencontrer certaines limitations sur le terrain en raison du manque de données ou de la difficulté d'accès à certaines zones géographiques, ce qui peut entraîner un manque de détails ou même l'incapacité de couvrir certaines régions de manière complète.

La méthode hydro-géomorphologique permet de mieux comprendre les effets des inondations à long terme, en analysant l'évolution des cours d'eau, les changements paysagers, et leur impact sur l'écosystème, la faune et les activités humaines. Elle offre un cadre pour étudier les interactions complexes entre les mouvements de l'eau, la nature des sols et les transformations des cours d'eau. Cette méthode est également utile pour reconstituer les événements passés, collecter des preuves environnementales et historiques, et analyser l'histoire des inondations. Elle permet de construire des modèles précis et d'évaluer l'impact sur les communautés et l'environnement. En combinant analyse environnementale et interprétation qualitative, elle offre une vision complète des zones à risque et fournit des solutions durables pour comprendre et gérer les inondations de manière intégrée.

Conclusion :

En résumé, bien que la modélisation hydraulique et la méthode hydro-géomorphologique aient chacune leurs avantages spécifiques, le choix entre les deux dépend largement du type de données disponibles et des objectifs visés par l'étude. Tandis que la modélisation hydraulique est considérée comme la plus efficace pour les prévisions futures, la méthode hydro-géomorphologique demeure importante pour comprendre les événements passés et interpréter les observations de terrain.

La méthode hydro-géomorphologique se distingue par sa capacité à combiner des données quantitatives et qualitatives, offrant ainsi une analyse globale du relief et des observations de terrain. Elle prend en compte la relation complexe entre les facteurs naturels (sol, eau, végétation) et les activités humaines, permettant de mieux comprendre les causes des inondations et d'identifier des facteurs invisibles avec d'autres méthodes. Son principal avantage est sa flexibilité à s'adapter aux conditions locales, notamment dans les zones rurales ou difficiles d'accès, en utilisant des données de terrain telles que les témoignages locaux, les cartes anciennes et l'analyse géographique.

L'intégration des deux méthodes, hydraulique et hydro-géomorphologique, renforce l'efficacité de l'analyse en fournissant des données précises et soutenues par une connaissance contextuelle. La modélisation hydraulique fournit des détails précis sur les flux d'eau et le comportement des rivières ou des cours d'eau dans des conditions spécifiques, permettant de déterminer avec précision les zones exposées aux inondations. D'autre part, la méthode hydro-géomorphologique ajoute une dimension supplémentaire, en intégrant les informations géographiques et environnementales historiques avec des données récentes, et aide à comprendre comment les modèles géomorphologiques et la morphologie de l'eau influencent les inondations potentielles. Cette combinaison des méthodologies offre une vue d'ensemble, permettant de prédire les inondations de manière plus fiable tout en prenant en compte divers facteurs environnementaux qui peuvent affecter la situation.

Alors, l'intégration des deux méthodes contribue à améliorer l'évaluation des risques et à renforcer les stratégies de réduction des dommages causés par les inondations en combinant la technologie moderne avec les connaissances locales accumulées.

REFERENCES

- [1] AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU, (2009), *Atlas des zones inondables, Région de Fès-Boulmane*. Fès, 49p.
- [2] ALDEGHERI M. (1979). Manuel d'hydrométrie, volume IV : mesure des débits à partir des vitesses. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris, France. 313 p.
- [3] ALAM, F., SALAM, M., KHALIL, N.A. ET AL. (2021). Rainfall trend analysis and weather forecast accuracy in selected parts of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. SN Appl. Sci. 3, 575 <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04457-z>.
- [4] BALLAIS J.L., CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C., (2009), Hydrogéomorphologie et inondabilité. Géographie physique et Quaternaire, vol. 61, n° 1, 2007, pp 75-84.
- [5] -BALLAIS. J.L CHAVE S., DUPONT N., MASSON E., PENVEN MJ., (2011), La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. Physio-Géo (www.physio-geo.fr), collection "Ouvrages", 168 p.
- [6] CHAI, T., ET DRAXLER, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250.
- [7] BANQUE MONDIALE. (2021). Rapport sur le développement mondial 2021 : Données pour une vie meilleure, Banque mondiale, Washington, DC. Disponible en ligne : <https://www.worldbank.org>.
- [8] BODIAN, ANSOUMANA. DIOP, LAMINE. PANTHOU, GÉREMY. DACOSTA, HONORE. DEME, BDOULAYE. DEZETTER, ALAIN. NDIAYE, PAPE MALICK. DIOUF, IBRAHIMA. VISCHEL, THÉO. (2020) Recent Trend in Hydroclimatic Conditions in the Senegal River Basin. Water, 12.
- [9] DERRUAU M., (1974), Les formes du relief terrestre. Édit. MASSON, Paris, 120 p.
- [10] DESPAX A. PERRET C., GARCON R., HAUET A., BELLEVILLE A., LE COZ J., FAVRE A. (2017). Prise en compte de la qualité de l'échantillonnage dans l'estimation de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses (Méthode Flaure). Congrès SHF. Despax et al. – Incertitude des jaugeages au courantomètre. Pages 9
- [11] DIREN PACA., (2007), L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables. Guide méthodologique, 66 p.

- [12] DUPONT N., PENVEN M.J., (2005), Définition des indicateurs pour une cartographie de la courbe enveloppe des inondations dans le cadre de l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique. Rapport définitif à la DIREN Bretagne, 35 p.
- [13] FATTASSE, H. ET AL0 (2023). Utilisation de l'approche hydrogéomorphologique et modélisation hydraulique dans la cartographie les zones inondables Cas du Bassin Versant de l'Oued Lahdar (Haut Inaouène, Maroc). Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Sais-Fès (Thèse de doctorat), p. 281.
- [14] FATTASSE, H. ET AL. (2024). Hydrological Study and Hydraulic Modeling of Flood Risk in the Watershed of the Oued Lahdar (Upper Inaouene, Morocco). Ecological Engineering et Environmental Technology, 25(7), 274–290.
- [15] H. AZIDANE, A. BENMOHAMMADI, M. HAKKOU, B. MAGRANE, S. HADDOUT. (2018). A Geospatial approach for assessing the impacts of sea-level rise and flooding on the Kenitra coast (Morocco). J. Mater. Environ. Sci., 2018, Volume 9, Issue 5, Pp 1480-1488. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.5.162>.
- [16] KICHIGINA, N. V. (2021). Floods in Siberia: geographical and statistical analysis for the period of climate change. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences, 66(1), 41–60. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.103>.
- [17] MASSON M., GARRY G., BALLAIS J.-L., (1996), Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique. Ministère de l'Équipement, Ministère de l'Environnement, Editions Villes et Territoires, Paris, 100 p.
- [18] MISHRA, A.K. COULIBALY, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. Journal of Hydrology, 380 PP420–437
- [19] NANSON G.C., CROKE J.C., (1992), A genetic classification of floodplains. Geomorphology, n° 4, pp. 459-486.
- [20] NEJJARI A., EL GHACHI M., (2016), Cartographie des limites inondables par l'approche hydrogéomorphologique : Cas de la vallée du Sânon (Lorraine, France). Géomorphologie, n° 1 pp 16-30.
- [21] OMM, (2023), Rapport provisoire sur l'état du climat mondial en 2023, Organisation météorologique mondiale, Genève, 2023. Disponible en ligne : <https://public.wmo.int>.
- [22] PRUSOV, V. ET AL. (2019). Atmospheric Processes in Urban Area Elements. Cybern Syst Anal 55, 90–108 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00115-w>.
- [23] STRAHLER, A. N., (1952), Quantitative analyses of watershed geomorphology. American geophysical union transaction, 38, pp. 913-920.
- [24] VIRGINEi DELORME-LAURENT., (2007), Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables, 437p.
- [25] WILLMOTT, C. J., ET MATSUURA, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30(1), 79-82.