

# Contribution des mesures hydrométriques à l'analyse du fonctionnement hydrologique dans un bassin versant non jaugé au contexte de variabilité climatique : cas des sources de l'Oued M'Hasser (2022-2023) / Contribution of hydrometric measurements to the analysis of hydrological functioning in an ungauged watershed in the context of climate variability: The case of the Oued M'Hasser springs (2022-2023)

Emad Bouyzillan<sup>\*1</sup>, Ahmed Azdod<sup>1</sup>, Abdelatif Lagni<sup>1</sup>, Hasan Ouakhir<sup>2</sup>, et Mohamed El Ghachi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire DPRP, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc  
<sup>\*</sup> Corresponding author: [emadbouyzillan@gmail.com](mailto:emadbouyzillan@gmail.com)

<sup>2</sup>Institut Supérieur des professions infirmières et techniques de santé, Département démographie et environnement, Beni Mellal

**Résumé.** La situation actuelle des ressources hydriques au Maroc notamment dans les régions montagneuses semi-arides constitue un enjeu et un défi majeur, particulièrement dans un contexte caractérisé par variabilité climatique prononcée. Combinée à la surexploitation, cette variabilité rend les ressources hydriques de plus en plus fragiles et vulnérables. Pour cette raison, les données hydrométriques sont devenues essentielles pour une gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle du bassin versants. Cependant, l'accès à ces données peut constituer un obstacle dans le cas des bassins versants non équipés de stations de mesure hydrométrique, à l'instar du bassin de l'Oued M'Hasser. C'est pourquoi cette étude vise à mener des campagnes de jaugeage de terrain visant à produire une base de données hydrométrique fiable, dans l'objectif est de construire une courbe de tarage permettant d'estimer les débits à différentes conditions hydrologiques. Ces mesures ont permis de caractériser les dynamiques hydrologiques saisonnières et d'identifier les réponses différentielles des sources aux fluctuations pluviométriques.

**Mots Clés :** variabilité climatique, Oued M'Hasser, jaugeage, débit, courbe de tarage

## 1 Introduction

La gestion durable des ressources en eau constitue au cours des dernières décennies, un enjeu stratégique majeur. Elle représente un enjeu crucial dans les pays du bassin méditerranéen, où les précipitations se distinguent par une forte variabilité interannuelle et saisonnière, avec des épisodes prolongés et intenses de sécheresse [1; 2] ce qui menace les ressources hydriques, fragilise la sécurité alimentaire et la stabilité socio- économique régionale [3; 4;]. En effet, le bassin méditerranéen est reconnu comme l'un des principaux foyers de vulnérabilité mondial face à variabilité et au changement climatique [5].

Cette situation fait de la région l'une des plus exposées au risque de pénurie [6] un risque qui, en dépit de toutes les stratégies mises en œuvre pour accroître l'offre, semble inévitable [7]. En fait, près de 60 % des populations mondiales soumises à des conditions de stress hydrique se concentrent dans les régions orientales et méridionales du bassin méditerranéen, où la disponibilité moyenne annuelle en eau par habitant varie entre 500 et 1 000 m<sup>3</sup>, selon les normes internationales [8].

Le Maroc, faisant partie de la rive sud de la Méditerranée, s'inscrit dans ce contexte, il pourrait s'approcher du seuil de pénurie absolue (500 m<sup>3</sup>) à l'horizon de la prochaine décennie en raison de l'irrégularité spatiotemporelle des précipitations et de la fréquence accrue des sécheresses. En outre, une longue persistance de la sécheresse dans les régions antérieures du pays par rapport aux zones côtières a été révélée dans des études antérieures menées au Maroc. Malgré la rareté des ressources hydriques, les systèmes d'approvisionnement en eau potable et d'irrigation continuent d'enregistrer des pertes d'eau substantielles dans les réseaux de transport et de distribution.

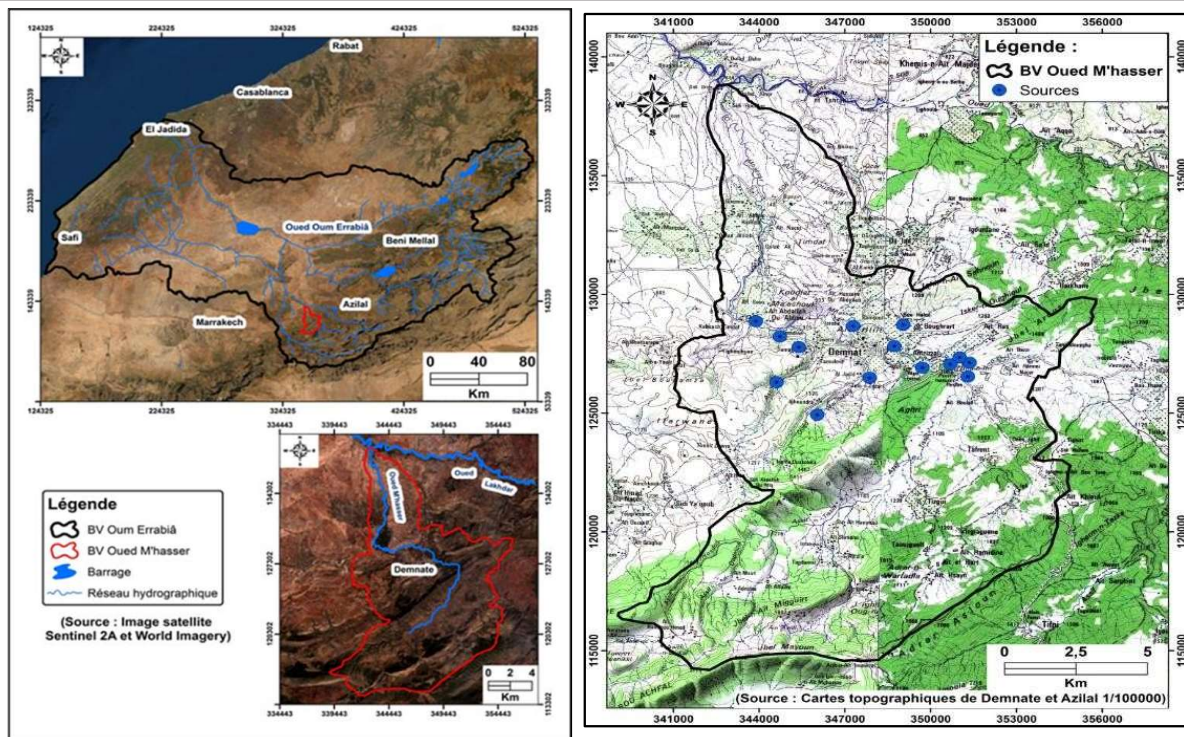
Le bassin de l'Oued M'Hasser, situé dans le Haut Atlas Central, compte parmi les régions à l'intérieur du Maroc, les plus exposées à la problématique de la pénurie du potentiel hydrique, dans un contexte où les précipitations sont caractérisées par leur irrégularité spatio-temporelle et d'une tendance générale à la diminution des apports hydriques [9]. Face à cette situation préoccupante, marquée par une pression croissante, il devient indispensable de mettre en œuvre une gestion efficace et pérenne basée sur une connaissance approfondie des ressources hydriques en matière de répartition spatiale et de variation temporelle. Une telle approche apparaît aujourd'hui comme une nécessité afin de garantir une utilisation adaptée aux différents besoins et de préserver cette ressource vitale pour les générations futures [10]. La surveillance des ressources en eau peut être assurée à travers plusieurs approches complémentaires, notamment les mesures in situ, la modélisation hydrologique et l'observation par télédétection satellitaire [11]. Toutefois, en raison de l'absence des stations hydrométriques dans la zone d'étude, les observations de terrain s'imposent comme l'approche la plus fiable pour assurer un suivi précis, continu et contextualisé de cette ressource.

Dans cette perspective, notre contribution scientifique consiste à élaborer une base de données hydrométriques structurée et fondée sur la mesure de débits et le suivi des hauteurs d'eau afin d'étalonner les courbes de tarage. Cette démarche vise à approfondir la compréhension des dynamiques hydrologiques du bassin versant de l'Oued M'Hasser mais aussi à appuyer une gestion durable et plus efficiente des ressources hydriques.

## 2 Contexte géographique de la zone de recherche

Situé dans le Haut Atlas Central, entre les méridiens 6°55'0''W et 7°6'0''W, et les parallèles 31°50'30''N et 31°36'30''N, le bassin versant de l'Oued M'Hasser est considéré parmi les bassins montagnards non jaugés dans la région. Sa superficie est de l'ordre de 213,27 km<sup>2</sup>, pour un périmètre d'environ 83,82 km. Il est délimité à l'est par le bassin d'Assif Ghezzaf, au nord par le celui de Tainit, et au sud et à l'ouest par l'Oued Tassaout.

Sur le plan topographique, le bassin présente une variation significative d'altitude, allant de 657 m vers le barrage de Sidi Driss, jusqu'à 2176 m au sommet le plus élevé. Plus précisément, les altitudes élevées se localisent au sud et au sud-est du bassin (Jbel Mayon), tandis que les altitudes plus basses se situent au nord et à l'ouest (Figure, 2).



**Fig 1.** Présentation de la zone d'étude

Le substrat géologique de la région se compose principalement de marnes et de dolomies grises appartenant à la série sédimentaire du Jurassique en amont du bassin tandis qu'en aval, on trouve des colluvions fines qui font partie de la série sédimentaire du Quaternaire (Figure, 2). Le domaine d'étude se situe dans la région Tadla- Azilal, et plus précisément dans la province d'Azilal, il regroupe les communes rurales de Tifni, Imlil, Oulad Khalouf, Sour el Aaz et la commune urbaine de Demnate.

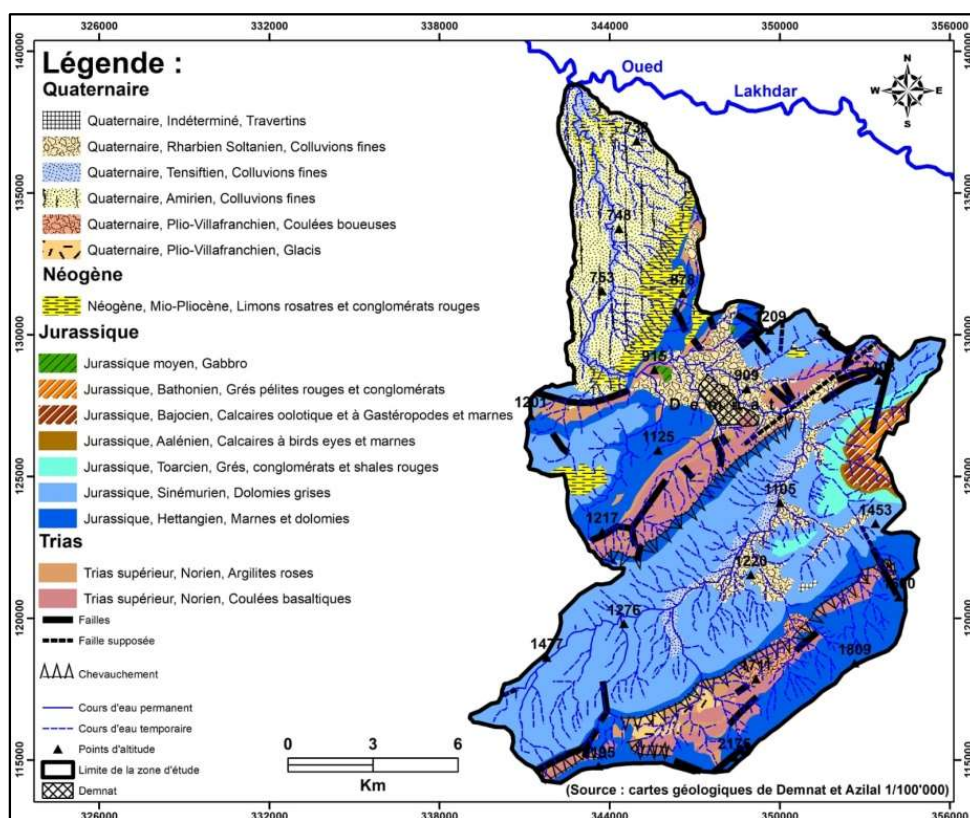


Fig 2. La géologie du bassin versant de l'oued M'Hasser (Traitement personnel à partir de la carte géologique de Demnate et d'Azilal, échelle: 1/100000)

### 3 Méthodes et données utilisées

#### 3.1 Méthodologie adoptée

Les mesures hydrométriques occupent une place cruciale dans le contexte climatique mondial actuel, marqué par une élévation généralisée des températures et une accentuation de la fréquence des fléaux climatiques extrêmes, avec des impacts directs sur l'équilibre et la répartition spatio-temporelle des ressources hydriques. Pour répondre à ces enjeux, des réseaux de stations hydrométriques sont généralement déployés dans les bassins versants afin d'assurer le suivi de l'évolution des ressources en eau douce et d'évaluer les transformations des caractéristiques hydrologiques au fil du temps [12 ; 13]. Toutefois, l'absence d'instrumentation permanente dans certains bassins comme est le cas dans notre zone d'étude constitue une contrainte majeure limitant la capacité à produire des données robustes afin de prendre des décisions éclairées. Pour pallier cette contrainte, nous avons adopté une méthodologie de terrain structurée autour de cinq axes principaux :

- (i) Le suivi des variations de la hauteur d'eau dans plusieurs sources clés, notamment celles qui assurent l'approvisionnement des populations en eau pour l'irrigation et les usages domestiques, à travers l'installation d'échelles limnimétriques graduées. Ces mesures ont été effectuées en période humide et sèche afin de saisir les dynamiques saisonnières (voir figure 3 et photo 1 et 2).
- (ii) La mesure des débits au niveau de plusieurs points représentatifs du bassin, en appliquant la méthode de profil de vitesse à l'aide d'un micro-moulinet

Hydrométrie (voir photos 3 et 4). Cette approche nous a permis d'enregistrer la largeur, la profondeur et la vitesse d'écoulement afin de calculer le débit (Q) selon la formule suivante :

$$Q = \sum_{i=1}^n (V_i * S_i) \quad (1)$$

où  $V_i$  est la vitesse mesurée dans le segment  $i$ , et  $S_i$  la surface correspondante ("S=w.d" est la surface de la section transversale, avec "w" qui est la longueur moyenne de la section et "d" sa profondeur moyenne).

- (iii) L'analyse des données hydrométriques collectées, en vue de l'élaboration de courbes d'étalonnage établissant une relation empirique entre les hauteurs d'eau observées et les débits correspondants.
- (iv) L'analyse des données climatiques (températures et précipitations) à l'échelle mensuelle et annuelle, afin d'évaluer dans quelle mesure la variabilité climatique influence le rendement hydrologique du bassin de l'oued M'Hasser.
- (v) La production des cartes thématiques (Carte de localisation, carte géologique, etc.) à l'aide du logiciel Arc GIS, qui offre des outils performants pour l'acquisition, la structuration, la gestion et l'analyse des données géospatiales.



Photos n°1 et 2: Suivi des hauteurs d'eau (Bouyzillan, 2023)



Photos n° 3 et 4 : Jaugeages des débits au micro moulinet des sources de l'oued M'Hasser (Bouyzillan, 2022).

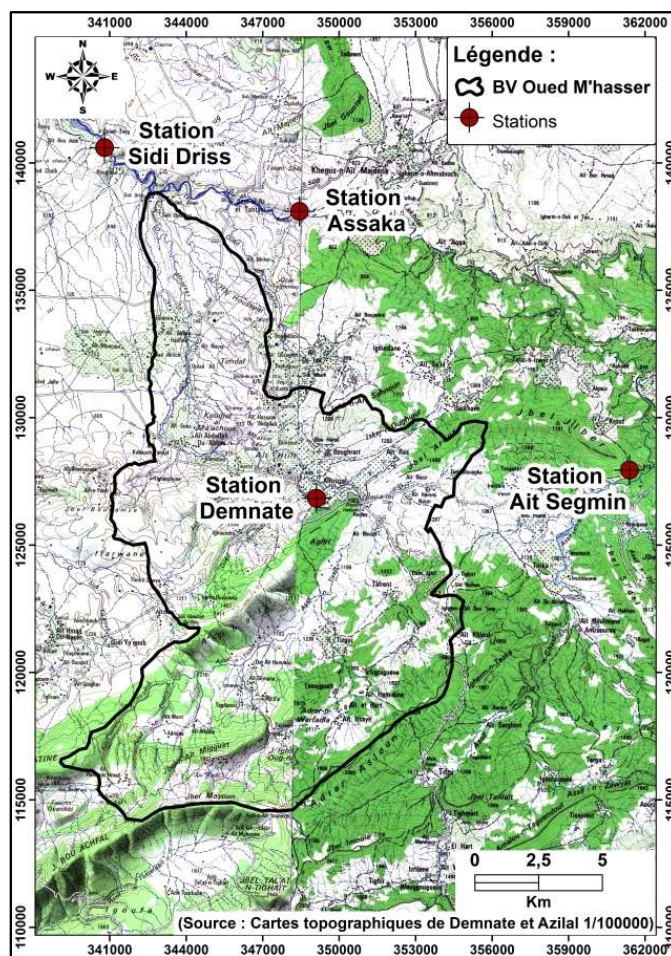
### 3.2 Données utilisées

Pour surveiller les débits dans le bassin versant de l’Oued M’Hasser, dans un contexte marqué par l’absence d’instrumentation hydrologique et par une variabilité climatique, deux types de données ont été exploités :

- Les données climatiques, utilisées pour analyser le fonctionnement hydroclimatique du domaine d’étude, ont été obtenues de l’agence du bassin hydraulique de l’Oum Er-Bia (l’ABHOER), de la direction provinciale des Eaux et de Forêts (Azilal) et du centre de conservation et de développement (Demnate). Vu l’absence des données de température dans la station principale du bassin et pour assurer une représentativité spatiale des conditions climatiques dans l’ensemble du bassin versant étudié, nous avons eu recours aux données de température de deux stations voisines, sélectionnées pour leur proximité spatiale avec les différentes parties du bassin : la station de Sidi Driss, située près de l’aval et la station d’Aït Segmine, localisée à proximité de l’amont (Tableau 1, Fig 3.).

**Tableau 1.** Les données climatiques utilisées

Station	Type de données	X	Y	Z	Date d’observation
Demnate	Précipitation	376	125400	909	1990-2024
Aït Segmine	Température	361400	128000	1025	1986-2024
Sidi Driss	Température	340800	140600	640	1986-2024



**Fig 3.** Localisation des stations climatiques étudiées

- Les données hydrométriques, issues des campagnes de terrain réalisées entre novembre 2021 et mai 2022, ont permis de mesurer les niveaux d'eau et les débits ponctuels des principales sources, apportant ainsi des indications précieuses sur la disponibilité et la dynamique des ressources hydriques dans le bassin.

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Le fonctionnement climatique du bassin de l'oued M'Hasser

#### 4.1.1 Analyse de la variabilité des précipitations annuelles

L'analyse de la variabilité annuelle des précipitations dans le bassin versant de l'oued M'Hasser, a été réalisé grâce aux données issues de la station de référence de Demnate - la seule station existante dans ce bassin- sur la période 1990-2024, la pluviométrie annuelle moyenne atteint 438,4 mm, avec un écart qui dépasse 630,6 mm entre l'année la plus arrosée (1996) avec un cumul de 842,8 mm et l'année la plus séchée avec un total de 212,2 mm (Fig 4).

Durant la période de l'étude (1990- 2024), presque 19 ans des précipitations sont enregistrées au-dessous de la moyenne annuelle estimée à (438,4 mm), traduisant une prédominance relative des années déficitaires en eau, chose qui peut entraîner des répercussions significatives à l'accès des ressources hydriques dans le bassin de l'oued M'Hasser. L'évolution des précipitations durant cette période révèle une irrégularité pluviométrique interannuelle (Fig. 4) en termes de volume et de fréquence, l'une des qualités du régime pluviométrique méditerranéen.

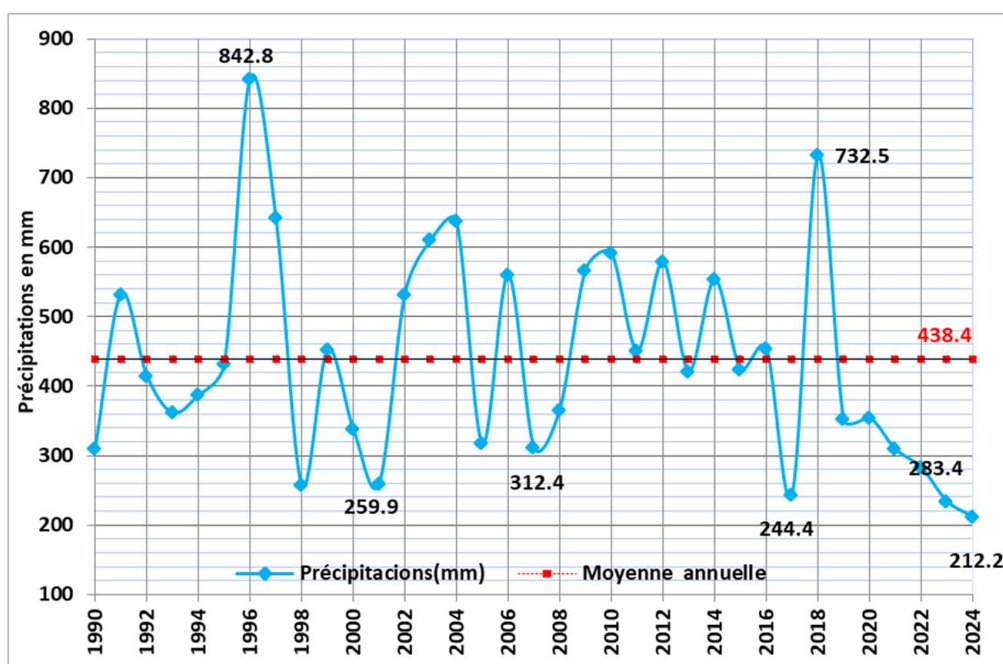


Fig 4. Précipitations annuelles à la station de Demnate (1990-2024)

#### 4.1.2 Analyse de la variabilité des précipitations mensuelle

Après avoir analysé les fluctuations interannuelles des précipitations, il demeure crucial d'examiner la distribution mensuelle du régime pluviométrique, dans le but d'obtenir des données plus fines sur la variabilité intra-annuelle qui structure le régime climatique local et de déterminer les mois les plus arrosés et celle marquée par un déficit pluviométrique. La variation mensuelle des précipitations montre que la période de novembre à avril est la plus arrosée avec des précipitations atteignant 71,5 mm pour le mois de mars, tandis que la période mai à octobre enregistre des précipitations faibles descendant à son minimum en juillet avec seulement 5,2 mm.

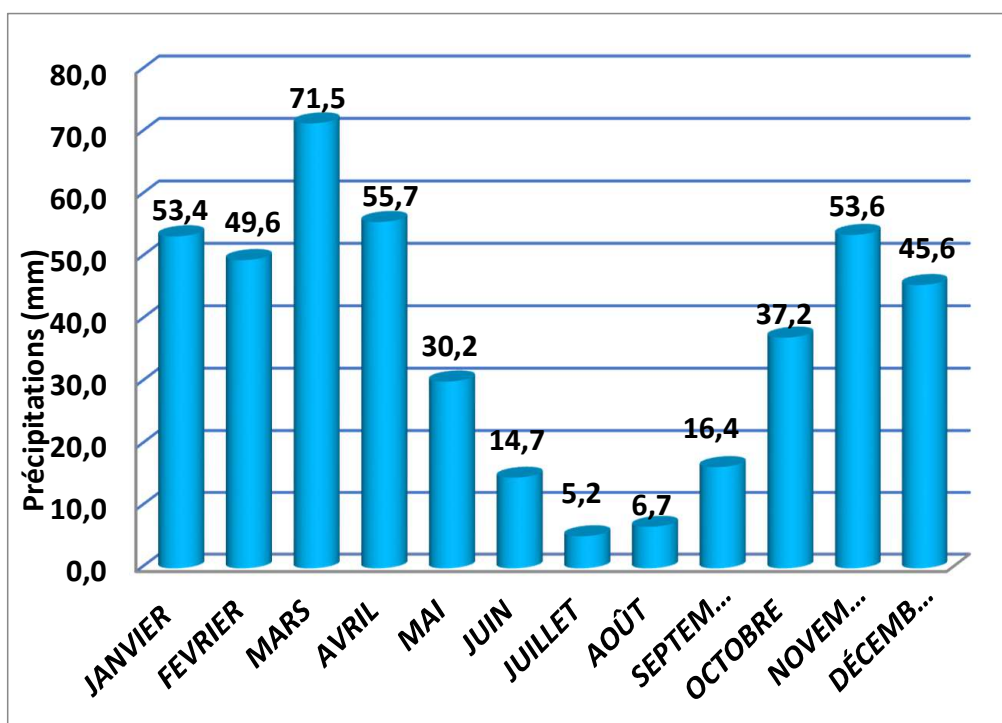


Fig 5. Précipitations mensuelle à la station de Demnate (1990-2024)

#### 1.2 Analyse de la variabilité des températures moyennes annuelles et mensuelles

La température constitue l'un des principaux facteurs influençant le cycle hydrologique [22]. Son influence sur les flux d'eau et la variabilité hydrologique en fait un indicateur indispensable pour toute étude ou gestion efficace des ressources en eau.

À l'échelle annuelle (Figure 4), les températures enregistrées aux stations de Sidi Driss et d'Ait Segmine révèlent une variabilité interannuelle marquée par des valeurs extrêmes contrastées. À Ait Segmine, la température annuelle moyenne la plus élevée a été observée en 2017 avec 30,3 °C, tandis que la plus basse a été relevée en 1999 avec 18,8 °C. En comparaison, la station de Sidi Driss a enregistré ses températures maximales en 2010 et 2024, atteignant 21,3 °C, alors que le minimum a été observé en 1986.

À l'échelle mensuelle, Ait Segmine présente des températures variant entre 15,1 °C en janvier et 35 °C en juillet et août, traduisant une amplitude thermique annuelle de l'ordre de 20 °C. À Sidi Driss, les températures mensuelles fluctuent entre 11,9 °C en janvier et 28,7 °C en août, avec une amplitude de 17 °C. Les deux stations affichent une tendance générale au réchauffement, amorcée respectivement à partir de 2005 pour Ait Segmine et de 2010 pour Sidi Driss, accentuant ainsi les pertes en eau par évapotranspiration estivale et augmentant la pression sur les ressources hydriques locales (Figure 6).

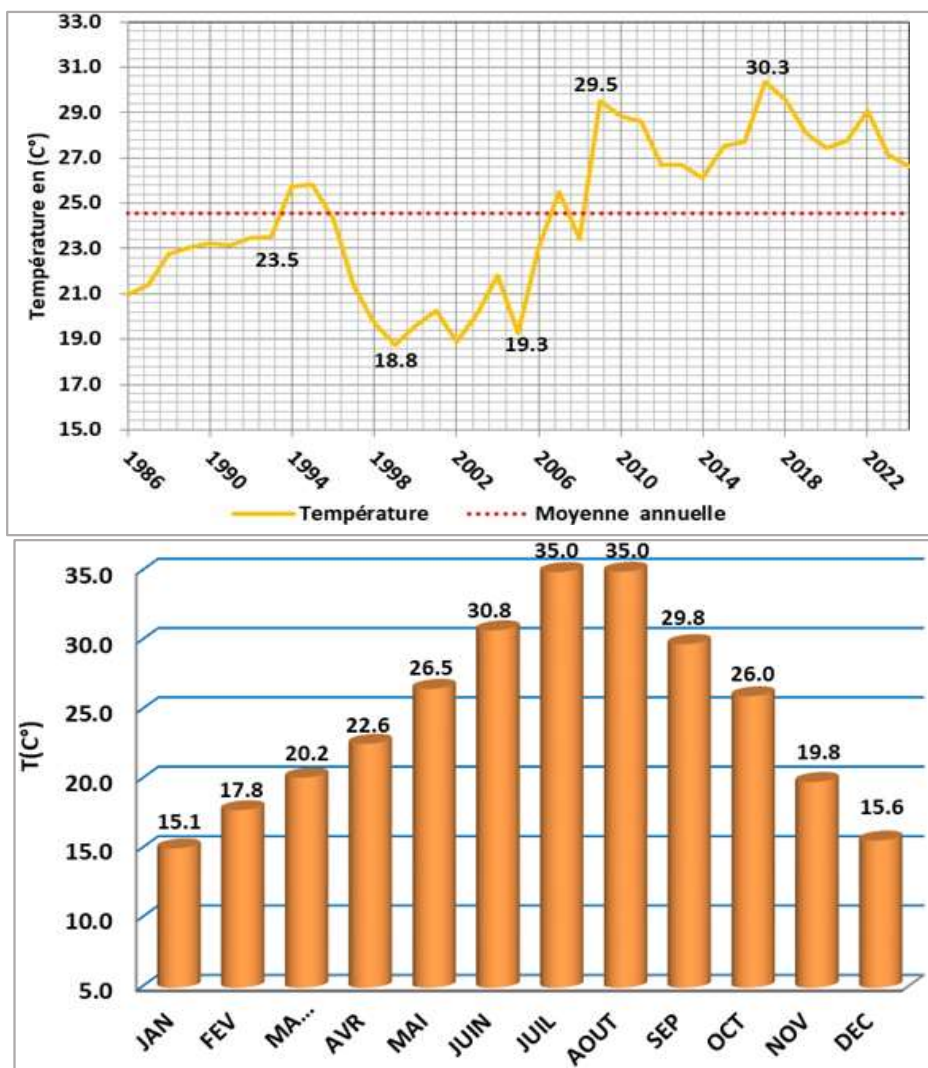


Fig 6. Température annuelle et mensuelle moyenne à la station Ait Segmine (1986–2024)

## 4.2 Suivi des hauteurs d'eau et mesures des débits

### 4.2.1 Suivi des hauteurs d'eau

Aujourd'hui, le suivi des hauteurs d'eau d'un oued se base sur maintes méthodes et techniques qui soient simples ou avancées. La lecture manuelle sur une échelle limnimétrique est parmi les méthodes traditionnelles les plus utilisées, en raison de son cout et grâce à sa capacité d'assurer un suivi précis et continu des fluctuations hydrologiques. À travers les enregistrements quotidiens des hauteurs d'eau des sources à l'aide d'une échelle limnimétrique et d'un observateur qui permet de lire la cote, nous pouvons établir une base de données pour chaque source étudiée (Tableau, 2).

**Tableau 2.** Hauteurs d'eau des sources étudiées

Bouhlou		Ait Yahia		Ihadafen	
Date	Hauteurs (cm)	Date	Hauteurs (cm)	Date	Hauteurs (cm)
12/10/2022	10	15/10/2022	35	10/10/2022	6
10/11/2022	8	14/11/2022	37	23/11/2022	7
19/12/2022	9	20/12/2022	33	17/12/2022	6,5
07/01/2023	11	03/01/2023	32	15/01/2023	6
09/02/2023	8	11/02/2023	34	12/02/2023	6,5
06/03/2023	9	08/03/2023	36	07/03/2023	7
03/04/2023	11	07/04/2023	35,5	14/04/2023	8

### 4.3 Mesure de débits des sources

La réalisation des campagnes de jaugeage n'est pas toujours favorable en raison des fluctuations fréquentes de la surface de l'eau. Pour pallier cette problématique et pour améliorer la compréhension du comportement hydrologique du bassin versant de l'oued M'Hasser, nous avons effectué plusieurs campagnes de jaugeage au cours de la période (2022-2023) avec une fréquence d'une campagne tous les mois, reposant sur la méthode d'exploration du champ de vitesse à l'aide d'un micro-moulinet. Cette approche nous a permis de mesurer le débit, produire une base de données hydrométrique (Tab.3) et élaborer la courbe de tarage des sources étudiées, en vue de déterminer les débits correspondant aux hauteurs d'eaux observées.

Les résultats de débits mesurés (Tab.3) montrent des fluctuations marquées entre les sources mesurées. Tandis que les débits les plus élevés sont enregistrés à la source d'Ait Yahya avec des débits oscillent entre 46 et 69 l/s, suivie par celle de Bouhlou, alors qu'Ihadafen présente les valeurs les plus faibles.

**Tableau 3. Résultats de mesure de débits des sources étudiées.**

Ait Yahya		Bouhlou		Ihadafen	
Date	Q (l/s)	Date	Q (l/s)	Date	Q (l/s)
15/10/2022	60	12/10/2022	5.5	10/10/2022	2.4
14/11/2022	69	10/11/2022	4	23/11/2022	2.7
20/12/2022	50	19/12/2022	4.5	17/12/2022	2.46
03/01/2023	46	07/01/2023	6	15/01/2023	2.52
11/02/2023	55	09/02/2023	4	12/02/2023	2.63
08/03/2023	64	06/03/2023	5	07/03/2023	2.56
07/04/2023	65	03/04/2023	7	14/04/2023	2.34

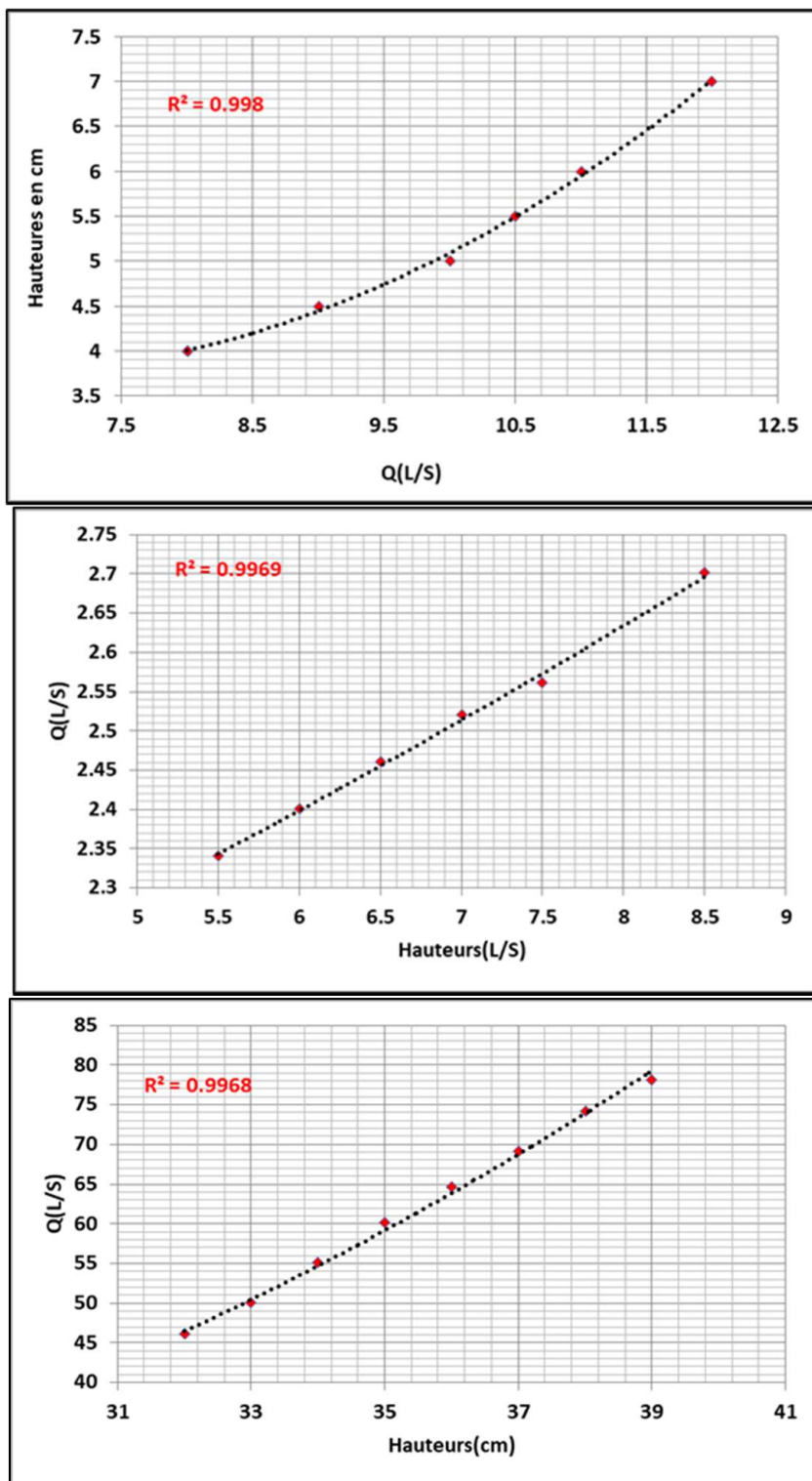
#### 4.4 Élaboration de la courbe de tarage des sources

La courbe de tarage - reflétant la relation entre le débit et les hauteurs d'eau - nous a permis d'estimer le débit correspondant à un instant donné et ce par le biais d'une simple lecture du niveau d'eau sur une échelle limnimétrique. Cependant, les fluctuations des cours d'eau et les conditions hydrologiques et géographiques complexifient l'élaboration des courbes de tarage.

Les trois courbes ci-dessus montrent une relation très forte et compatible entre les niveaux d'eau et le débit des sources du bassin de l'oued M'Hasser, avec des coefficients  $R^2$  supérieurs à 0.996, ce qui confirme une excellente précision des tarages.

La progression régulière des points traduit un fonctionnement hydrologique cohérent, où l'augmentation de la hauteur entraîne systématiquement une hausse du débit.

Les formes quasi-linéaires ou légèrement curvilignes indiquent que ces sources ont un comportement stable, typique des systèmes karstiques ou fissurés du Haut Atlas, et réagissent de manière harmonieuse aux variations de recharge.



**Fig 7.** Courbes des tarages (axe horizontal  $x = Q$ , axe vertical  $y = H$ ) réalisées dans les sources étudiées

## Conclusion

Il va de soi que la maîtrise des risques liés aux phénomènes hydrologiques et la gestion des ressources en eau constituent un défi majeur à l'échelle mondiale. Un nombre considérable de recherches montrent que la collecte de données hydrométriques joue un rôle crucial dans la gestion et dans la prise de décision concernant les ressources en eau, en particulier les mesures de débit et les séries chronologiques associées [15], elle figure parmi les outils les plus robustes et cohérents

qui facilitent la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants. Cependant, l'accès à ces données n'est pas toujours disponible, notamment dans les bassins versants non jaugés, comme est le cas pour notre domaine d'étude.

Pour pallier cette contrainte et contribuer à l'optimisation de la disponibilité des ressources hydriques, au sein du bassin de l'oued M'Hasser dans un contexte marqué par une irrégularité pluviométrique spatiotemporelle et une tendance à la sécheresse au cours de dernière décennie, nous avons adopté une méthodologie basée sur des jaugeages proactifs, conformant aux critères scientifiques, préconisés par l'OMM, afin de garantir la collecte de données de qualité.

Les campagnes de jaugeage réalisées entre 2022 et 2023, à l'aide d'un micro-moulinet et d'une échelle limnimétrique, nous ont permis de mesurer à la fois les débits et les hauteurs d'eau correspondantes des sources mises en question.

Les données obtenues nous permettront d'élaborer une courbe d'étalonnage probable de chaque source traduisant la relation débit-hauteur d'eau correspondante. Cette courbe est un outil scientifique fondamental pour comprendre le fonctionnement hydrologique des sources étudiées. Néanmoins, une marge d'incertitude demeure inévitable, liée à la morphologie du lit, mouvement du lit en crue, ainsi que des limites propres aux techniques de mesure utilisées. Par conséquent, la réalisation des campagnes de jaugeage à différentes périodes sera efficace, afin de vérifier la stabilité de la courbe de tarage.

## Références

1. Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G. & Sutera, A. (2003). Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17(4), 273–296
2. Van der Schrier, G., Briffa, K. R., Jones, P. D. & Osborn, T. J. (2006). Summer moisture variability across Europe. *Journal of Climate*, 19(12), 2818–2834
3. Essa, Y. H., Hirschi, M., Thiery, W., El-Kenawy, A. M. & Yang, C. Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *npj Climate Atmos. Sci.* 6(1), 133 (2023).
4. Oussaoui, S. et al. Mapping drought severity impact on arboriculture systems over Tadla and lower Tassaout plains in Morocco using Sentinel-2 data and machine learning approaches. *Geocarto Int.* 40(1), 2471104 (2025).
5. Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33, L08707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>.
6. Margat J. (2008). L'eau des Méditerranéennes situations et perspectives. Éd. L'Harmattan. Paris, 288p.
7. Benblidia M., Margat J., Vallée D., 1998, « Pénuries d'eau prochaines en Méditerranée ? », *Futuribles*° 233, juillet-août, pp. 5-29.
8. Margat J. (avec la collaboration de S. Treyer), 2004, L'eau des méditerranéens : situation et perspectives, Ministère de l'écologie et du développement durable, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Plan Bleu PNUE/PAM, Sophia-Antipolis, 347 p.
9. CESE (Conseil Économique, Social et Environnemental). (2014). La gouvernance par la gestion intégrée des ressources en eau au Maroc : levier fondamental de développement durable. Rabat, Maroc.
10. Bijeesh and Narasimhamurthy, 2020 T.V. Bijeesh, K.N. Narasimhamurthy Surface water detection and delineation using remote sensing images: a review of methods and algorithms *Sustain. Water Resour. Manag.*, 6 (4) (2020), pp. 1-23, 10.1007/s40899-020-00425-4.
11. Baup, F., Frappart, F. & Maubant, J. (2014). Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*,

- 
- 18(5), 2007–2020. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2007-2014>.
12. Mishra, A. K. & Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>.
  13. WMO (World Meteorological Organization). (2010). *Agricultural Drought Indices: Proceedings of an Expert Meeting, 2–4 June 2010, Murcia, Spain*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
  14. IPCC. (2001). *Hydrology and Water Resources. Working Group II, Third Assessment Report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
  15. Muste, M., Fujita, I., Hauet, A., 2008. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour. Res.* 46 (4), <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>.