

Research Article

COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS AMÉNAGÉS EN TERRASSES AGRICOLES : EXEMPLE DU BASSIN VERSANT KHAT-KHATABAH : RÉGION D'EL MAJARDAH ET SES ABORDS

^{1,2,3*}Azaiez Naima, ^{4,5}Zoghlami Karima, ¹Baazaoui Narjes and ¹Qhtani Nawal

¹King Khalid University, Faculty of Human Sciences, Abha, Saudi Arabia.

²Preparatory Institute for Literary Studies and Human Sciences of Tunis I (IPELSHT), Tunis.

³Research Laboratory: "Biogeography, Applied Climatology and Environmental Dynamics" (BICADE).

⁴Faculté des Sciences de Bizerte, Université Carthage.

⁵Research Laboratory : Laboratoire des Ressources Minérales et Environnement (LRME), Université Tunis el Manar.

Received 15th March 2022; Accepted 16th April 2022; Published online 31th May 2022

RÉSUMÉ

La mise en œuvre des terrasses agricoles dans la région d'Assir avait pour intérêt la mobilisation de l'eau. Ce fait est prouvé par la localisation de plus de 90% des terrasses le long des cours d'eau et des plaines alluviales. Elles ont envahi les versants abritant un petit manteau du sol pour permettre de pratiquer une agriculture artisanale adaptée aux conditions spécifiques et locales du milieu physique. La persistance des conditions de sécheresse et la prédominance des pluies intenses ont fait exposer ces anciennes terrasses agricoles à des pluies agressives dont l'effet est devenu impactant avec l'expansion du tissu résidentiel aux dépens de ces terrasses agricoles. Ces édifices hydro agricoles qui ont fait l'essor de la région, se trouvent actuellement dans une situation de menace qui se traduit par un véritable changement d'occupation du sol, qui a largement affecté la réponse hydrologique des sous bassins versants correspondants. Les résultats de cette recherche montrent une hausse de 87% du coefficient de ruissellement entre 1985 et 2020. Dans ce contexte, on peut noter que la part des terres ayant une très forte aptitude pour provoquer une réponse hydrologique rapide a augmenté de 50% dans l'ensemble des bassins versants drainant la région d'El Majardah et ses abords.

Mots clés: Coefficient de ruissellent, débit de pointe, lame d'eau ruisselée, terrasses agricoles ancestrales.

INTRODUCTION

Dans les montagnes des régions arides et semi-arides, les terres agricoles sont médiocres en qualité et assez rares en quantité. Ce problème universel a placé la majorité des terres arables situées sur les versants difficiles dans une situation déplorable. La région d'Assir ne fait pas exception, pourtant l'agriculture demeure l'activité de base pour la plupart de la population locale des montagnes « assyriennes », faisant un précieux héritage ancestral qui raconte une longue histoire de lutte d'un peuple qui est à la recherche de la collecte des eaux (Azaiez *et al.*, 2020). Ce sujet a fait couler beaucoup d'encre chez les historiens, les géographes et les hydrauliciens à l'échelle mondiale (Nasri, 2002 ; Pietsch *et al.*, Mabit, 2012; Blond *et al.*, 2018, Azaiez, 2020 et 2021). La consultation des diverses recherches a permis de trouver des points de rencontre sur des expériences mondiales diverses et des méthodes qui ont pour objectif l'optimisation de la durabilité des terrasses et des banquettes. Ainsi, dans le domaine aride et semi-aride Bonvallot en 1986 a traité les aspects qualitatifs des Jessours au sud Tunisien. Les travaux de recherches de Blond en 2018 portant sur les terrasses agricoles du haut plateau Ethiopien, ont été d'un grand apport également car elles datent presque du même âge que les terrasses assyriennes si elles ne sont pas antérieures. Une importance spéciale a été portée à cette étude qui est basée sur l'apport des analyses sédimentologique et pollinique permettant de reconstituer les différentes étapes

d'évolution des terrasses en fonction des changements environnementaux. Le bassin versant de l'oued Khat-Khatabah (Fig.1) constitue un véritable laboratoire géomorphologique pour évaluer le fonctionnement hydrologique des anciennes terrasses agricoles en fonction des changements paysagers, amplement touchées par la baisse de la pluviométrie et la détérioration des conditions édaphiques. La présente recherche se veut une étape de mise à jour et d'évaluation des données relatives aux défis qu'affrontent les anciennes terrasses agricoles au seuil d'un nouveau contexte de changements climatiques globaux et des transformations socio-économiques à des effets prégnants (Alsubih *et al.*, 2021). La mise en place des terrasses avait constitué une réponse assez efficace à des anciennes exigences climato-édaphiques (Azaiez, 2021) Leur stabilité pendant des centaines d'années montre bien qu'elles ont été construites sur des bases solides malgré la modestie des moyens chez les anciennes sociétés paysannes. La méthodologie adoptée pour atteindre cet objectif, consiste à faire une estimation de la lame d'eau ruisselée avant et après les transformations paysagères en se basant sur le calcul du coefficient de ruissellement afin de prévenir les incidences des changements sur le volume d'eau ruisselé ainsi que le débit de pointe. L'apparition des signes de déstabilisation confirme une rupture d'un équilibre qui a duré longtemps et une emprise de l'érosion sélective des éléments fins du sol. Afin d'explorer et de tester le rôle d'un nombre de paramètres sur le fonctionnement actuel des terrasses ancestrales et de la souplesse de leur adaptation aux impératifs climatiques et socio-économiques, plusieurs formules hydrologiques ont été appliquées dans les différents sous bassins versants. Les résultats de la modélisation ont été comparés avec les mesures de jaugeage et des simulations effectuées par d'autres chercheurs dans des bassins versants proximaux de la région d'El Quenfudah et c'est dans le but d'identifier

*Corresponding Author: Azaiez Naima,

1 King Khalid University, Faculty of Human Sciences, Abha,

2 Saudi Arabia, Preparatory Institute for Literary Studies and Human Sciences of Tunis I (IPELSHT), Tunis.

3 Research Laboratory: "Biogeography, Applied Climatology and Environmental Dynamics" (BICADE).

une tendance régionale concernant le sud-ouest de l'Arabie Saoudite et de sensibiliser la population paysanne sur les risques que coure le sol à différentes mesures.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant des oueds Khat et Khatabah se situe au sud-ouest de l'Arabie Saoudite. Il prend la forme de deux amphithéâtres emboîtés abritant au centre une dépression celle d'El Majardah drainée par oued Dhamou et ses affluents. La combe périphérique de Khat-Khatabah, large au sud et étroite au nord, est drainée par deux cours d'eau principaux Khat et Khatabah. Ces deux derniers sont alimentés par les oueds Dhamou provenant de la dépression d'El Majardah et Daloua venant des montagnes Thorban situées plus au nord (Fig.1).

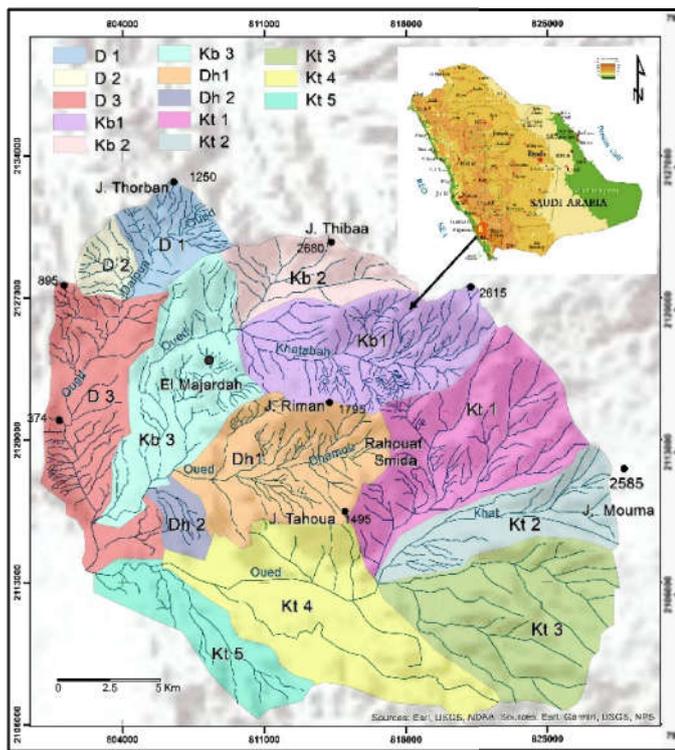


Fig. 1. Carte de localisation du bassin versant Khat-Khatabah (Source : Image AlosPolsar de 12.5 m de précision)

Cette forme typique d'amphithéâtres emboîtés dans une structure majoritairement volcanique, formée des roches cristallines, revêt un caractère unique de la zone. Les crêtes sont dégagés dans un complexe de roches volcano-plutoniques, entrecoupées par des affleurements gréseux. La première étape de ce travail consiste en une lecture du paysage physique pour identifier ces édifices anthropiques dans leur contexte morphologique et pour décrypter la façon dont ces terrasses agricoles ancestrales sont exploitées. L'élaboration de la carte géomorphologique et de la carte d'occupation du sol est considérée une étape d'importance capitale. Elles constituent un accès opportun et forment un champ judicieux pour la vérification de certaines méthodes empiriques couramment appliquées dans des études hydrologiques. Une carte géomorphologique a été établie afin de dresser un état de lieu des terrasses agricoles en termes du fonctionnement hydrologique. Une typologie de ces terrasses, montre qu'elles se comportent différemment selon la position morphologique particulière qu'elles occupent (Fig 2).

Etat de lieu et typologie des terrasses agricoles

Une première évaluation de l'état actuel du paysage montre que plus de 86% des terrasses se concentrent sur le cours moyen principalement et le cours aval secondairement des oueds Khat et Khatabah. Sur les hauts versants, les terrasses ne sont pas totalement absentes, mais elles occupent des secteurs et des endroits privilégiés comme la zone de confluence où les ravins d'ordre 1 et 2 se ramifient en forme d'entonnoir permettant de retenir plus d'eau et de sédiments fins (Fig. 2). Les terrasses agricoles situées aux environs de la région d'El Majardah, sont exploitées de différentes façons selon les caractéristiques topo-séquentielles (valeur de pente, type du sol et type de roche mère) et les conditions topo-climatiques (surtout l'exposition des versants et l'altitude qui ont un effet direct sur la teneur en humidité dans les différents types du sol). Les cultures maraîchères sont pratiquées surtout dans les basses terrasses, alors que les hautes terrasses sont réservées à l'arboriculture bénéficiant, non seulement, de la rétention de l'eau mais aussi de l'air tiède entraîné par la brise de vallée. Autrefois, les premières terrasses agricoles d'Assir sont mises en œuvre en harmonie parfaite avec l'organisation du réseau hydrographique en se basant sur l'épandage des crues des oueds prenant leurs sources sur les hauts sommets (Riman, Tahoua) à travers un système de digues en murettes implantées en cascade. Les termes « Al Rakib », « Al Joullah », « Al Outhari », « Al Maskaoui », « Al Machoura », sont tous des termes locaux qui désignent les différentes composantes de ce système hydroagricole très complexe basé sur des terrasses agricoles et des techniques hydrauliques douces des versants. En effet, ce type d'aménagement s'inscrit dans la mémoire sociale de la population d'Assir. C'est une tradition pluriséculaire, qui remonte à plus de quatre siècles selon les sources historiques qui sont intéressées à l'étude des terrasses de la péninsule Arabique et dans le haut plateau de l'Ethiopie (Blond *et al.*, 2018).

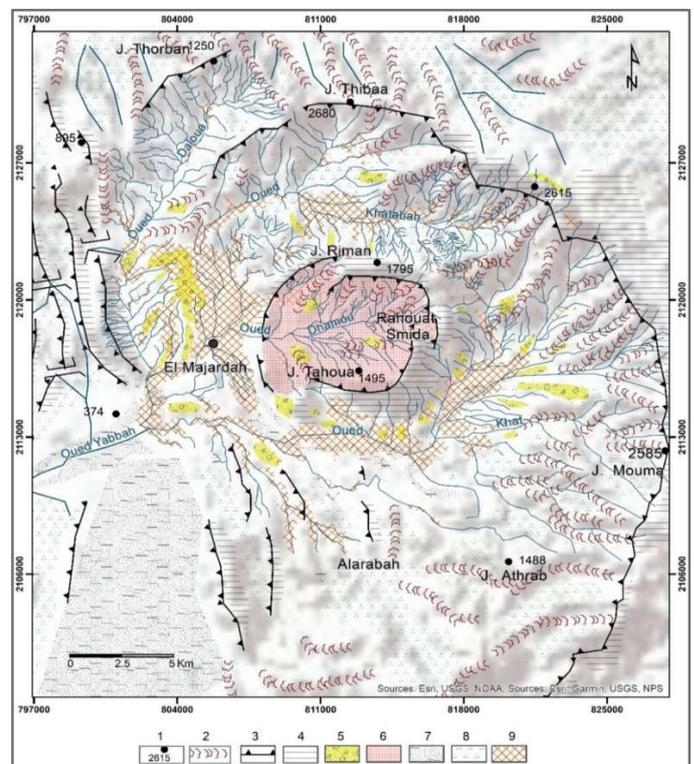


Fig. 2. Croquis morpho structural du bassin versant Khat -Khatabah dans la région d'El Majardah et ses abords (Source: Carte géomorphologique de sud-ouest de l'Arabie saoudite, 2015 ; la carte géologique au 1/500000 de de sud-ouest de l'Arabie Saoudite et Image google Earth Pro, 2020)

1 : point côté ; 2 : interfluves et croupes ; 3 : crêt ; 4 : surface structurale ou étendues de roches cristallines ; 5 : glacis d'ablation et pédiments ; 6 ; combe d'El Majardah ; 7 : plaines alluviales ; 8 : plaines d'érosion ; 9 : les édifices des terrasses agricoles.

Aujourd'hui, les choses ont changé, le plus souvent, à l'encontre de la stabilité de ces techniques ancestrales, sauf dans quelques endroits où la situation demeure encore en équilibre. On parle essentiellement de la détérioration des conditions climatiques et la pression anthropique sur le milieu naturel. L'acheminement naturel de l'eau substantielle et nécessaire aux besoins des cultures dans ces terrasses agricoles est devenu de plus en plus difficile avec la prolifération de la sécheresse et l'intervention de l'Homme. L'extension urbaine, les équipements de l'infrastructure et la multiplication des retenues collinaires ont largement entravé l'approvisionnement en eau. La construction des lacs collinaires sur le cours moyen des oueds Khat, Dhamou et Khatabah, bien que bénéfique en termes de protection contre les inondations et de mobilisation des eaux, elle a fait priver la majorité d'entre elles des quantités d'eau supplémentaires. Sur les versants pentus prédominant des terrasses très étroites souvent disposées en cascade dans les arènes granitiques logées dans les versants et les escarpements rocheux. Les vallées et les affluents situés plus en amont sont sculptées en terrasses irrégulières et très fragmentées, sauf dans les talwegs que ces terrasses gardent la forme de caissons hétérométriques délimitées par de levés en terre et qui sont épisodiquement submergées par les eaux de pluie (Photos 1 et Figs 3 et 4).

Photo. 1 Expansion du tissu résidentiel aux dépens des terrasses agricoles dans le cours aval de l'oued Dhamou affluent de Khat – Khatabah (Source : Photos disponibles sur Google Earth Pro, 2020)

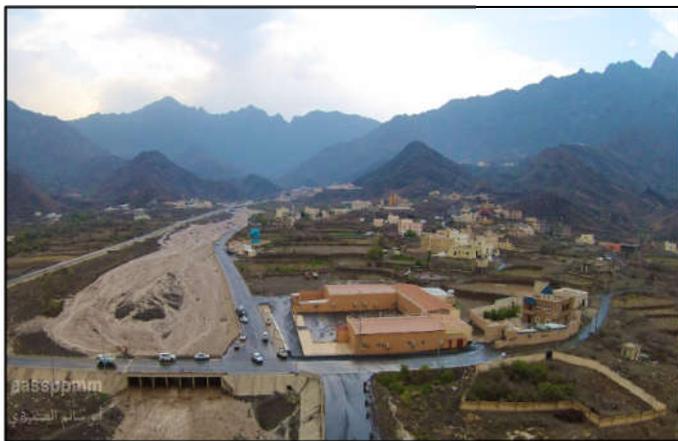


Fig. 3. Répartition des anciennes terrasses agricoles en fonction de l'expansion du tissu résidentiel en 2020 (Source : Image google Earth Pro, 2020).

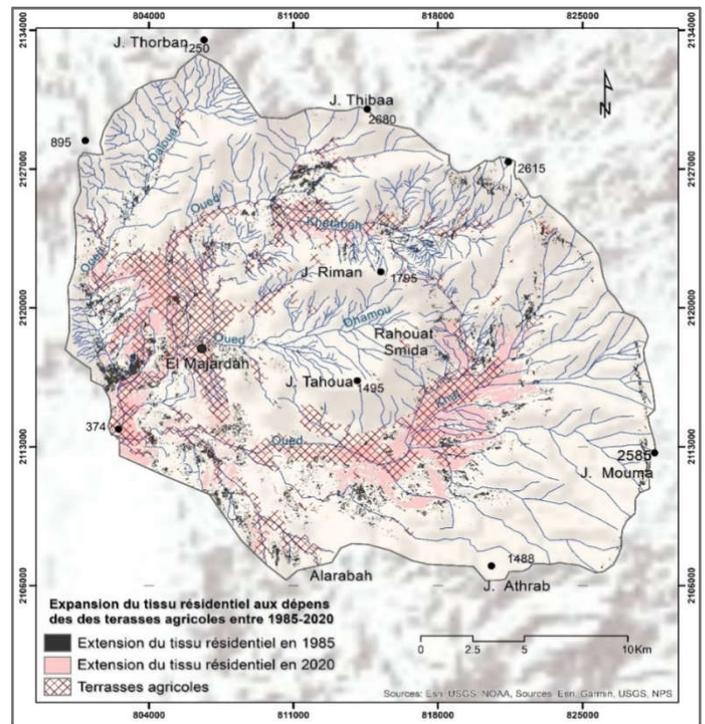
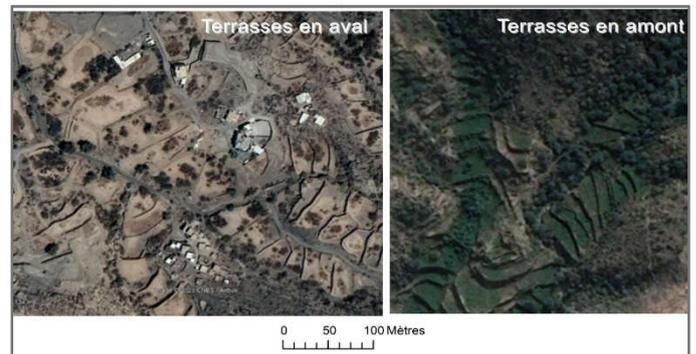


Fig.4 Des terrasses agricoles étroites disposées en cascade dans les secteurs amont et des terrasses agricoles d'épandage plus larges dans les secteurs aval du bassin versant de l'oued Dhamou, région d'El Majardah. (Source : Images Google Earth Pro, 2020)



Sur les versants les plus accidentés, les terrasses prennent la forme des lanières très étroites (Photo, 2).

Photo. 2 Exemple de terrasses agricoles très étroites disposées en cascade sur le haut versant ouest de la montagne Riman (Source : Photos disponibles sur Google Earth Pro, 2020)



L'objectif de ce travail est d'évaluer le fonctionnement de ces terrasses agricoles selon une approche hydro-morphologique. Les

premiers habitants ont pratiqué la culture dans les arènes granitiques près de résurgences des sources (Azaiez, 2020 et 2021). Des anciens villages perchés tout autour des poches de sol logés dans des petites dépressions et des replats retenant encore une couverture du sol et un couvert végétal. C'est le cas du village Ghiya située au sud-est de la montagne Tahoua (Photo. 3)

Les effets entraînés par les changements d'occupation du sol entre 1985 et 2020

Il faut souligner que l'occupation du sol constitue un paramètre essentiel chez les hydrologues pour l'estimation du coefficient de ruissellement et dans le calcul de la lame d'eau ruisselée. Alors que les autres indices hydrologiques dépendent des pluies et des conditions morpho métriques et hypsométriques spécifiques de chaque sous-bassin versant.

Photo. 3 Traces d'une ancienne activité agricole dans le village perché de Ghiya logée dans une arène granitique. (Source : Image google Earth Pro, 2020).



La région d'El Majardah et ses environs ont connu une extension considérable de leur tissu résidentiel entre 1985 et 2020. La croissance est décrite comme explosive dans le cours moyen de l'oued Khat en premier lieu et sur le cours aval au niveau de la confluence des oueds Daloua, Dhamou et Khataba. La superficie bâtie a augmenté de 66.46 % en moyenne, malheureusement plus de 70 % de ces constructions sont installées de part et d'autre des principaux cours d'eau et aux dépens d'anciennes terrasses agricoles, ce qui a entraîné une modification notable au niveau de la répartition des ressources en eau, des zones d'infiltration et des zones de concentration des eaux de ruissellement. Autrefois, les paysans de la région d'El Majardah se contentaient des ressources en eau piégées contre les murettes des terrasses sans faire recours à l'irrigation. Ce fait témoigne sur le bon fonctionnement hydrologique de ces aménagements de petits hydrauliques ancestraux. Après avoir précisé la place qu'occupe cet hydro système ancestral dans les montagnes « Assyriennes », il faut parler des menaces que courent ces édifices hérités depuis plus de 4 siècles. Malheureusement, le mitage des terrasses agricoles oppose la population à un vrai défi pour la gestion durable des versants arides. L'évaluation du degré de risque nécessite un mis au point d'une méthodologie appropriée aux conditions locales du bassin versants Khat-Khatabah.

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

L'entité du bassin versant a été gardée dans cette étude comme étant une entité d'intérêt privilégiée, grâce aux facilités offertes en termes de délimitation et de la souplesse de modélisation. A travers cette recherche faisant intervenir une approche hydro-géomorphologique, c'est la pérennisation des ressources en eau et la protection du sol qui sont visées à travers l'évaluation de certains paramètres relatifs au comportement et à la réponse hydrologique des quatre bassins versants. En effet, le temps de concentration, la lame d'eau ruisselée,

l'indice d'infiltration, le débit de pointe et le volume d'eau total ruisselé, sont en fait les paramètres les plus adaptés et les plus appropriés à ce type d'étude. Sans oublier aussi les conditions locales pouvant influencer la réponse hydrologique du bassin versant, entre autres les paramètres morphométriques et le coefficient de ruissellement. En se basant sur un ensemble de variables et de paramètres climatiques, hypsométriques et morpho métriques, il était possible d'appliquer un modèle qui est à l'origine empirique, mais il fait intervenir les caractéristiques physiques locales de chaque sous bassins versants. On a fait recours au SIG pour calculer certaines valeurs pondérées et spatialisées relatives aux différents paramètres de 13 sous bassins versants répartis comme suit : 5 sous bassins versants pour l'oued Khat, 3 sous bassins versants pour l'oued Khatabah, 2 pour oued Dhamou et 3 pour oued Daloua. En effet, le cadre de cette recherche ne se prête pas pour une étude comparative entre des différents modèles, mais la comparaison est faisable entre les différents sous bassins versant. L'idéal dans ce type de recherche, c'est d'avoir la possibilité de calculer le bilan de l'eau en comparant la quantité d'eau totale introduite dans la terrasse agricole venant directement des pluies et de l'écoulement hypodermique et la quantité sortante qui se manifeste sous forme de lame d'eau ruisselée. Malheureusement, on ne dispose pas les moyens et les outils de mesure pour effectuer ce travail, raison pour laquelle on s'est donc contenté d'extraire les éléments de réponses nécessaires à travers des méthodes rationnelles et empiriques. Vu la complexité du grand bassin versant et la non-disponibilité de certaines données, les différents indices et coefficients calculés dans cette recherche restent toutefois subordonnés aux données existantes dans la zone d'étude. Aujourd'hui, des milliers d'articles scientifiques font référence à plusieurs modèles et équations de simulation pour l'estimation des différents termes du bilan hydrologique (Subyani, 2010; Shi, 2014, Labbas, 2015), ont montré des résultats probants. Le choix de la méthode du calcul des différents paramètres hydrologiques a été fait dépendamment des exigences physiques du terrain spécifiques de la région et de la disponibilité des données nécessaires et des facteurs encore méconnus. Pour appréhender la transformation des pluies réelles en débit, on a fait appel à la modélisation. Elle se présente comme étant un essai d'expérimentation à distance qui a donné des résultats similaires et proches des mesures effectuées directement sur le terrain (Perrin, 2000, Laborde, 2000, Azaiez, 2020). L'intérêt de cette démarche réside en grande partie dans cette forme pluridisciplinaire qui garde en partie un esprit géographique qui prend en considération les changements d'occupation du sol et permet en même temps une ouverture sur l'hydrologie.

Les paramètres hydrologiques nécessaires à la modélisation (Tab, 1)

*Temps de réponse (T_r) :

$$T_r = 0.6 \cdot T_c \quad [1]$$

Avec :

0.6 : coefficient d'ajustement fixe de la formule ;
 T_c : temps de concentration

*Temps de montée T_m :

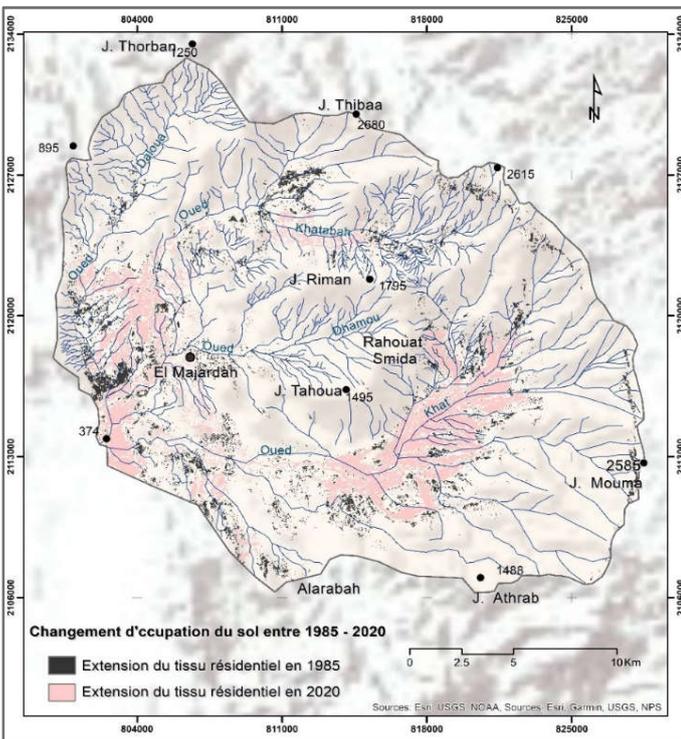
$$T_m = \frac{T_r}{2} + t_c \quad [2]$$

Avec : T_r : Temps de réponse ;

T_c : temps de concentration

*Le débit de l'écoulement (Q) :

Fig. 5 Evolution du Tissu résidentiel dans le bassin versant Khat-Khatabah (1985 – 2020) (Source : Images Google Earth Pro, 1985 et 2020)



Il est obtenu par la méthode rationnelle qui s'exprime selon la formule suivante pour trois classes d'intensité des pluies (30 mm/h, 60 mm/h et 150 mm/h)

$$Q = 0.278 \cdot cr \cdot i \cdot A \tag{3}$$

Avec :
 Cr : coefficient de ruissellement (en%) ;
 i : intensité de la pluie pour une durée donnée (t) en fonction du temps de concentration (en mm/h) ;
 A : superficie (km²) ;

***Le débit de pointe (Q_p en m³/Seconde) :**

$$Q_p = \frac{2.08 \times A}{T_m} \tag{4}$$

***Le temps de récession (Tr en minutes) :**

Il est introduit par les hydrologues pour illustrer l'effet de laminage qui se produit lorsqu'on augmente la valeur d'entrée en calculant le bilan hydrologique et pour estimer les apports en eau provenant de l'écoulement hypodermique produit dans les horizons du sol (Lavigne, 2007, Labbas, 2015).

$$B = 1.67 \times T_m \tag{5}$$

***Le temps de concentration (Tc en minutes) :**

Il est estimé par les trois formules empiriques de Ventura, Kirpich et Turazza faisant intervenir trois paramètres : la superficie, la pente et la longueur de la pente pour certaines équations. Le coefficient d'ajustement diffère d'une équation à une autre en fonction de la superficie du bassin versant.

***Formule de Ventura (tc_{Ventura}) :**

$$tc_{Ventura} = 76.3 \times \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{I}} \tag{6}$$

Avec : A : superficie du B.V (km²) ;
 I : pente moyenne (%) ;

76.3 : coefficient fixe

Formule de Kirpich (tc_{Kirpich}) :

$$tc_{Kirpich} = 0.0195 \times \frac{L^{0.77}}{I^{0.385}} \tag{7}$$

Avec : 0.0195 : coefficient fixe de la formule ;
 L : longueur du cours d'eau (m)
 S : pente du cours d'eau principal (%)

***Formule de Turazza(Tc_{Turazza}) :**

$$Tc_{Turazza} = 0.0529 \times A \times \left(\frac{L}{S}\right)^{1/3} \tag{8}$$

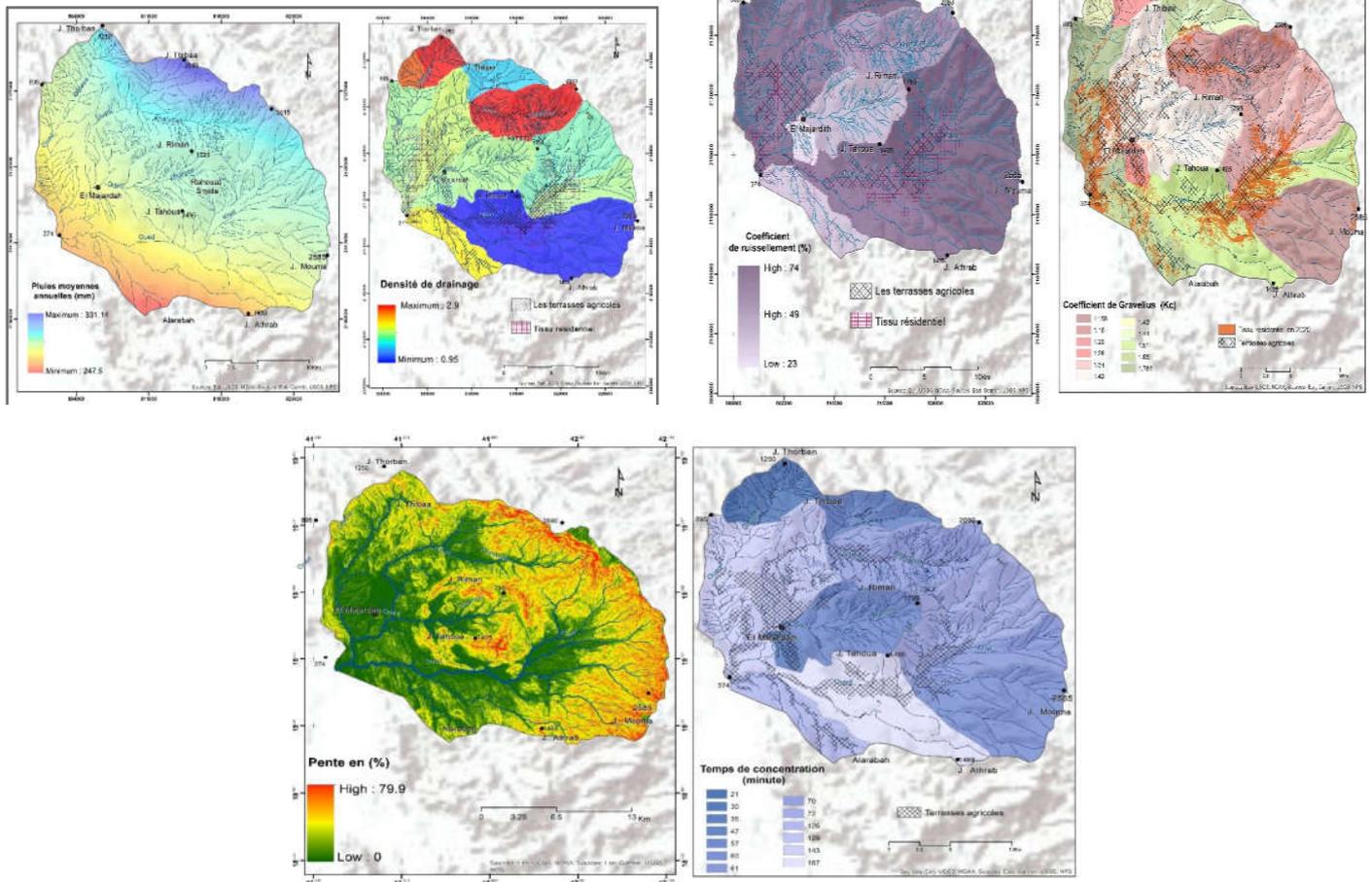
Avec :
 0.0529 : coefficient fixe ;
 L : longueur du cours d'eau (m) ;
 S : pente (%)

Interprétation des résultats

Dans cette approche d'analyse systémique, il était possible de construire un état de lieu des sous bassins versants dans leur complexité physique et socio-économique. Même si cette méthode n'offre pas une simulation parfaite, faute du manque des modèles pouvant supporter tous les aspects environnementaux dans leurs variation qualitative et quantitative, elle a permis d'insister sur un aspect paysager qui a considérablement marqué le bassin versant Khat-Khatabah pendant ces dernières décennies tout en faisant intervenir tous les facteurs qui sont en relation directe avec l'expansion urbaine (Fig. 5).

Une superposition des différentes couches de données est faite afin de mieux comprendre les mécanismes qui gèrent les phénomènes hydrologiques qui peuvent accompagner des situations climatiques extrêmes. C'est dans cette optique qu'on a proposé d'estimer la réponse hydrologique à travers le calcul certains indices de pente, de compacité, coefficient de ruissellement, le temps de concentration, volume d'eau total ruisselé, Temps de montée, temps de réponse et le débit de pointe. L'examen de tous ces paramètres permettra d'identifier la nature des mécanismes sous-jacents aux problèmes hydrologiques et la meilleure façon d'y faire face. A travers une comparaison fine entre les résultats relatifs aux paramètres hydrologiques des 13 sous bassins versants au cours des années 2020 et 1985, il s'est avéré que la réponse hydrologique a été largement modifiée, surtout, au niveau des cours amont et moyen de l'oued Khat. En fait, ce sont les sous bassins versants qui ont connu une transformation paysagère à cause de l'expansion inéluctable du tissu résidentiel qui a augmenté de 150 % (et Fig. 5). Tandis que les autres bassins versants ont connu une augmentation moins prononcée de 80 %, 65 % et 40 % respectivement dans les bassins versants Khatabah, Daloua et Dhamou (Tab. 2). Il faut cependant relativiser cette responsabilité humaine étant donné que le milieu naturel en lui-même montre bien des conditions locales qui ont fait de lui un terrain très favorable à produire une réponse hydrologique très rapide, notamment lors des pluies extrêmes. On propose de faire une typologie des sous bassins selon l'origine et la dimension de la menace. C'est ainsi que les 13 sous bassins versants sont classés d'abord selon le degré de menace ensuite, ils sont classés selon les facteurs intervenants (Fig. 6). Les trois sous bassins versants les plus sensibles à la concentration des eaux de ruissellement (Kt 1, Kt 3 et Kt 4) (Fig.1), associent des facteurs d'ordre naturels et d'autres d'ordre humains. Les facteurs naturels sont essentiellement de type morpho métriques et hypsométriques. Le bassin versant de l'oued Khat englobe les sous bassins versants ayant la forme la plus ramassée et compacte de la région par rapport aux autres bassins limitrophes.

Fig. 6 (a, b, c, d, e, f) Les paramètres d'entrée de la modélisation de la réponse hydrologique des différents sous bassins versants



L'indice de compacité dans ces trois sous bassins versants sont de l'ordre de 1.34, 1.158 et 1.51 (Tab. 1). La pente globale et l'indice de pente spécifique atteignent leur valeur maximale dans les deux bassins versants (Kt 1 et Kt 3). A ces conditions physiques s'ajoute la réduction de la surface d'infiltration sur le cours moyen de l'oued Khat surtout sur les piedmonts et les glaciers, considérés autrefois secteurs privilégiés pour l'activité agricole (Figs2 et 4). A la différence de ces sous bassins versant précédemment cités, ceux des oueds Dhamou, Daloua et Khatabah montrent plus des signes de stabilité (Fig. 5). Une telle situation est prouvée par le temps de montée des eaux et le temps de concentration assez longs sont à l'origine de la réponse hydrologique lente qui se manifeste aussi par une modestie de volume d'eau ruisselé annuel et par un débit de pointe maximal parmi le plus faible entre les 13 sous bassins versants étudiés.

Tab. 1. Les caractéristiques morpho métriques et hydrologiques des sous bassins versants de la région El Majardah (Source: résultats obtenus de l'application des méthodes rationnelles)

Bassin		A Km ²	P Km	Kc	Cr %	Tc min	Tr	Tm	Q 100mm	Q _{pmax} de pointe m ³ /s
Daloua(1)	D1	18.364	19.315	1.26	66.97	30	18	39	34144.8	97.94
	D2	8.357	11.70	1.43	72.36	21	12.6	27.3	16811	63.67
	D3	52.922	45.620	1.764	69.95	143	85.8	185.9	102912.6	59.21
	Total	79.04	56.39	1.77	69.75				153262.5	
Khatabah (2)	Kb 1	57.271	32.89	1.18	56.5	70	42	91	89955.5	130.90
	Kb 2	24.189	25.09	1.44	73.4	47	28.2	61.1	49358.13	82.34
	Kb 3	51.203	36.31	1.42	65.39	129	77.4	167.7	93078.96	63.5
	Total	140.857	67.44	1.59	65				254528.6	
Dhamou(3)	Dh 1	51.331	31.99	1.42	48.54	57	34.2	74.1	69266.66	144.08
	Dh 2	7.813	12.47	1.25	23	35	21	45.5	4995.6	35.71
	Total	51.126	31.32	1.22	35.77				50683.6	
Khat(4)	Kt 1	66.809	38.48	1.34	71.31	72	43.2	93.6	132443.3	148.46
	Kt 2	34.255	31.56	1.51	73.8	61	36.6	79.3	70278.92	89.84
	Kt 3	64.291	33.16	1.158	73	60	36	78	130472.1	171.44
	Kt 4	74.143	45.70	1.51	66.65	187	112	243.1	137377.3	63.43
	Kt 5	28.546	29.09	1.65	45	126	75.6	163.8	35711.04	36.24
Total	267.164	81.22	1.39	65.95				489821.1		

A = Superficie (convertie en ha en calculant le débit); P = Périmètre; Kc = indice de compacité (coefficient de Gravelius); Dd = Densité de drainage; tc = temps de concentration ; Tr = temps de réponse, Q = volume d'eau total ruisselé; Q_{pmax} = Débit de pointe. (Source: (Manley, 1978 ; Shi, 2014; Azaiez, 2020 et 2021)

l'oued Khat (Tab.2). Dans ce cas, les crues qui pourraient survenir lors des pluies occasionnelles sont considérées des aléas tant que la vie humaine et les équipements ne sont pas en question. En termes d'estimation de danger et d'aptitude des sous bassins versants à avoir une réponse hydrologique rapide, on a essayé de superposer les cartes relatives au temps de montée des eaux, au temps de concentration et au coefficient de ruissellement pour établir une spatialisation de l'aptitude à la réponse hydrologique courte (Fig.7). Le débit de pointe maximale très élevé et la forme ramassée du sous bassin versant (Kb1) laissent les quartiers sur le cours moyen de l'oued Khatabah confrontés au risque des crues surtout que la région d'Assir enregistre une fréquence croissante des pluies potentiellement torrentielles (Azaiez *et al.*, 2020 ; Allaoua et Azaiez, 2021; Azaiez et Allaoua, 2022). Pour la finalité de cette recherche, on a opté pour une deuxième comparaison avec les résultats des recherches effectuées dans des bassins versants proximaux de l'oued Khat-Khatabah. Les résultats de calcul des paramètres hydrologiques (volume d'eau total ruisselé et débit de pointe), calculés dans les 29 sous bassins versant du bassin El Kounfoudah, ont montré une certaine similarité notamment pour les sous bassins versants ayant les mêmes conditions hypsométriques (Shi, 2014). Jusqu'à 1985 les terrasses agricoles couvrait une bonne partie de la superficie totale du bassin versant soit 16.31%. Quant à leur part en 2020, elle a considérablement baissé. Aujourd'hui, la superficie libre des terrasses effectivement agricole ne représente que 3.26%. Dans la partie aval, ces unités hydro-agricoles sont transformées en édifices à usage multiple et la vocation résidentielle vient en première place par rapport à la vocation commerciale et la vocation de divertissement (Fig.8).

Fig. 7 L'aptitude des sous bassins versants à la production d'une réponse hydrologique en 1985 (source : résultats obtenus sur la base de la modélisation appliquée pour l'année 1985)

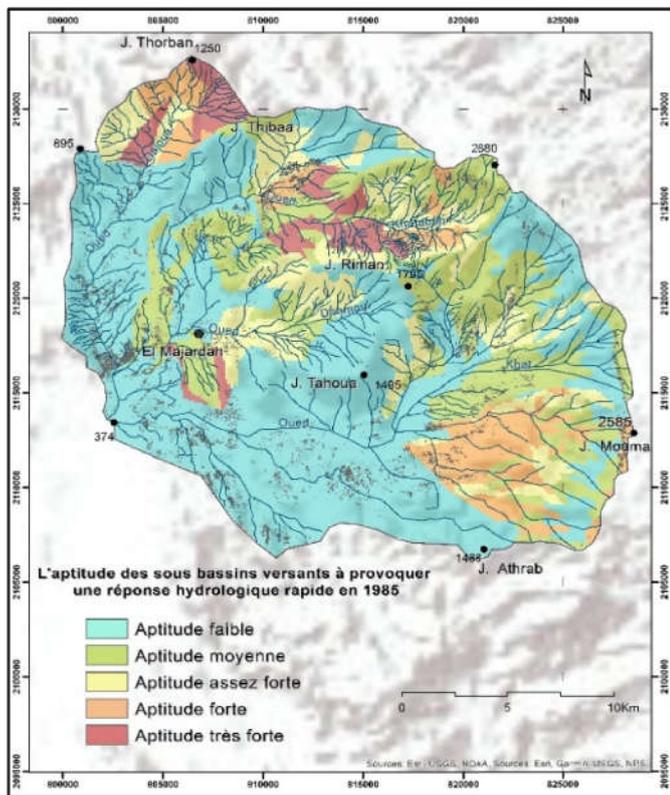
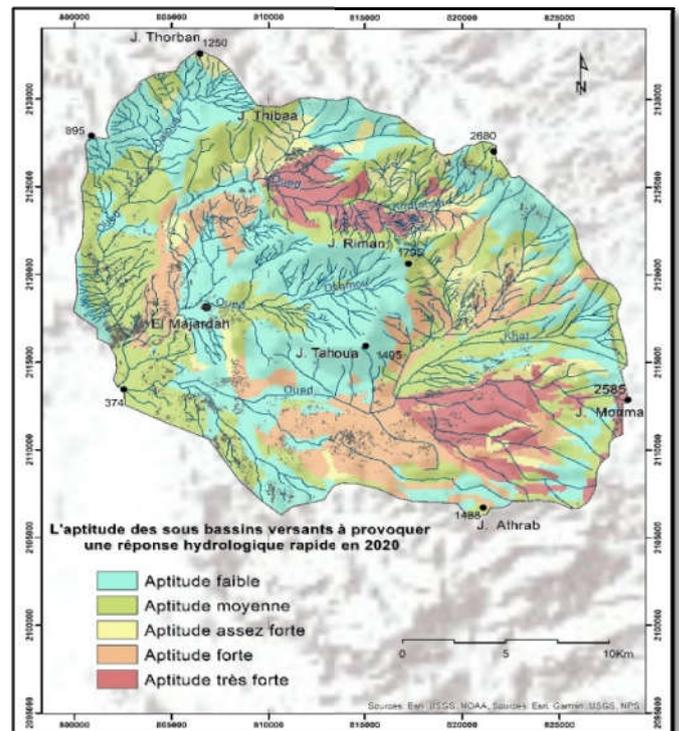


Fig. 8 L'aptitude des sous bassins versants à la production d'une réponse hydrologique en 2020 (source : résultats obtenus sur la base de la modélisation appliquée pour l'année 2020)



Sachant que les murettes des terrasses n'ont pas disparu, mais c'est la superficie qui a été directement touchée. Plus de 70 km² de terrasses agricoles se sont transformées au bout de 35 ans en terrain bâti (Tab.2).

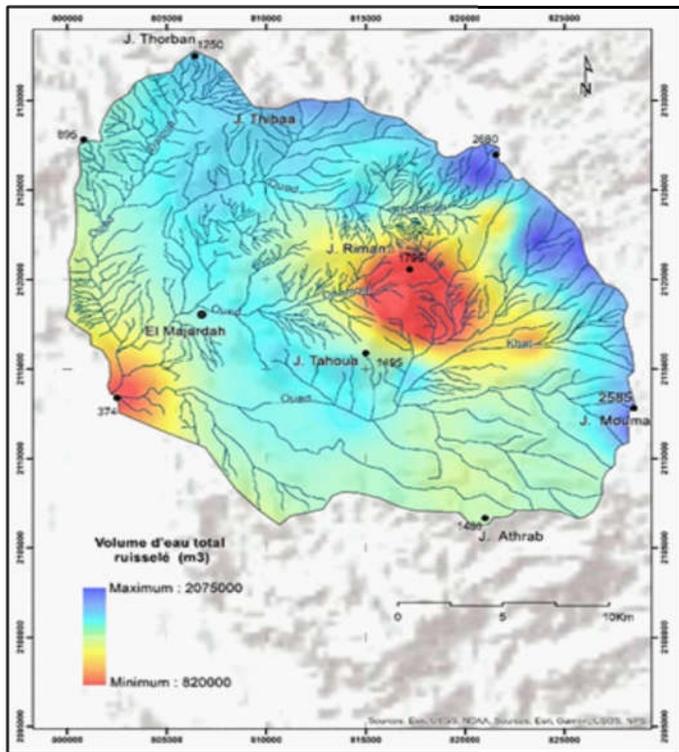
Tab. 2. Les changements d'occupation du sol entre 1985 et 2020

Années	Extension du tissu résidentiel		Extension des terrasses agricoles ancestrales	
	Km ²	%	Km ²	%
1985	21.98	4.06	88.2	16.31
2020	43.19	7.98	17.64	3.26
Total	65	12.02	17.64	3.26

Il paraît urgent de définir une stratégie participative afin de repenser cette réserve foncière qui est en danger. Une collaboration entre la communauté scientifique et les intervenants locaux demeure une nécessité. Le volume d'eau total annuel ruisselé est très variable sur le plan spatiotemporel à cause de la grande variabilité des pluies annuelles et de l'évolution des surfaces totales imperméables. Le volume d'eau ruisselé est toutefois très important au niveau des confluences des cours d'ordre 1 et 2, où il peut franchir la valeur de 2.07 millions m³. Sur le cours moyen des oueds Khat et Khatabah, il varie de 1 million m³ à 1.6 million m³ (Fig. 9). Entre les contraintes topo-climatiques et les transformations socio-économiques, les paysans de la région gardent encore les bonnes pratiques agricoles. La préservation de ces édifices reflète une ancienne planification en génie rurale et un savoir-faire agricole dans la région d'Assir. Ils forment un système compliqué et diversifié dans la région d'El Majardah. Bien qu'elles soient submergées épisodiquement, leurs sols retiennent l'humidité sur une longue période grâce au renouvellement de sédiments de charriage très fin. D'après le témoignage des paysans, le sol des hautes terrasses des montagnes Rimani et Tahoua est assez profond par rapport à celui des terrasses moyennes situées sur le cours moyen de l'oued Khat malgré que les conditions de l'écoulement sont assez fortes. Sur ces hautes

terrasses les processus de la pédogenèse l'emportent sur les processus de la morphogénèse et vice versa sur les cours moyen et aval où certaines terrasses sont confrontées à un écoulement torrentiel. Raison de plus l'amortissement des terrasses et la baisse de nivellement des murettes ont réduit davantage leur capacité de rétention en eau.

Fig. 9 Volume d'eau total ruisselé dans le bassin versant Khat-Khatabah (source : résultats obtenus sur la base de l'application des formules empiriques)



L'interprétation des images Google Earth 2020 de haute résolution montre que les terrasses les mieux préservées dans la plaine alluviale concernent les cours d'eau qui sont aménagés dans la partie amont. Ce qui a permis de briser l'énergie des eaux de ruissellement et d'assurer le contrôle l'érosion et la décantation de sédiments le long du versant. La bonne répartition des terrasses entre les trois sections du cours d'eau est conçue pour avoir un débit d'eau continu et une bonne répartition des limons de débordement entre les terrasses en amont et celles en aval.

DISCUSSION

En référant au témoignage des habitants au niveau de la confluence des oueds Khat et Khatabah, les eaux des crues sont devenues plus turbides. Ce sont les signes de rupture de l'équilibre qui amarré la région, au moins pendant trois générations. L'immense transfert des grandes quantités d'eau turbides est né de deux faits conjugués. D'une part la réduction de la superficie consacrée aux banquettes au profit de tissu résidentiel et d'autre part l'amortissement de certaines murettes suite de débordement de sédiments et l'effritement de certaines d'autre à cause de l'instabilité des versants et le manque de suivi. Il convient de noter aussi que les sous bassins versants les plus confrontés au risque de la concentration des eaux de ruissellement sont majoritairement situés dans les deux bassins versants Khat et Khatabah. Toutefois ces observations demandent une vérification sur terrain à travers des analyses sédimentologiques. De ce fait, les études hydrologiques qui ont pour objectif l'évaluation des différents paramètres du bassin versant restent relatives si les résultats ne sont pas confrontés à des mesures directes en vue d'une validation. La

comparaison des résultats n'était possible qu'avec le bassin versant de l'oued el Qunfudah juxtaposé au bassin de l'oued Khat et le bassin versant de l'oued Daloua (Fig9). La modélisation appliquée ne tient pas compte parfaitement de l'hétérogénéité des différents sous bassins versants faute de l'absence d'une carte pédologique détaillée, surtout que la zone d'étude est marquée par l'imbrication des bassins versants ruraux et d'autres urbains, sachant qu'il n'existe pas du modèle unique conçu à simuler simultanément les processus hydrologiques produits en milieux ruraux et les processus produits en milieux urbains (Fawzi *et al.*, 2015; Faddaz *et al.*, 2016). C'est pour cette raison qu'on a mené une comparaison avec les affluents de l'oued El Qunfudah, situés sur la ligne de partage des eaux de l'oued Khate. Dans ce cas le débit de pointe dans le bassin versant Khat-Khatabah varie entre 35.71 m³/s et 171.44 m³/s (Fig.6 et tab .3) comparait aux sous bassins versants de l'oued El Qunfudah où le débit de pointe est plus faible. Il varie entre 11.60 m³/s et 166.47 m³/s. (tab.3).

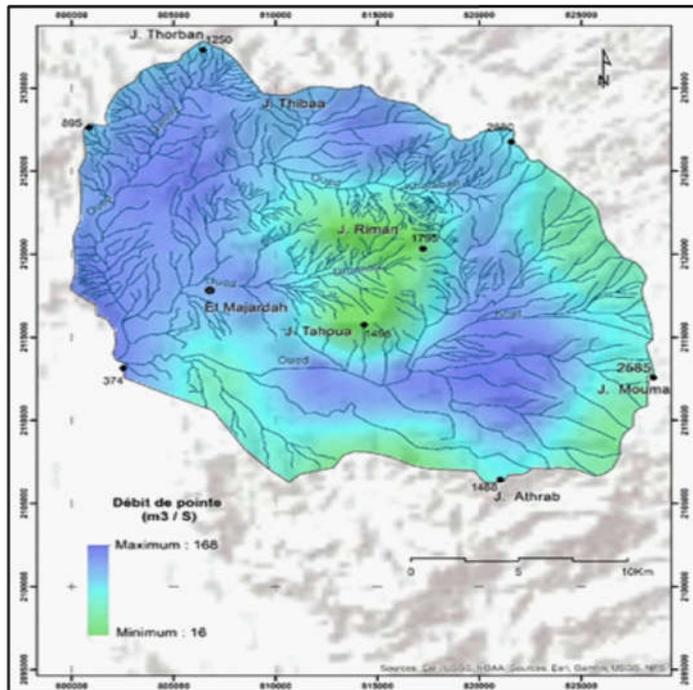
Tab. 3. Comparaison du débit de pointe avec du bassin versant bassin Khat-Khatabah avec celui d'El Qunfudah (source: Shi, Q., 2014. Flood Hazard Assessment along the Western Regions of Saudi Arabia using GIS-based Morphometry and Remote Sensing Techniques)

Bassin	Sous bassins versants	Débit de pointe			Appréciation de débit de pointe
		Méthode rationnelle Q _p m ³ /s	Modèle Noh Q _p m ³ /s	Modèle AI Soubai Q _p m ³ /s	
Khat-Khatabah	Dh ₂	35.11	20.59	***	Débit de pointe faible
	Kt ₃	171.44	169.3	***	Débit de pointe fort
El Qunfudah (Shi, Q, 2014)	Q ₁	***	11.61	158.67	Débit de pointe faible
	Q ₂	***	166.47	2856.94	Débit de pointe fort

Plusieurs méthodes ont été appliquées, raison pour laquelle les résultats n'ont toujours pas été similaires. Mais les écarts quant aux résultats obtenus par les différentes méthodes appliquées dans les deux bassins versants ne sont pas importants. Une deuxième comparaison effectuée dans le sous bassin versant Dalouah, mais cette fois-ci avec une plus grande portée, parce que la comparaison cible les résultats de jaugeage direct et les résultats d'estimation obtenus par le modèle SMHS (Spreadsheet Model of Hayami Solution) lors de l'événement pluviométrique du 16-Avril-1986 (Noor *et al.*, 2017). Le débit de pointe mesuré atteint 150.50 m³/s pendant le pic de la crue et 51.75 m³/s au moment de décroître et en moyenne 101.125 m³/s. Cette dernière valeur est très proche de la modélisation SMHS, qui est de l'ordre de 105 m³/s. Sachant que la modélisation avec la méthode rationnelle appliquée dans cette recherche a donné un débit de pointe de l'ordre de 97.94 m³/s sur le cours amont de l'oued Daloua. Ce dernier est le moins aménagé en terrasses agricoles et le moins occupé (Tab.3 et Fig. 10). C'est le bassin versant le plus proche possible de l'état naturel et de son état d'origine. La modélisation sous ArcScene, appliquée à une échelle plus fine, montre qu'à partir de 50 mm des pluies, les hautes terrasses agricoles commencent à déborder, alors que celles situées dans les plaines alluviales, elles débordent même avec 40 mm de pluies pour deux raisons. D'une part, à cause de l'amortissement des terrasses et le cumul de limons de débordement pendant plusieurs décennies. D'autre part, les sols qui sont en train de se former contre les ados en terres et contre les murettes formées en pierres sèches ont une texture limoneuse et limono-

argileuse qui semblent avoir une perméabilité d'autant plus réduite. Pourtant les aménagements hydrauliques mis en œuvre par les ancêtres apparaissent aujourd'hui très judicieux dans la collecte des eaux et la préservation des sols. Les anciens paysans ont compris que c'est à l'intérieur du bassin versant que les processus de la concentration des eaux et de la génération des débits se préparent en fonction des paramètres qui règnent

Fig. 10 Débit de pointe dans le bassin versant Khat-Khatabah (source : résultats obtenus sur la base de l'application des formules empiriques)



CONCLUSION

Cette recherche portait sur les aspects hydrologiques du bassin versant Khat-Khatabah offre une bonne occasion pour tenter de comprendre l'état fonctionnel des terrasses agricoles ancestrales. On s'est rendu compte que la tâche n'était pas facile vu que la simulation des phénomènes hydrologiques demeure complexe et variable notamment avec l'absence des mesures directes sur le terrain. Les résultats préliminaires estimant le volume total annuel d'eau ruisselée et le débit de pointe permettront de suivre prochainement une stratégie d'intervention rationnelle pour éviter les lourds impacts éventuels relatifs à l'extension urbaine incontrôlée et au gaspillage des ressources limitées en eau. Ce travail s'inscrit dans une réflexion d'ensemble pour toutes les régions montagnardes de l'Arabie Saoudite qui sont à la recherche d'une stratégie mettant en valeur les techniques ancestrales dans la maîtrise des problèmes environnementaux et la gestion durable des ressources édaphiques qui sont menacées par les changements climatiques de plus en plus accélérés (Azaiez, 2020; Azaiez, 2021). Il faut noter qu'il demeure difficile pour un géographe de mener une longue compagnie de mesures hydrologiques sur le terrain, raison pour laquelle, on a fait recours à des procédures itératives des modèles empiriques, déjà vérifiées par d'autres hydrauliciens qui avaient travaillé sur différents types de bassins versants (Azaiez, 2020; Azaiez, 2021). Pour avoir une vision complète et afin d'envisager d'autres faits sur le fonctionnement de ces terrasses au fil de temps, il semble nécessaire de faire des prélèvements et des sondages à différents emplacements de versant. A travers les traceurs sédimentologiques, polliniques ainsi que le reste des industries humaines, il sera possible de suivre l'évolution paysagère en fonction des modes d'occupation du sol et

pour être préventif de ne pas avancer des hypothèses sur la première mise en place de ces terrasses agricoles. En effet, les conditions hydrologiques du bassin versant Khat-Khatabah sont encore gérable, surtout en présence d'un couvert végétal formé par le *Tamarix*, le *Salvadora persica* et le *Ziziphus spina-christi* qui assurent un rôle considérable contre la concentration des eaux des pluies. La situation peut prendre des dimensions beaucoup plus importantes et de plus en plus inquiétante si le tissu urbain continuera à gagner en importance aux dépens des terrasses agricoles. Une grande question qui se pose à propos ces constructions agricoles, si elles sont encore à l'épreuve des contrastes climatiques qui sont en cours.

Funding

The authors are funded through the General Research Project from the Deanship of Scientific Research at King Khalid University under research grant number (GRP/228/43)

Acknowledgements

The authors want to extend their appreciation and their gratitude to the Deanship of Scientific Research at King Khalid University Saudi Arabia for providing administrative and technical support and for funding this work through General Research Project under grant number (GRP/228/43).

REFERENCES

- Alsubih, M., Mallick, J., Talukdar, S. et al., 2021. An investigation of the short-term meteorological drought variability over Asir Region of Saudi Arabia. *Theor Appl Climatol* 145, 597–617 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03647-4>
- Ansar, A et Azaiez, N. 2021. Mapping of flood zones in urban areas through a hydro-climatic approach: the case of the city of Abha, *Earth Science Research Journal*, DOI:10.5539/esr.v10n2p1
- Azaiez, N. Ansar, A. 2022. Le risque d'inondation dans le quartier d'El Mensek: de l'aléa morpho-hydro-météorologique au risque résiduel d'ordre socio-naturel (Abha, Arabie Saoudite), *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism* Vol. 6 Nr. 4 2021 ISSN: 2588-1760, <https://www.aneau.org/ajeau/>
- Azaiez, N., Baazaoui, N., Blel, I.F. et al. 2021. Contribution of the adjusted empirical analysis of the RSULE and FAO models in the estimation of soil losses in the watershed of Wadi El Hayat (Saudi Arabia). *Arab J Geosci* 14, 2185 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08561-7>
- Azaiez, N. 2021 (b). Evaluation of the functioning of the urban agricultural terraces system through the isotopic tracers of Cesium 137 at the level of the AL Arin -Graiguer meander: middle course of the wadi Abha (Southwestern Saudi Arabia), *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*, <http://journalijisr.com/issue/evaluation-functioning-urban-agricultural-terraces-system-through-isotopic-tracers-cesium-137>.
- Azaiez, N., 2020. Modelling the Soil Loss in the Watershed of the Chaddad Wadi in terms of Both Rockiness and Soil Slaking Indexes. *International Journal of Geosciences*, 11, 100-124. <https://doi.org/10.4236/ijg.2020.113007>
- Azaiez, N., Alleoua, A., 2021. Estimation de la Perte en sol par L'application du Modèle EPM « ErosionPotentialMethod» Cas du Bassin Versant de l'oued El Hroub (Jizān, Arabie Saoudite), *European Journal of Scientific Research* 159 (N° 3) :81-103
- Azaiez, N., 2020. Soil erosion measurement using fallout cesium¹³⁷ technique in Sidi Salah basin (Eastern Central Tunisia), *GeoProgress Journal*, vol. 7, i. 1, 2020, Geoprogress, p11-35.

- Azaiez, N. Ansar, A. Baazaoui, N., & Qhtani, N. 2020.** Assessment of Soil Loss in the Mirabah Basin: An Overview of the Potential of Agricultural Terraces as Ancestral Practices (Saudi Arabia). *Open Journal of Soil Science*, 10, 159-180. <https://doi.org/10.4236/ojss.2020.105008>
- Blond N., Jacob-Rousseau N., Callot Y. 2018.** "Terrasses alluviales et terrasses agricoles. Première approche des comblements sédimentaires et de leurs aménagements agricoles depuis 5000 avant notre ère à Wakarida (Éthiopie)", *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol.24, No.3, 277-300 DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12258>.
- Bonvallot, J., 1986.** Tabias et jessour du Sud tunisien Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, n° 2, 1986: 163-171.
- Faddaz, E., Jamal-Uddeen, S., & Elhassan, E., 2016.** Flood hazards in an urbanizing watershed in Riyadh, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 702720, 701-720.
- Fawzi, M. et Adamowski, J., 2015.** Interfacing the geographic information system, remote sensing, and the soil conservation service-curve number method to estimate curve number and runoff volume in the Asir region of Saudi Arabia, *Arabian journal Of Geosciences*, 8, pp11093-11105.
- Labbas, .M, 2015.** Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : Application au bassin de l'Yzeron (130 km²). *Sciences de la Terre*. Université Grenoble Alpes, 2015.
- Manley, R. E., 1978.** Simulation of flows in ungauged basins/ Simulation d'écoulement sur les bassins versants non jaugés, *Hydrological Sciences Journal*, 23,1, 3, 85-101, DOI : 10.1080/02626667809491772
- Nasri, S., 2002.** Impact hydrologique des banquettes sur les apports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie, INGREFF, in *Bulletin Réseau Erosion* n° 21, pp 115-129.
- Noor, K. et Elfeki. Q.M., 2017.** Development of a generalized Hayami solution for modelling of a diffusive flood wave in arid and non-arid regions, *Nat Hazards* (2017) 88:121–144 DOI 10.1007/s11069-017-2859-6.
- Pietsch D. et Mabit L, 2012.** – Terrace soils in the Yemen Highlands: Using physical, chemical and radiometric data to assess their suitability for agriculture and their vulnerability to degradation. *Geoderma*, 185-186, 48-60. DOI: [10.1016/j.geoderma.2012.03.07](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.07)
- Perrin, Ch., 2000.** Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit. *Hydrologie*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2000.
- Shi, Q., 2014.** Flood Hazard Assessment along the Western Regions of Saudi Arabia using GIS-based Morphometry and Remote Sensing Techniques. KAUST Research Repository. <https://doi.org/10.25781/KAUST-24QM9>
- Subyani, A. 2010.** Hydrologic behavior and flood probability for selected arid basins in Makkah area, western Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-009-0098-1>
