



## **TYOLOGIE DES CRUES EN ZONE MONTAGNEUSE, OCEANIQUE ET SEMI ARIDE. LE CAS DU BASSIN VERSANT DU KSOB (HAUT ATLAS OCCIDENTAL, MAROC)**

**BAIDDAH A.<sup>1</sup>, SAIDI M. E.<sup>1</sup>, DAOUDI L.<sup>1</sup>, EL MIMOUNI A.<sup>1</sup>, SMAIJ Z.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques,  
B.P 549, Marrakech, Maroc.

<sup>2</sup>Laboratoire Géostructures, géomatériaux et ressources hydriques, Faculté des  
Sciences, Marrakech

baiddahabdeslam@gmail.com

### **RESUME**

Le bassin versant du Ksob à Adamna est un hydrosystème du Haut-Atlas occidental de 1483 km<sup>2</sup> de superficie. Les précipitations sont, dans l'ensemble, conformes au milieu semi aride avec des hauteurs moyennes annuelles de 305 mm. A l'exutoire, l'écoulement superficiel est en moyenne de l'ordre de 24 mm par an (1,13 m<sup>3</sup>/s). Cependant les crues de l'oued sont assez violentes. Leurs temps de montée sont assez courts et les débits de pointes très élevés. Les hydrogrammes de crues sont souvent aigues témoignant de la brièveté et la puissance des événements. Les crues du Ksob sont également assez fréquentes. Bien qu'avec des intensités variables, les pulsations brutales de l'oued surviennent souvent en apportant leurs lots de charge solide et de dégâts infrastructurels. Ce constat a incité à définir et entreprendre des aménagements hydrauliques adéquats en aval du bassin pour parer aux conséquences de ces crues sur le milieu naturel en général.

**Mots clés :** crues, érosion, semi-aride, bassin versant, oued ksob, aménagement

### **ABSTRACT**

The watershed of Ksob to Adamna is a hydrosystem of western High Atlas of 1483 km<sup>2</sup> of surface. The main river which flows towards the Atlantic Ocean into the direction SE-NW is formed by the junction of two big tributaries of Zelten and Igrounzar. The pluviometric regime is characterized by a rainy season marked well from October to April. But the precipitations are, in

general, conform , altogether, in the semi arid area by their annual heights which do not exceed on average 305 mm. The superficial flow is also rather low. it is in average of the order of 24 mm a year (1,13 m<sup>3</sup>/s). However the extreme flows are particularly raised and the floods of the river are rather violent. They are characterized by time of rises rather short and debits of very high points for a catchment of 1483 km<sup>2</sup> and a module of 1,2 m<sup>3</sup>/s. the Hydrograms of floods are often aigues testifying of the brevity and the power of the events. The floods of Ksob have also drew the attention by their high frequencies; the brutal pulsations of the stream arise almost every year by bringing their lots of solid load and infrastructure damage. This observation incited to define and to undertake adequat hydraulic scheme in downstream watershed to counter the consequences of floods on the environment in general.

**Key words** : flash floods, erosion, Semi-arid, Watershed area, Ksob River, management

## INTRODUCTION

L'étude dynamique et statistiques des crues du bassin versant du Ksob a pour objectifs globaux leur classification, l'estimation des risques des inondations et leurs enjeux socio-économiques et rechercher les aménagements les plus adaptés pour atténuer leurs impacts à l'échelle du bassin versant. Ceci passe par une étude préalable de la physiographie et de l'apport pluvial du bassin versant ainsi que celle du régime de l'écoulement du cours d'eau.

L'aspect extrême de cet écoulement, à savoir les événements de crues, retiendra particulièrement notre attention. Il constituera l'axe principal de l'étude pour aboutir à une typologie des crues en milieu montagnard semi-aride à caractères océaniques ; et pouvoir définir des crues de référence afin de proposer des scénarios de protection contre les crues éclairs et d'évaluer la pertinence économique des aménagements. Car la ville d'Essaouira et son extension vers le sud, occupent une place importante dans la stratégie de développement économique et touristique du Maroc. Ainsi, plusieurs actions, qui s'inscrivent dans le plan d'aménagement de la ville, ont vu le jour. Mais les enjeux que représentent ces aménagements nécessitent de mettre en place les actions nécessaires pour faire face aux aléas naturels, principalement les inondations.

Ces inondations sont liées principalement au problème des débordements des fortes crues de l'oued Ksob qui longe la ville d'Essaouira. Il draine un bassin versant d'environ 1750 km<sup>2</sup> à l'embouchure et provient de la confluence de deux grands affluents : l'Igrounzar au nord et le Zelten au sud.

A l'état naturel, l'oued Ksob emprunte son lit principal pour atteindre l'embouchure en mer ; mais en cas de crues importantes et de conditions aval défavorables (marée haute, ensablement, obstacles artificiels ...), les eaux de l'oued empruntent aussi un ancien bras qui est actuellement parcouru par une

piste reliant Essaouira à un village touristique plus au sud. Ce sont les eaux qui transitent par ce bras qui causent l'inondation de certaines parties de la ville d'Essaouira. La récurrence des crues de l'oued Ksob ainsi que les dégâts causés incitent donc à l'élaboration d'un ou de plusieurs schémas d'aménagement qui garantissent la sécurité de la population riveraine et les futurs projets de développement de la zone.

## **CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET CLIMATIQUE**

### **Esquisse géomorphologique et climatique de la zone d'étude**

Le bassin versant de l'oued Ksob à la station d'Adamna est une entité hydrographique située entre les latitudes 31° 2' et 31° 30' Nord et entre les longitudes 9° et 9°46' Ouest et son embouchure est située à une vingtaine de kilomètre au Sud-est de la ville d'Essaouira (Fig. 1).



**Figure 1** : Situation géographique du bassin du Ksob

Le bassin est vaste de 1483 km<sup>2</sup> pour un périmètre de 180 km, ce qui lui confère un indice de compacité de l'ordre de 1,3. La partie amont est composée de deux sous bassins juxtaposés : celui d'Igrounzar (825 km<sup>2</sup>) et celui de Zelten (423 km<sup>2</sup>).

L'oued principal s'étend depuis sa source sur une longueur de 120 km. Ses deux principaux affluents précités drainent les eaux de ruissellement d'une cuvette synclinale et du versant nord du Haut Atlas occidental, sur des distances respectives de 77 et 55 km, avant de déboucher sur la plaine d'Essaouira et traverser des dunes dressées aux portes de la ville. Le réseau hydrographique du bassin versant, très développé et ramifié en amont, l'est moins en aval de la confluence des deux affluents (Fig. 2). Dans cette zone, le bassin n'est drainé que par des affluents courts et souvent à sec avec des substratums constitués de calcaires ou de grés dunaires favorisant l'infiltration.



**Figure 2 :** Hydrographie et subdivisions du bassin versant du Ksob

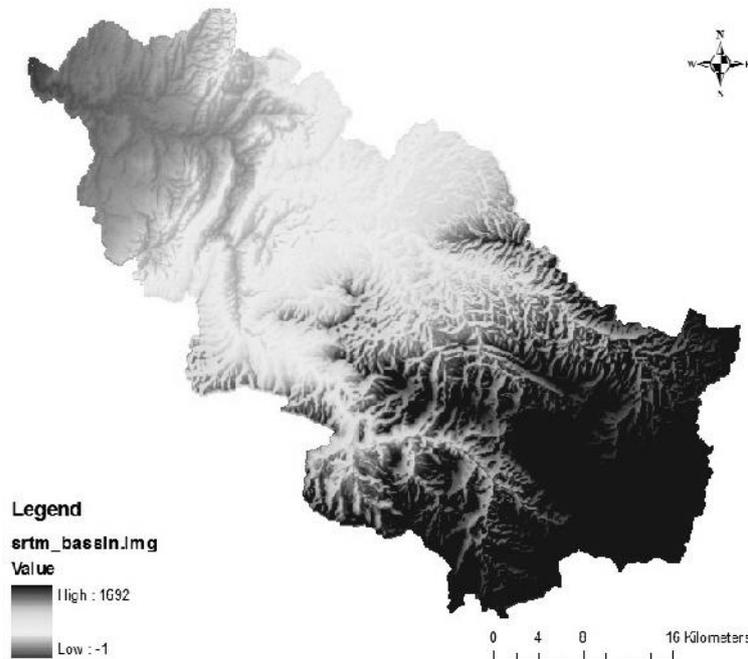
Sur le plan climatique, le caractère insulaire de la ville d'Essaouira et du littoral voisin diminue les amplitudes thermiques entre les maxima et les minima. Ainsi, la température maximale moyenne enregistrée au mois de juillet est de l'ordre de 21,7 °C, tandis que la moyenne des minima est de 11°C en janvier. Plus à l'intérieur du bassin, au niveau de la station d'Igrounzar, le climat est plus continental, avec des températures mensuelles variant de 11 à 27,2 °C, et une moyenne de 19,1°C.

Les mesures de l'évaporation au niveau de cette station ont donné une hauteur de 2391 mm par an avec le bac Colorado, et une hauteur de 2178 mm à l'aide de l'évaporimètre de Piche. Par ailleurs, la région est soumise à des vents importants qui proviennent principalement du Nord. Ces vents soufflent d'une façon plus violente en été, entre les mois de mai et août. Leur vitesse moyenne annuelle est de l'ordre de 2,2 m/s, mais elle peut atteindre 2,6 m/s en saison estivale. Quant à l'humidité relative, elle varie à Essaouira d'une moyenne mensuelle de 46 % à 14 heures à une moyenne mensuelle de 80 % à 7 heures.

L'environnement climatique est donc dans l'ensemble océanique semi-aride, avec quelques caractères continentaux en amont du bassin versant.

Sur le plan phytogéographique, le bassin versant est caractérisé par une couverture végétale diversifiée et principalement arborescente (surtout sur le sous bassin du Zelten). Elle est dominée par des formations d'arganier et de thuya qui couvrent les terrains de moyennes altitudes ; des formations de chêne vert qui occupent de petites surfaces sur les sommets du Haut Atlas ; du jujubier et des Acacias Gummifera qui couvrent la partie Est du bassin versant et un peuplement de genévrier de Phénicie qui s'étale sur la façade Atlantique (ONEM, 1996).

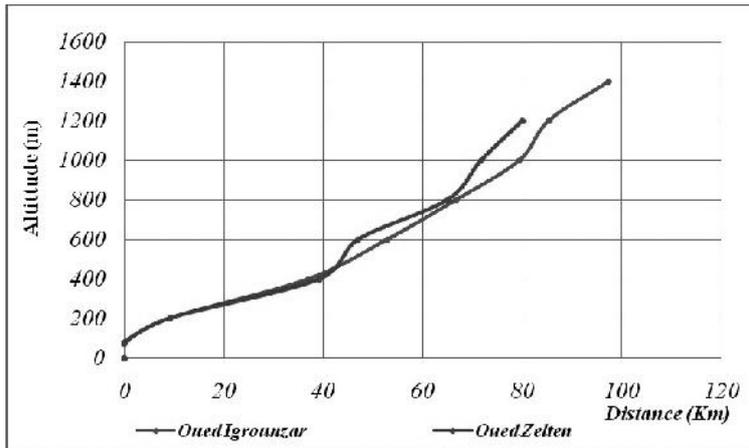
Sur le plan topographique, les altitudes varient de 70 m à l'exutoire d'Adamna, jusqu'au point culminant à 1694 m d'altitude. 89 % du bassin versant sont situés en dessous de 1200 m, avec une prédominance des terrains ayant des côtes comprises entre 400 et 1000 m (60 %). L'altitude moyenne est de l'ordre de 725 m (Fig. 3).



**Figure 3** : Carte hypsométrique du bassin versant du Ksob

Ce relief qui n'est pas particulièrement marqué, agit sur les pentes du bassin versant qui ne sont pas très élevées. Hormis les hauts reliefs en amont du bassin où elles peuvent dépasser sur des secteurs réduits 50 %, les autres versants et les vallées ont des pentes inférieures à 5 % et même à 1 % en aval.

Les profils en long des cours d'eau confirment la douceur de pentes (Fig. 4). Les cours d'eau principaux coulent avec des pentes souvent inférieures à 2 %. Le Zelten est toutefois plus penté que l'Igrounzar avant qu'ils se rejoignent et former le ksob avec une pente plus faible (0,8 %).

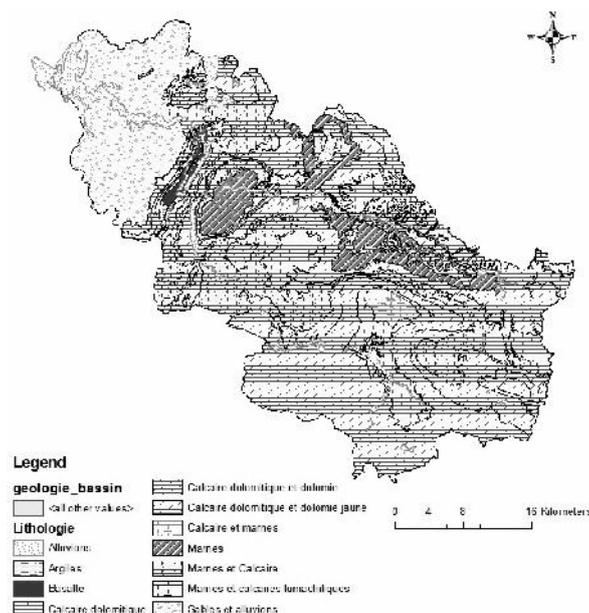


**Figure 4** : Profils en long des principaux affluents

### Géologie et hydrogéologie

Le bassin versant de l’oued Ksob est constitué d’une partie amont appartenant aux formations montagneuses du Haut Atlas occidental et d’une partie aval dominée par la plaine d’Essaouira.

Du point de vue lithologique, la figure 5, déduite des cartes géologiques au 1/50 000 d’Essaouira et de Khemis Meskala et des prospections sur le terrain, montre que la partie nord-est du bassin versant de l’oued Ksob (sous bassin d’Igrounzar), est composée essentiellement de formations de marnes et de marno-calcaires, respectivement cénomaniens et sénoniens, sur lesquels le ruissellement est intense. Vers le centre du bassin l’oued coule sur des calcaires turoniens assez fissurés pour permettre l’infiltration d’une quantité d’eau non négligeable (Rey et al., 1988; Ettachfani, 1992; Içame, 1994). La formation turonienne dite d’Agadir, d’une puissance de 60 m, correspond à des bancs de calcaires fins riches en silex, surmontés par des calcaires dolomitiques et des dolomies massives. C’est le niveau le plus fissuré et karstifié. Il alimente la majorité des sources de la région et surtout celles de l’oued Igrounzar au sud de Kourimat (Bahir et al, 2001 ; 2008).



**Figure 5** : Carte lithologique du bassin versant

La partie méridionale (sous bassin de Zelten) est composée de séries aux structures plus compliquées qui font affleurer le Jurassique supérieur (Ettachfani, 1992). Ces formations sont en majeure partie constituées par des formations plutôt étanches (argiles et marnes) où le ruissellement est plus intense (El Mimouni et al, 2005). Enfin, en aval de la confluence, les formations dunaires consolidées et mobiles du Quaternaire occupent le secteur d'Adamna où les eaux s'infiltrent plus rapidement comme dans les alluvions du lit de l'oued (Fig. 5).

Sur le plan tectonique, l'histoire du bassin du Haut Atlas occidental dont fait partie le bassin versant du Ksob est complexe. La morphologie actuelle de ce bassin est le résultat combiné de l'orogénèse atlasique avec des directions de raccourcissement N120 à N140 et de la tectonique salifère qui est une des particularités morpho-tectonique de ce bassin. Le bassin du Ksob forme ainsi une vaste zone synclinale ouverte sur l'océan limitée entre les deux anticlinaux du jbel amesitten au sud et du jbel hadid au nord. Cette zone synclinale est affectée d'ondulations et d'accidents qui permettent d'y distinguer plusieurs unités morphologiques (Medina, 1983; Souid, 1984; Amghar, 1995).

Sur le plan hydrogéologique, le bassin du Ksob comporte de nombreux niveaux aquifères dans les formations calcaires, gréseuses et alluviales. Les formations gréseuses du pliocène et calcaires du Cénomano-turonien sont les principaux réservoirs reconnus comme aquifères au niveau du synclinal d'Essaouira. Ce synclinal se présente comme une unité hydrogéologique bien individualisée

ayant une superficie de l'ordre de 320 km<sup>2</sup>. L'alimentation en eau de ces aquifères provient des infiltrations dues aux précipitations directes. Pour une pluviométrie moyenne d'environ 300 mm par an et un coefficient d'infiltration de 10%, la quantité d'eau infiltrée sur ce plateau est estimée à 1,5 millions de mètre-cubes par an, ce qui représente environ 0.7 l/s par Km<sup>2</sup> (Laftouhi, 2002). La circulation des eaux souterraines est dans l'ensemble du type karstique. La majeure partie des eaux infiltrées s'enfonce profondément par des cheminements karstiques difficilement décelables et gagne le niveau du Jurassique supérieur qui s'abouche à l'océan (Jalal, 2001).

La nappe du plio-quadernaire possède en général des caractéristiques hydrodynamiques médiocres sauf dans les bordures de l'oued ksob. A ce niveau la présence probable de chenaux souterrains permet d'obtenir des productivités importantes. Toutefois et compte tenu de la liaison hydraulique étroite existante entre l'oued et la nappe phréatique mise en évidence par de nombreuses campagnes de jaugeages différentiels (DPEE, 1987), les débits unitaires produits par les ouvrages interceptant ces chenaux fluctuent énormément selon les saisons. Cette forte dépendance des écoulements de l'oued est à l'origine des baisses de la production des puits.

Sur le plan de la corrélation entre les pluies et les niveaux piézométriques, une série de piézomètres gérés par l'ABHT ont montré une liaison claire entre la diminution des hauteurs des pluies et la baisse des niveaux des ressources en eau souterraines ; tout comme l'impact positive et immédiate des années humides sur la hausse des niveaux piézométriques (cas de l'année 1995-1996). Ces réponses hydrogéologiques instantanées sont liées au caractère karstique des aquifères, ce qui renseigne sur leur vulnérabilité aussi bien à la recharge qu'à la décharge au niveau des sources (Laftouhi et Persoons, 2007).

### **Régime pluvial et fluvial**

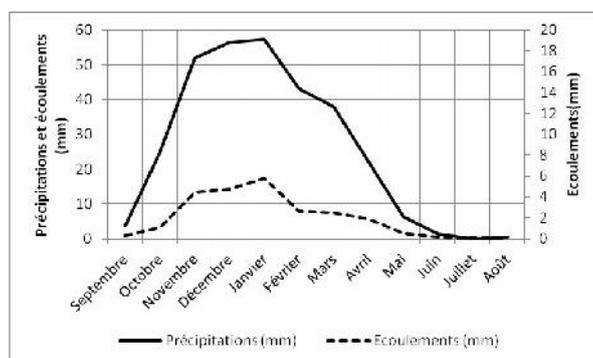
L'étude des précipitations et des écoulements sur trois niveaux du bassin versant s'est effectuée sur une période de 32 ans de 1977 à 2009. Ces données hydro-climatiques ont été fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Marrakech. C'est une administration publique qui gère les stations hydrologiques en assurant, entre autre, les mesures hydrométriques et pluviométriques et leur archivage.

Les hauteurs de précipitations sont mesurées aux niveaux des stations d'Adamna et Igrounzar. La station d'Adamna contrôle un bassin versant de 1483 Km<sup>2</sup> de surface. Elle sert aussi de station hydrométrique pour jauger le cours d'eau du Ksob. La station d'Igrounzar est l'exutoire du sous bassin versant du même nom, et qui couvre une superficie de 825 Km<sup>2</sup>. A ces stations hydro-pluviométriques s'ajoute la station hydrométrique de Zelten qui clôture un autre sous-bassin de 423 Km<sup>2</sup>.

L'analyse de la variation des précipitations et des écoulements mensuels a permis de cerner le régime pluvial et fluvial des bassins versants à l'échelle

annuelle. Le cours d'eau de Zelten écoule un débit moyen annuel de l'ordre de 0,45 m<sup>3</sup>/s, qui correspond à une lame d'eau de 33,6 mm pour une hauteur de précipitations de 296 mm. Soit un coefficient d'écoulement de 11,4 %. Sur le sous bassin voisin d'Igrounzar l'écoulement annuel est de l'ordre de 15,3 mm pour une même hauteur des précipitations de 296 mm. Soit un coefficient d'écoulement de 5,19 %. Plus en aval, le bassin du Ksob à Adamna reçoit en moyenne une hauteur de précipitations de 305,5 mm et l'écoulement qui en découle est de l'ordre de 24,2 mm (un débit moyen de 1,13 m<sup>3</sup>/s). Soit un coefficient d'écoulement de 7,9 %. Ce sont des taux de ruissellement assez faibles, mais conformes aux milieux arides et semi arides. Outre l'infiltration active, surtout dans le sous bassin d'Igrounzar, cette faiblesse des taux d'écoulements est aussi due aux fortes évapotranspirations constatées sous les latitudes présahariennes (Saidi, 1995 ; 2006).

La figure 6 montre un régime hydro-pluviométrique monogénique, avec une saison des hautes eaux du mois de novembre au mois de mars ; et une saison de basses eaux du mois d'avril au mois d'octobre. Les débits sont essentiellement conditionnés par les précipitations pluviales. Le bassin étant dépourvu des hautes altitudes qui peuvent accueillir des neiges importantes. Le régime est alors océanique pluvial à haute eaux d'automne – hiver.



**Figure 6** : Variations mensuelles des précipitations et des écoulements à Adamna (1977-2009)

## LES CRUES DE L'OUED KSOB

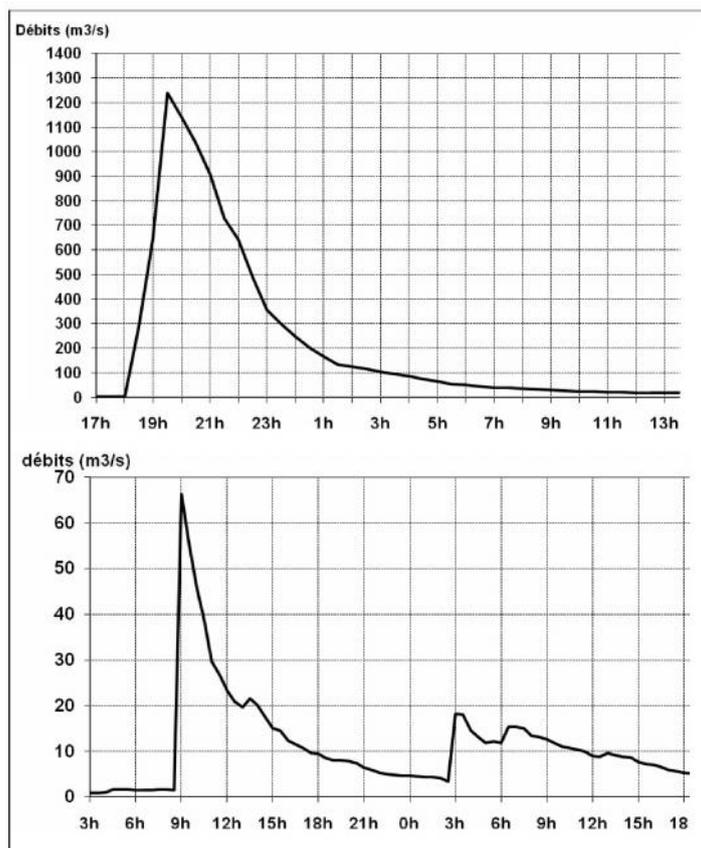
Les crues de l'oued Ksob sont toujours provoquées par de fortes pluies, principalement d'automne et d'hiver. Elles sont exclusivement d'origine pluviale. Ces pluies intenses sont couplées à une morphologie générale et une lithologie propices au développement de fortes crues, notamment des substratums peu perméables (cas du sous bassin de Zelten) et un couvert végétal clairsemé et très peu développé (cas du sous bassin d'Igrounzar par exemple).

### **Les crues dans l'année hydrologique :**

Pour cerner les moments d'occurrence des crues de l'oued Ksob, nous avons analysé un échantillon de 36 événements de crues aux stations d'Igrounzar et d'Adamna et un échantillon de 30 crues à la station de Zelten. L'étude des périodes d'occurrence de ces crues a révélé qu'elles surviennent essentiellement du mois d'octobre au mois de mars. Ce semestre connaît le passage de 88 % des crues annuelles à la station d'Adamna, 85 % à la station d'Igrounzar et même 94 % à la station de Zelten. Cette saison connaît des perturbations océaniques, lorsque des dépressions atmosphériques sont centrées au large du Maroc et dirigent des fronts froids pluvieux vers le pays. Quant à la saison chaude, elle est caractérisée par l'installation de l'anticyclone des Açores au large du Maroc, ce qui empêche la formation de perturbations humides. Par ailleurs, les violents phénomènes orageux d'été, fréquents en haute montagne marocaine (L. Daoudi et al, 2008), ne se rencontrent pas en ce milieu océanique.

### **Typologie des hydrogrammes de crues :**

Les durées des crues du Ksob sont assez variables. Elles peuvent aussi bien être courtes (4 à 10 heures) que longues (plus de 60 heures). Mais les durées les plus fréquentes sont de 10 à 40 heures (57 % à Adamna). Ce sont des temps de base plutôt courts car la crue peut passer dans la journée ou s'étaler au maximum sur deux journées. Les hydrogrammes s'en trouvent sous forme aigues (Fig. 7) ; ce qui témoigne de la brièveté des événements.



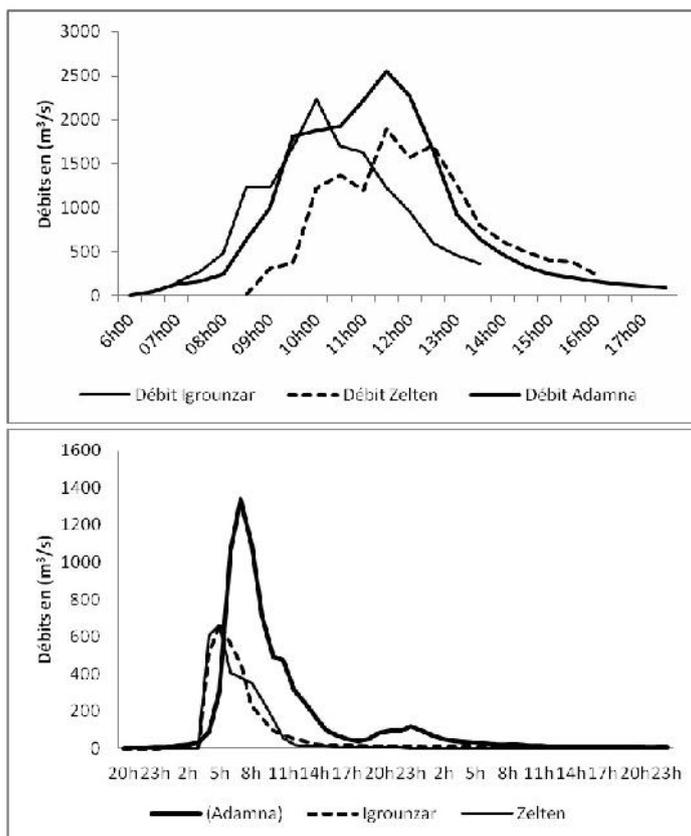
**Figure 7** : Hydrogrammes des crues du 24 décembre 2001 et du 26 novembre 1989 à Adamna

Par ailleurs, nous avons constaté que les temps de montée des crues sont particulièrement courts. La montée peut durer une heure ou une heure et demi seulement comme pour la crue du 24 décembre 2001 et même une demi-heure comme ce fût le cas lors de la petite crue du 26 novembre 1989 (Fig. 7). Et d'une façon générale, 63 % des crues inventoriées à l'exutoire du bassin (Adamna) ont eu des temps de montée inférieurs à 10 heures. Ces durées, relativement courts, peuvent provoquer un effet de surprise en aval du bassin, notamment pour la ville d'Essaouira et ses quartiers sud, proches du cours d'eau. Plusieurs crues ont rapidement inondé les lits majeurs de l'oued et les plaines avoisinantes, et ont incisé de nouveaux parcours plus proches d'Essaouira.

La crue du 29 novembre 2005 par exemple (Fig. 8) fût une crue exceptionnelle avec des débits de pointe de l'ordre de 2234 m<sup>3</sup>/s et 1900 m<sup>3</sup>/s respectivement à Igrounzar et à Zelten et même 2550 m<sup>3</sup>/s à Adamna. La crue n'a duré que 6 à 7 heures au niveau des deux stations amont et 11 heures et demi au niveau de la

station aval, pour un volume d'eau évacué de l'ordre de 36 millions des mètre-cubes. Les temps de montée étaient assez courts, et ont varié entre 3 et 5 heures et demi. Ce genre de crue de courte durée et de très fort débit de pointe et de volume d'eau constitue un risque majeur pour les dégâts occasionnés.

Par ailleurs, nous avons constaté que les pointes de crues enregistrées à Igrounzar mettent une à deux heures pour atteindre Adamna (Fig. 8). Soit des vitesses de propagation de 11,5 à 23 km par heure ; c'est à dire des vitesses de 3,2 à 6,4 mètres par secondes. Un constat similaire entre Zelten et Adamna révèle des vitesses de propagations variant de 1,6 à 6,3 mètres par secondes. Ce sont donc des vitesses assez importantes qui résultent des conditions géomorphologiques et pluviométriques précitées. Elles confirment la présence de risques hydrologiques et de dangers auxquels il faut accorder le plus grand intérêt et la plus grande prudence.



**Figure 8 :** Hydrogrammes des crues du 7 janvier 1985 et du 29 décembre 2005 aux stations d'Adamna, d'Igrounzar et de Zelten

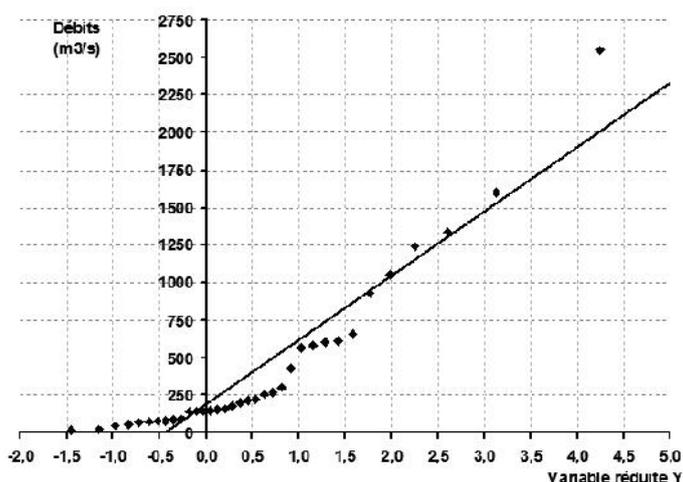
### Fréquences et analyse statistique des crues du Ksob

Nous disposons au départ, d'une série de crues observées à chaque station de mesure (fournie par l'Agence de Bassin Hydraulique de Marrakech), et nous avons soumis cet échantillon à un traitement statistique qui aboutit à la probabilité d'occurrence d'un événement donné ou à sa durée de retour.

L'ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ksob à Adamna a montré une adéquation satisfaisante (Fig. 9) ; ce qui nous autorise à utiliser cette loi pour estimer les probabilités d'occurrence des crues et leurs périodes de retour (Tab. 1).

**Tableau 1** : Estimation des débits de crues et leurs périodes de retour de l'oued Ksob à Adamna

Probabilité d'occurrence (%)	50	20	10	4	2	1	0,2
Période de retour (ans)	2	5	10	25	50	100	500
Débit de pointe (m3/s)	347	832	1154	1560	1862	2161	2851



**Figure 9** : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ksob à Adamna

Ce test statistique a permis de constater que les crues du Ksob sont assez puissantes pour la superficie drainée et pour un milieu semi aride. Une pointe de 500 m³/s par exemple, et qui correspond à 400 fois le module moyen, se produirait tous les trois ans et même une pointe de 1000 m³/s reviendrait tous les 7 ans.

Par ailleurs, le coefficient de gravité de Pardé ( $A = Q_p / S$ , ou  $Q_p$  est le débit de

pointe et S la surface du bassin), met en relief le caractère violent des crues du Ksob. Le coefficient de gravité de la crue décennale par exemple est de l'ordre de 30. C'est une valeur très élevée et similaire aux coefficients observés pour les grands torrents du monde (M. Pardé, 1964).

## AMENAGEMENTS DE PROTECTION

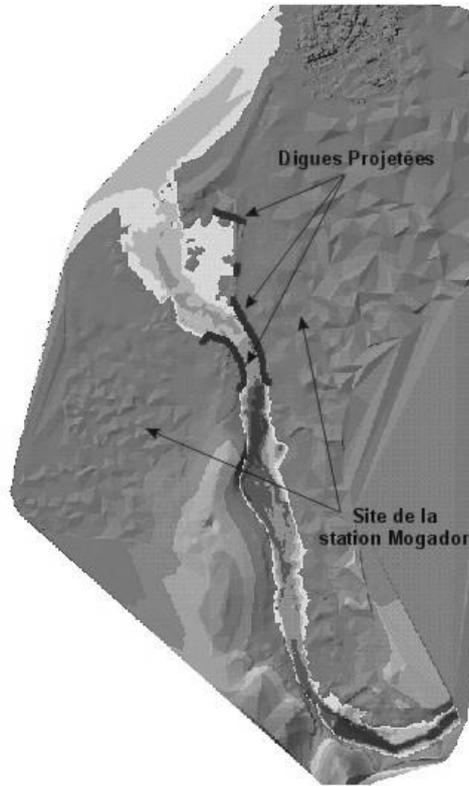
Plusieurs aménagements, qui s'inscrivent dans le plan d'aménagement de la ville d'Essaouira, ont vu le jour ou sont programmés afin d'accompagner les changements socio-économiques de la ville (ABHT, 2006). Les enjeux que représentent ces aménagements nécessitent de mettre en place les actions nécessaires pour faire face aux aléas naturels, principalement les inondations relatifs aux crues de l'oued Ksob. Cependant, la mise en œuvre de ces projets, destinés à la protection de la ville contre les inondations de l'oued, se confronte à de nombreuses contraintes liées essentiellement au milieu naturel et au régime d'écoulement du cours d'eau. Parmi ces contraintes, la texture sablonneuse du sol sur une profondeur importante qui compromet la stabilité des aménagements projetés, la rareté des matériaux de construction (gabions, roches...) et l'importance des vitesses du courant et des débits de pointe potentiels au niveau des aménagements projetés.

A cet effet, les solutions proposées peuvent être subdivisées en trois principaux types d'aménagements : la construction d'un barrage pour écrêter les crues, l'édification de digues de protection et la surélévation des berges de l'oued au niveau de la ville d'Essaouira.

Un barrage, nommé Zerrar, est justement en construction au droit de la confluence des affluents Igrounzar et Zelten, au point de coordonnées 31° 21' N et 9° 34' W ; et sa mise à l'eau est prévue pour l'année 2012. Il permettra la régularisation d'un volume de 28 millions de mètre-cubes. Outre l'irrigation d'un millier d'hectares et l'alimentation en eau potable de la ville d'Essaouira, le barrage aura pour vocation la protection de la ville et de la plage des apports charriés par l'oued. Toutefois, il faut signaler que l'arrêt des sédiments et autres charges en suspension par ce barrage, priverait le littoral d'Essaouira d'un apport qui équilibrait le jeu incessant de l'érosion et alimentation en sédiments. L'équilibre morphosédimentaire de ce littoral risque donc de se briser, car le matériel détritique alimentant la plage provient essentiellement de l'oued Ksob. Ce matériel est ensuite redistribué sur la plage par la houle ou, accumulé sous forme de dunes par des vents NE ou NNE (El Mimouni et al, 2010).

Pour l'édification des digues de protection sur la rive droite de l'oued Ksob, cette solution propose la mise en place de deux digues de part et d'autre de la route projetée qui reliera le village touristique à la ville d'Essaouira (Fig. 10). Cet aménagement permettra la protection de la ville d'Essaouira contre les éventuels débordements de l'oued Ksob, sans pour autant pouvoir protéger, à notre avis, les futurs sites touristiques de la station dite Mogador. D'ailleurs, les digues projetées empiéteront légèrement sur ce site.

Pour la surélévation des berges de l'oued, cette solution préconise une surélévation convenable des berges de sorte à empêcher les eaux de l'oued de déborder sur les rives ainsi que leur revêtement pour garantir leur pérennité. Ce schéma présente l'avantage de protéger la ville d'Essaouira ainsi que les sites de la future station balnéaire Mogador.



**Figure 10** : Projets d'aménagements et de renforcements des berges de l'oued Ksob près de l'embouchure

## CONCLUSION

Le bassin versant du Ksob est un hydrosystème du domaine semi-aride marocain caractérisé par un régime pluvial océanique où seules les précipitations liquides conditionnent l'écoulement superficiel. Ce régime est marqué par une saison pluvieuse en automne et en hiver suivi d'une longue période très peu pluvieuse d'avril à octobre.

Sur le plan hydrologique, le régime est caractérisé par une saison de hautes eaux calquée sur la saison pluvieuse. Les débits sont étroitement liés aux pluies aux échelles mensuelles et annuelles. Les coefficients de corrélation entre les deux

paramètres son assez élevés. Ils témoignent de la bonne réponse hydrologique du bassin versant, mais aussi de la bonne qualité des données hydrologiques et pluviométriques utilisées.

Bien qu'avec des débits moyens annuels très faibles (1 à 3 m<sup>3</sup>/s en général), les crues du Ksob sont caractérisées par des débits de pointes très élevés. Ils dépassent souvent 500 m<sup>3</sup>/s. Ils ont même atteint, pour certains épisodes, 1000, 1500 et même 2550 m<sup>3</sup>/s pour la fameuse crue du 29/11/2005. Ces crues sont aussi caractérisées par des temps de montées assez courts et des hydrogrammes pointus, ce qui indique la brièveté et la puissance des évènements. Ces crues sont toujours provoquées par des pluies intenses, principalement d'automne et d'hiver. Elles sont pour cela exclusivement pluviales et ne sont jamais issues de fonte de neige ou de remontées soudaines des eaux souterraines. Par ailleurs, les vitesses de propagations des crues du Ksob sont assez élevées. Elles peuvent atteindre des pointes de 6 m/s. Ces vitesses témoignent des conditions pluviométriques et physiographiques propices au développement de crues éclairs et confirment la présence de risques hydrologiques auxquels il faut accorder le plus grand intérêt et la plus grande prudence.

Sur le plan statistique, nous avons remarqué que les crues du Ksob sont assez fréquentes et puissantes pour un bassin de 1483 km<sup>2</sup> et un module de 1,2 m<sup>3</sup>/s. Une crue d'environ 350 m<sup>3</sup>/s peut parvenir un an sur deux à Adamna et des débits de pointe de l'ordre de 1150 m<sup>3</sup>/s ont une période de retour de 10 ans seulement.

Ceci appelle à bien gérer ces pulsations brutales des niveaux d'eau des oueds par des aménagements appropriés et par la sensibilisation de la population aux dangers des crues en ce milieu vulnérable par ses conditions géomorphologiques et climatiques. A cet effet, la construction du barrage de Zerrar, près de la confluence d'Igrounzar et Zelten, est, sous une vision hydrologique, une bonne initiative pour la bonne gestion de l'eau et la prévention contre ces crues. Mais sur le plan de la géomorphologie du littoral d'Essaouira, il risque de perturber l'équilibre morphosédimentaire du milieu, en privant ce littoral de l'apport sédimentaire qui alimentait la plage. Par ailleurs, plusieurs digues de protection sont en cours d'édification pour protéger et accompagner plusieurs projet immobiliers et touristiques au sur la rive gauche de l'oued. Cette région, destinée à être le prolongement de la ville, connaît un essor important et la pression foncière et touristique y est importante. La connaissance et la maîtrise des pulsations brutales de l'oued Ksob est donc plus que jamais nécessaire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABHT (Agence de Bassin Hydraulique de Tensift) (2006) - Etude de la protection de la ville d'Essaouira contre les inondations. Missions 1,2 et 3. Rapport interne inédit, 300 p.
- AMRHAR M. (1995) - Tectonique et inversions géodynamiques post-Rift dans le Haut Atlas occidental : structures, instabilités tectoniques et magmatisme liés à l'ouverture de l'Atlantique central et la collision Afrique-Europe. Thèse d'état, Fac. Sci. Marrakech, 253 p.
- BAHIR M., JALAL M., MENNANI A., LAFTOUHI N. (2001) - Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (bassin d'Essaouira, Maroc), *Estudios Geológicos*, 57: 47-52
- BAHIR M., CARREIRA P., OLIVEIRA DA SILVA M. , FERNANDES P. (2008) - Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, 64 (1), 61-73
- DAOUDI L., SAIDI M.E. (2008) - Floods in semi-arid zone: example of the Ourika (High Atlas of Marrakech, Morocco). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, ISJAE, Moscow*, 5 (61), pp.117-123.
- DAOUDI L., ELMOUATEZ A., EL MIMOUNI A., ANTHONY E. (2007) - Erosion côtière et patrimoine historique en péril : exemple du rempart de la ville d'Essaouira (Maroc). *International Conference on Rapid Urbanisation and Land Use Conflicts in Coastal Cities-Aqaba, Jordan*, pp. 110-118.
- DPEE (Direction Provinciale de l'Equipement d'Essaouira) (1987) - Monographie de la province d'Essaouira. Rapport interne, 116 p.
- EL MIMOUNI A., DAOUDI L., OUAJHAIN B. (2005) - Rôle de la lithologie des versants dans les écoulements superficiels de l'oued Ksob (bassin d'Essaouira, Maroc). 3ème journées Internationales des Géosciences de l'Environnement, El Jadida, p. 127.
- EL MIMOUNI A., DAOUDI L., SAIDI M.E., BAIDDAH A. (2010) - Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride: exemple du bassin versant du Ksob (Haut Atlas occidental, Maroc). *Revista Cuaternario y Geomorfologia*, 24 (1-2), 99-112.
- ETTACHFINI E. M. (1992) - Le Vraconien, Cénomaniens et Turonien du bassin d'Essaouira (Haut Atlas occidental, Maroc) : Analyse lithologique, biostratigraphique et sédimentologique, stratigraphie séquentielle. Thèse Univ. Paul Sabatier-Toulouse, 245 p.
- ICAME N. (1994) - Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et diagenèse carbonatée des faciès du Crétacé Moyen du bassin d'Essaouira (Haut Atlas occidental, Maroc). Thèse Univ. Tunis II, 442 p.
- JALAL M. (2001) - Potentialités hydrogéologiques du Cénomaniens du Bassin synclinal de Meskala-Kourimat-Ida Ou Zemzem (Essaouira Maroc). Doctorat de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech.

- LAFTOUHI N. (2002) - Hydrologie, hydrogéologie et hydrochimie de la série carbonatée du Crétacé moyen supérieur du Bassin synclinal de Meskala-Kourimat-Ida Ou Zemzem (Essaouira-Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad de Marrakech.
- LAFTOUHI N., PERSONS E. (2007) - Influence des variations climatiques sur le régime hydrologique du bassin versant du Qsob (Essaouira Maroc). Séminaire international sur les impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau. Document technique en hydrologie No. 80, UNESCO, Montpellier, 85-98.
- MEDINA F. (1983) - Télédétection géologique et analyse structurale des tectoniques superposées dans le Haut Atlas occidental. Thèse 3ème cycle, Paris VI.
- ONEM (Observatoire National de l'Environnement du Maroc) (1996)- Monographie locale de l'environnement d'Essaouira. Rapport interne, 116 p.
- PARDE M. (1964) - Quelques données sur des crues remarquables en diverses contrées et sur le bilan de leurs écoulements. Brochure de géographie physique, Genève, 20 p.
- REY J., CANEROT J., PEYBERNES B., TAJ-EDDINE K., THIEULOY J.P. (1988) - Lithostratigraphy, biostratigraphy and sedimentary dynamic of the Lower Cretaceous deposits in the northern side of Western High Atlas (Morocco). *Cretaceous Research*, 9, p. 141-158.
- SAIDI M.E. (1995) - Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc). Thèse de l'université de Paris IV, 120 p.
- SAIDI M.E., AGOUSSINE M., DAOUDI L. (2006) - Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc); exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 28, pp. 41-49.
- SOUID A.K. (1984) - Etude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant les compressions alpines dans l'avant pays atlasique (Maroc). Thèse, Univ. Montpellier, 90 p.