



**COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE ET DYNAMIQUE  
D'UN BASSIN VERSANT EN MILIEU SEMI-ARIDE:  
EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DU KSOb  
(HAUT ATLAS OCCIDENTAL, MAROC)**

*Comportamiento hidrológico y dinámico de una cuenca vertiente en una zona semi-árida:  
El ejemplo de la cuenca vertiente del Ksob (Alto Atlas occidental, Marruecos)*

A. El Mimouni, L. Daoudi, M. E. Saidi & A. Baiddah

*Laboratoire de Géosciences et Environnements, Département des Sciences de la Terre,  
Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, B.P. 549-Guéliz, Marrakech - Maroc  
e-mail: Daoudi.lahcen@gmail.com - Fax (212) 24 43 31 70*

**Resumen:** Situada en una zona semi-árida, en el extremo occidental del Alto Atlas, la cuenca vertiente del Ksob presenta una forma alargada con pendientes bastante importantes en las cuencas afluentes y sus vertientes. La mayoría de los afloramientos son bastante impermeables, compuestos principalmente por rocas carbonatadas jurásicas y cretácicas. Estas características tienen una influencia evidente en la descarga de los tributarios y en la morfología de los hidrogramas observados en sus desembocaduras. El río Ksob ha sufrido avenidas devastadoras muy violentas y de corta duración. La carga sólida transportada por tales avenidas, y depositada en la Bahía de Essaouira, juega un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio morfodinámico y sedimentario de la desembocadura del río y la playa de Essaouira. La construcción de la presa Zerrar, aguas arriba del río, provocará un déficit sedimentario importante que se traducirá en una erosión costera intensa de la Bahía de Essaouira.

**Palabras claves:** Cuenca vertiente, semiárido, avenidas, carga sólida, río Ksob, Bahía de Essaouira.

**Abstract:** Located at the Western extremity of the High Atlas range in a semi-arid zone, the Ksob watershed area presents an elongated shape with steep slopes at the tributaries. The outcrops, rather impermeable in their majority, are composed by Jurassic and Cretaceous carbonated rocks and marls. All these characteristics induce an increase of the river discharge and the development of important floods. The Ksob River is affected by frequent floods, which are violent and short in duration. Transported solid loads deposited in Essaouira bay, play a fundamental role in the maintenance of morphodynamic and sedimentary equilibrium in the river mouth and in the Essaouira beach. The construction of Zerrar dam, upstream of the Ksob River, would involve an important sedimentary deficit, which would drive in a very intense coastal erosion of the Essaouira Bay.

**Key words:** Watershed area, Semi-arid, Floods, Solid load, Ksob River, Essaouira Bay.



A. El Mimouni, L. Daoudi, M. E. Saidi & A. Baiddah (2010). Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride: exemple du bassin versant du Ksob (haut atlas occidental, Maroc). *Rev. C. & G.*, 24 (1-2), 99-112.

## 1. Introduction

Partout dans le monde, les inondations et les pulsations hydrologiques défient la chronique par leurs effets dommageables sur les Hommes, les biens et le milieu naturel. Dans les régions semi-arides plus particulièrement, ces phénomènes ont pris de l'ampleur durant ces dernières décennies, probablement en relation avec le changement climatique que connaît la planète. Au Maroc, le Haut Atlas Occidental est l'une des régions les plus touchées par ces phénomènes d'écoulement extrême à répétition. Les dernières grandes crues survenues dans la région depuis quelques années (Ourika en 1995 et en 1996; Ksob en 1996 et 2005, Imin'tanout et régions voisines tout récemment) témoignent d'une série impressionnantes de sous-évaluations de l'aléa hydrologique à prendre en compte. En dépit de sa situation sous un climat semi-aride à sub-humide, cette région est confrontée à l'amplification et à la répétition du phénomène en raison de l'encaissement des vallées et de leur aptitude à concentrer les écoulements (Saidi et al., 2003). Les vallées situées à une quarantaine de kilomètre au sud de la ville de Marrakech (Ourika, Rhiraia, N'fis) sont souvent le siège de crues très violentes et imprévisibles (Saidi et al., 2003; Saidi et al., 2006; Daoudi et Saidi, 2008). Les impacts dommageables sur l'environnement socio-économique sont nombreux dans les vallées (Rapport de la Direction Provinciale de l'Agriculture de Marrakech, 1999). Indépendamment des interrogations relatives aux répercussions d'un dérèglement climatique provoqué par les activités humaine, cette situation pose brutalement le problème des moyens de prévention et de protection mis en œuvre.

Dans la région d'Essaouira, le bassin versant du Ksob (extrémité occidentale du Haut Atlas) est l'une des régions les plus menacées par ce risque naturel en raison de son climat semi-aride de son relief montagneux et maritime et de ses enjeux touristiques urbanistiques et économiques. Ce bassin est parcouru par un cours d'eau à caractère torrentiel traversant et menaçant les secteurs de plus en plus développés de la bande côtière de la région d'Essaouira. Les risques d'inondation sont d'autant plus importants que la ville d'Essaouira présente une topographie plate proche du niveau de

la mer (5 m d'altitude). Contrairement aux autres bassins versants du Haut Atlas occidental, le bassin versant du Ksob présente plusieurs particularités. Alors que les débits de pointe dépassent rarement 1000 m<sup>3</sup>/s lors des crues dans les autres bassins du Haut Atlas (1030 m<sup>3</sup>/s pour la tristement célèbre crue de l'Oued Ourika survenue le 17 Aout 1995 (Saidi et al., 2003)), le débit de pointe atteint dans le bassin de Ksob lors des périodes de crue dépasse généralement 1000 m<sup>3</sup>/s. Lors de la crue du 29 Novembre 2005, la plus spectaculaire durant ces dernières décennies, le débit de pointe atteint est de 2550 m<sup>3</sup>/s d'après l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). Lors des périodes de crue, un courant très destructeur traverse alors le lit majeur de l'Oued court-circuitant ainsi les méandres. L'érosion accélérée mobilise progressivement une masse importante de sédiments meubles constituée de galets, de sables, de limons, d'argiles et de débris végétaux. Toutefois, par cette charge solide qu'il véhicule lors des périodes de crue, l'oued Ksob joue un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre morphosédimentaire de la baie d'Essaouira (Gentile, 1997; El Mimouni et al., 2007)

La compréhension scientifique et technique des facteurs hydrodynamiques, géomorphologiques et anthropique à l'origine des crues et des processus érosifs qui s'en suivent permet généralement d'évaluer leur impact sur l'environnement et de proposer des formes d'aménagement et de protection plus adaptées au milieu naturel. Afin de comprendre la dynamique et les particularités du bassin versant du Ksob, et de fournir des indications permettant de caractériser son comportement hydrologique, nous avons entrepris une étude multidisciplinaire comprenant l'hydrologie, la lithologie et la géomorphologie de ce bassin versant ainsi que de l'évolution morphosédimentaire de son embouchure. Cette étude vise à comprendre à quel point les caractéristiques de ce bassin versant ont permis d'atteindre des pointes de crues exceptionnelles pour une superficie drainée ne dépassant pas 1480 km<sup>2</sup>. Cette étude a également pour objectif de déterminer quel sera l'effet du projet de barrage Zerrar prévu à 30 km de la côte en amont du bassin, sur le fonctionnement hydrodynamique et morphosédimentaire de ce bassin versant et de son embouchure.

## 2. Contexte géographique et climatique

### 2.1. Situation géographique

Le bassin versant du Ksob se localise sur la façade Atlantique du Maroc au sud-est de la ville d'Essaouira, entre 31°2' et 31°30' Nord et entre 9° et 9°46' Ouest, où il constitue l'extrémité occidentale de la chaîne haut atlasique. Le cours d'eau principal (Oued Ksob) résulte de la confluence des oueds Igrounzar et Zelten à l'amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l'océan Atlantique. Le bassin versant du Ksob est donc composé de trois sous bassin d'une superficie totale de 1480 km<sup>2</sup> (823 km<sup>2</sup> pour le sous bassin d'Igrounzar qui s'étend sur la partie Nord, 460 km<sup>2</sup> pour le sous bassin de Zelten sur la partie Sud et 197 km<sup>2</sup> pour le sous bassin l'Adamna à l'extrême Ouest) (Fig. 1).

### 2.2. Caractéristiques climatiques

Du point de vue climatique, le bassin versant du Ksob est situé, selon plusieurs indices d'aridité, dans une zone aride à semi-aride caractérisée par l'interférence des influences océaniques (perturbations de l'Ouest), continentale et montagnarde (Allam et Houmimyd 1990; Weisrock, 1980; Hander, 1993). L'aridité est assez marquée dans le bassin versant surtout en été. Cette aridité est par ailleurs relativement croissante de l'Ouest vers l'Est, suite à l'éloignement des influences océaniques, où la pluie diminue et les écarts thermiques augmentent. Le diagramme ombrothermique de la station d'Essaouira met en lumière une aridité étalée sur six mois d'avril à septembre où le total pluviométrique mensuel en mm est dépassé par le double des températures en °C. La température moyenne annuelle y est de l'ordre de 20 °C. La différence de température entre le mois le plus chaud (juillet) et le mois le plus froid (janvier) ne dépasse guère 6 °C ; mais l'amplitude diurne est plus importante pouvant atteindre 10 à 12 °C. La région est caractérisée par une variabilité spatio-temporelle des précipitations qui sont marquées par des irrégularités inter-annuelles et intra-annuelles importantes et une irrégularité relative des écoulements superficiels (Hander,

1993). La pluviométrie annuelle est en moyenne de l'ordre de 330 mm par an, avec un coefficient de variation de 34 %. La variabilité mensuelle et saisonnière est encore plus marquée, avec des coefficients de variation respectifs de 50 et 55 %. La série de données disponibles de 1977 à 2004 à l'ABHT, montre que cette période est caractérisée par l'alternance d'années pluvieuses et d'années sèches (Fig. 2). La moyenne des précipitations mensuelles est de l'ordre de 55 mm pour les mois les plus humides (Novembre, Décembre et Janvier). La période sèche peut durer 7 mois (d'Avril à Septembre) avec un minimum de précipitations établi aux mois de juillet et août qui peuvent connaître une sécheresse totale (Fig. 2).

Selon les données de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, les débits moyens annuels enregistrés durant les trois dernières décennies à la station Adamna varient entre 0.11 m<sup>3</sup>/s (1992-93) et 6,77 m<sup>3</sup>/s (1995-96). Cependant, le trait marqué des écoulements de l'oued Ksob correspond à ses débits de crues très élevés occasionnels qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres-cubes par seconde. La région a connu durant le siècle dernier plusieurs crues importantes durant les années 1927, 1961, 1965, 1985 et 1996. Toutefois, la plus remarquable de ces crues est celle qui a eu lieu en Novembre 2005 avec un débit de pointe de 2550 m<sup>3</sup>/s (Fig. 2).

### 2.3. Données environnementales

La région d'Essaouira comprend deux étages de végétation:

1. L'étage de végétation méditerranéen-aride ; il occupe la majeure partie du bassin du Ksob. Etant donné les caractéristiques climatiques sévères, la vie végétale dans cet étage n'est pas facile. Cependant, malgré ces conditions, on remarque l'apparition d'une forêt claire représentée par l'arganier (*Argania spinosa*). Cette forêt, étant donné son exploitation économique, présente un niveau de dégradation élevé. C'est pourquoi, il est pratiquement impossible de rencontrer actuellement une forêt à l'état de climax (RESING, 1996).

2. L'étage de végétation semi-aride; il occupe les franges côtières autour d'Essaouira, où il est représenté par le thuya (*Tetraclinum articulata*).

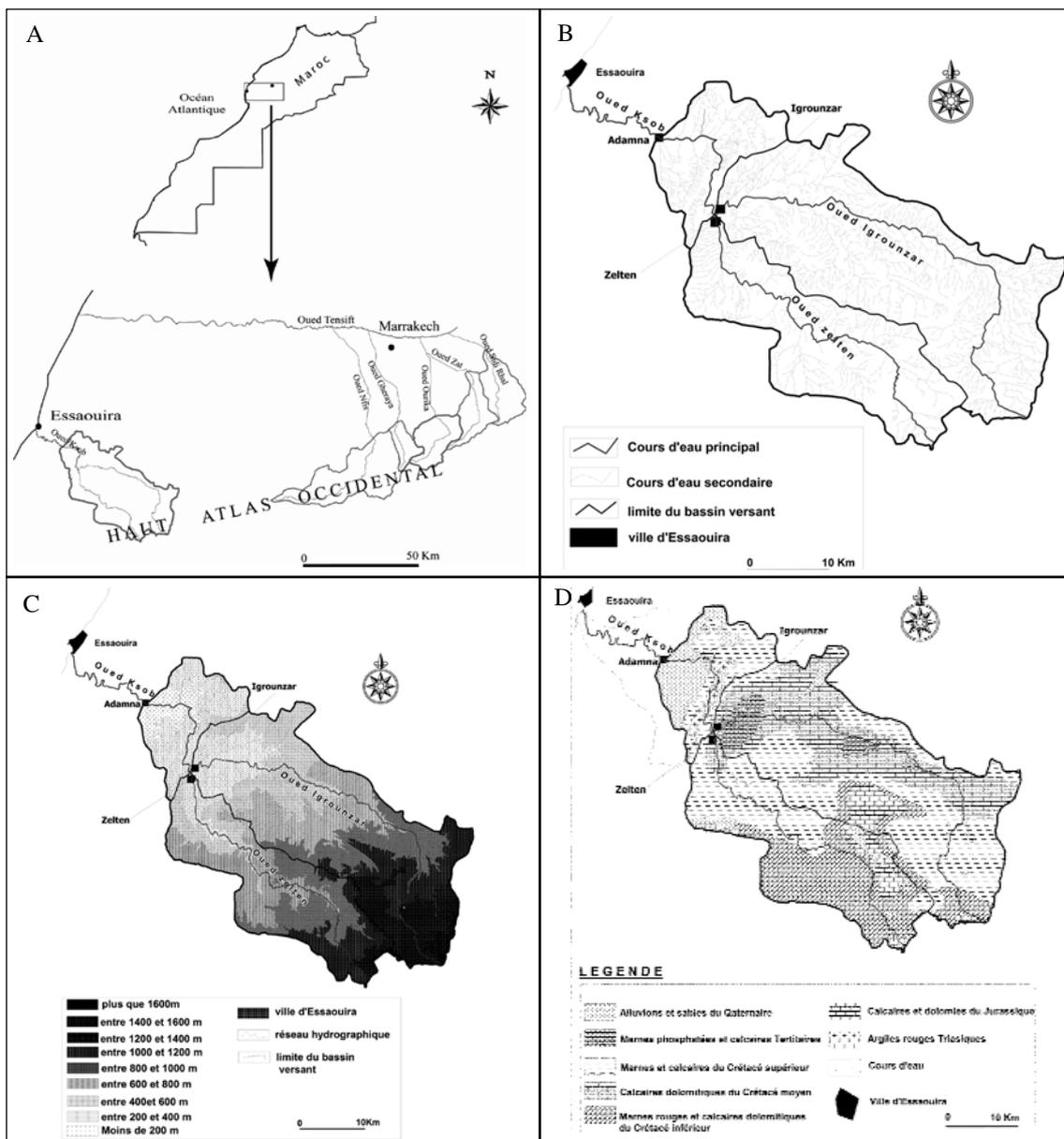


Figure 1. Principales caractéristiques du bassin versant du Ksob (A- Situation géographique B- Réseau hydrographique, C- Carte hypsométrique, D- Carte géologique).

Figura 1. Características principales de la cuenca vertiente del Ksob (A- Situación geográfica, B- Red hidrográfica, C- Mapa hipsométrico, D- Mapa geológico).

L'occupation des sols est rudimentaire; on distingue deux types de couverts: 1) des cultures céréalières sur les terrains marneux d'âge crétacé, sur le Plio-Quaternaire et l'Eocène, 2) des terrains nus correspondant aux affleurement des dalles

calcaires fissurées et karstiques du Crétacé et aux formations jurassiques. Dans les différentes parties du bassin, les zones urbanisées sont quasi inexistantes, à l'exception de certaines communes où les infrastructures peuvent avoir une influence

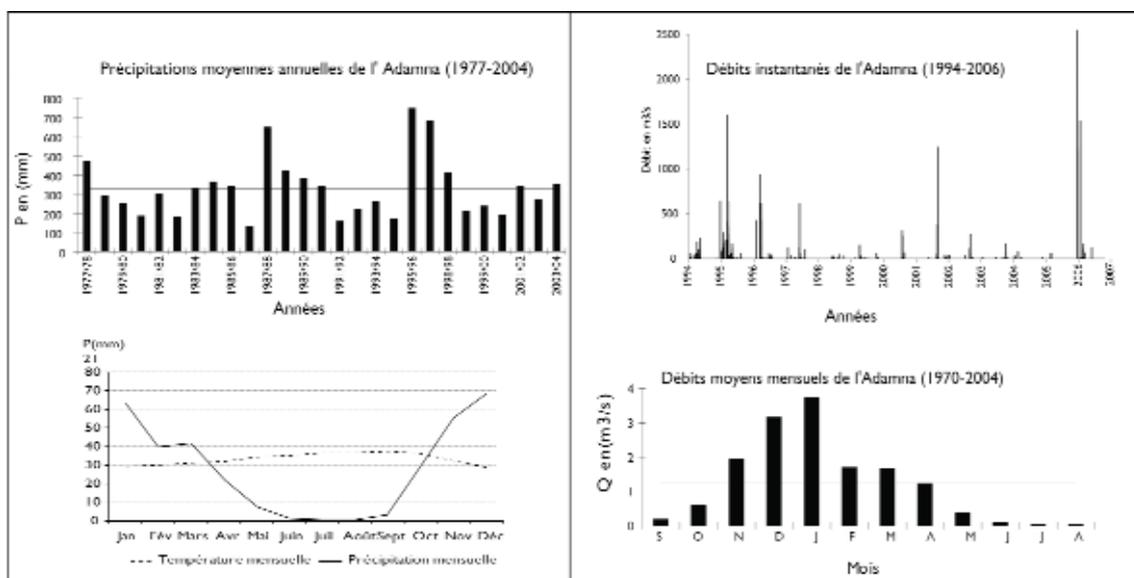


Figure 2. Précipitations et débits du bassin versant du Ksob à la station Adamna.

Figura 2. Precipitaciones y descargas de la cuenca vertiente del Ksob en la estación de Adamna.

très réduite sur le ruissellement (Laftouhi et Persoons, 2007).

### 3. Caractéristiques morphologiques du bassin

La forme du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue. Autrement dit, outre la nature de l'averse, ce sont les caractéristiques morphologiques du bassin qui conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire (Humbert et al., 1982; Saidi, 1995; Saidi et al., 2003). Plusieurs formules et indices permettent de chiffrer les caractéristiques morphologiques des bassins versants. Le tableau 1 permet de comparer les caractéristiques morphologiques du bassin du Ksob avec celles du bassin versant de l'Ourika (Fig. 1A), l'un des principaux bassins du Haut Atlas occidental connu par ces crues dévastatrices (Saidi et al., 2003).

Le bassin versant du Ksob présente plusieurs particularités morphologiques. Sur environ 80 km de distance, sa topographie passe de 0 à environ 1700 m d'altitude. Alors que l'oued est relati-

vement encaissé en amont, la morphologie de la basse vallée de l'oued est relativement complexe; modelé notamment par les vents forts du Nord (Weisrock A. et Fontugne M., 1991) et par les nombreux aménagements réalisés au cours de ces deux dernières décennies. L'oued débouche directement dans la baie d'Essaouira.

L'indice de compacité de Gravelius ( $K_c = 0,28 P/\sqrt{S}$ ; où  $P$  est le périmètre et  $S$  la surface) permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin (Saidi, 1995); il est de l'ordre de 1,5 pour le bassin versant du Ksob (1,39 pour le sous bassin d'Adamna, 1,33 pour celui d'Igrounzar et 1,73 pour celui de Zelten). Comme pour le bassin de l'Ourika ( $K_c = 1,3$ ), cette compacité relativement médiocre confère au bassin une forme allongée. Le cours principal résulte de la confluence des oueds Igrounzar et zelten à l'amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l'océan Atlantique. Chacun de ces oueds correspond à une vallée linéaire alimentée, sur les deux rives, par une succession de ravins affluents (Fig. 1B). Cette situation permet aux ondes de crues de grossir vers l'aval à mesure de leur alimentation par les affluents.

L'analyse de la répartition des tranches d'altitude est effectuée à partir des cartes

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant du Ksob comparées avec celles du bassin versant de l'Ourika.  
 Tabla 1. Características morfológicas de la cuenca vertiente del Ksob comparadas con las del Ourika.

	OURIKA	Ksob
Superficie (km <sup>2</sup> )	503	1480
Périmètre (km)	104	208
Longueur du cours principal (km)	45,5	105
Índice de compacité	1,3	1,5
Altitude moyenne (m)	2500	745
Altitude maximale (m)	4001	1694
Longueur du rectangle équivalent (km)	39,2	87
Largeur du ractangle équivalent (km)	12,8	14,6
Pente moyenne	2,15 %	1,5 %

topographiques au 1/100 000<sup>ème</sup> d'Essaouira et de Khemis Meskala. La répartition altimétrique dans le bassin du Ksob montre la prédominance des terrains compris entre 600 et 1600 m représentant environ 60% de la surface totale (Fig. 1C). L'altitude moyenne s'élève à 745 m.

Le calcul des pentes moyennes du bassin du Ksob a permis de constater que celles des cours principaux ne sont pas particulièrement élevées (1,7% à Adamna, 1,8% à Igrounzar et 3,6% à Zelten) (Fig. 3). Cependant, la vitesse et la violence des écoulements sont surtout régies par les pentes plus importantes des affluents et des versants. La quasi-totalité des affluents se jettent dans les cours principaux avec des pentes assez importantes, mais

les vallons les plus pentus se situent en amont du bassin avec des pentes qui peuvent atteindre par endroit 10 %. Les pentes les plus importants dans le bassin versant sont identifiées sur le versant sud du sous bassin du Zelten.

#### 4. Contexte géologique du bassin versant

Sur le plan géologique, les affleurements du bassin versant du Ksob sont constitués de faciès très diversifiés d'âges compris entre le Trias et le Quaternaire (Michard, 1976; Içame, 1994). Cependant, la majeure partie des faciès rencontrés dans le bassin est constituée de séries carbonatées d'âge



Figure 3. Profils longitudinaux de l'Oued Ksob et de ses deux principaux affluents  
 Figura 3. Perfiles longitudinales del río Ksob y de sus dos afluentes principales.

Jurassique et Crétacé (Figure 1D). Les observations déduites des cartes géologiques au 1/50 000 d'Essaouira et de Khemis Meskala, et des prospections de terrains montrent que les roches tendres à moyennement tendres représentent plus de 60 % de l'étendue du bassin. Ceci explique la grande quantité des matériaux solides charriés par le Ksob durant les périodes de crue. L'histoire tectonique de cette partie du Haut Atlas est complexe; la morphologie actuelle 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. En effet, l'abondance du diapirisme a pour origine les argiles salifères du Trias plus profond.

Le haut bassin d'Igrounzar est occupé principalement par des marnes et des 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).

Le sous-bassin versant de Zelten draine des séries du Jurassique supérieure aux structures plus compliquées. Ces formations sont en majeure partie constituées par des argiles et des marnes. Le ruissellement y est par conséquent plus intense.

Vers l'aval de la confluence, les formations dunaires consolidées et mobiles du Plio-quaternaire occupent la totalité du sous bassin versant d'Adamna (Figure 5), où les eaux s'infiltrent rapidement dans les alluvions du lit de l'oued (El Mimouni et al., 2005).

## 5. Comportement hydrologique et dynamique

### 5.1. Ecoulements

L'écoulement, d'abord pérenne en amont d'Igrounzar et de Zelten, devient saisonnier en aval. Dans cette dernière partie du bassin, le Ksob ne coule qu'après les premières pluies de septembre ou octobre (parfois plus tard). L'écoulement persiste alors jusqu'au mois de mai ou de juin en marquant parfois au passage des

pulsations brutales du débit lorsque l'intensité pluviale est très forte.

La majeure partie de l'écoulement se produit donc dans les bassins amont d'Igrounzar et de Zelten. Les écoulements de ces deux oueds consistent en deux composantes: 1) un écoulement de base faible et régulier pendant la majeure partie de l'année résultant de la restitution des eaux provenant de l'écoulement hypodermiques et des résurgences des eaux infiltrées dans le bassin, notamment dans sa partie amont; 2) une série de crues de courte durée mais assez fortes qui peuvent avoir lieu plusieurs fois par an en fonction de l'intensité et la durée des séquences pluvieuses.

Toutes les caractéristiques morphologiques et lithologiques analysées précédemment ont une influence évidente sur la puissance des crues et la forme des hydrogrammes. Les crues de l'oued Ksob, comme celles des autres oueds du Haut Atlas, sont généralement violentes et de courte durée. Les hydrogrammes observés à l'exutoire sont souvent pointus avec des temps de montée assez brefs et des temps de base de quelques heures. A titre d'exemple, la figure 4 illustre l'hydrogramme de la crue de l'oued Ksob de Novembre 2005; il met en relief les caractéristiques d'une crue simple monogénique avec une forte pointe de crue, des temps de base et de montée assez courts et un tarissement prolongé. La montée des eaux s'est produite en 5 heures et 30 minutes et la décrue en 6 heures. Le débit de la crue est passé d'après l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift de 12 m<sup>3</sup>/s avant la crue à une pointe de 2550 m<sup>3</sup>/s. Les eaux mobilisées durant la crue ont atteint un volume de 34,47 millions de mètres-cubes.

Les écoulements annuels aux trois stations de jaugeage (Igrounzar, Zelten et Adamna) sont très variables d'une année à l'autre en fonction des aléas climatiques. Le tableau 2 permet d'apprécier cette variabilité du régime annuel de l'oued.

Le coefficient de variation est très important attestant de l'extrême variabilité des débits d'une année à l'autre. Il en est de même pour le rapport des extrêmes ( $R=Q_{max}/Q_{min}$ ) qui montre des valeurs qui varient de 34.2 à la station d'Igrounzar à 56.4 à la station d'Adamna.

Les débits moyens interannuels semblent être normaux si on considère la superficie contrôlée par

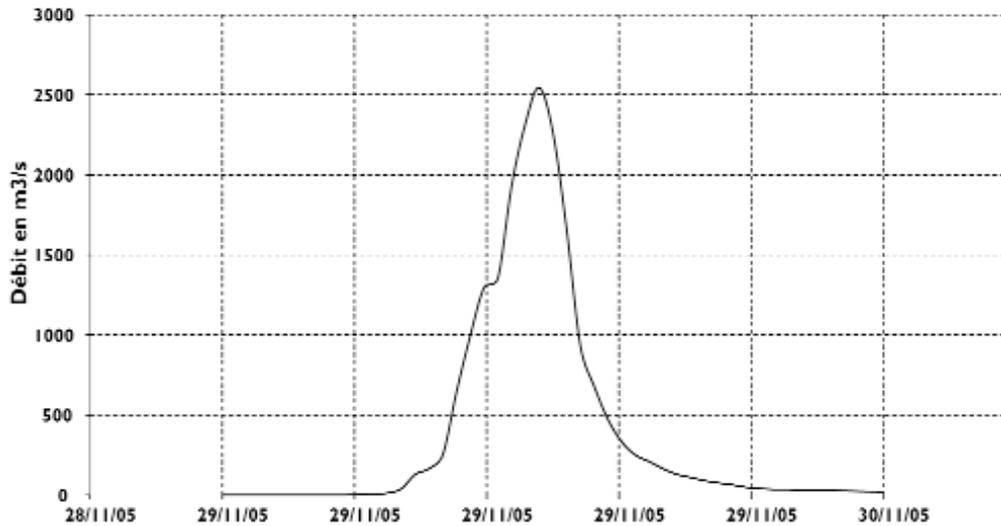


Figure 4. Hydrogramme de la crue du 29 Novembre 2005 de l'Oued Ksob à la station d'Adamna.  
 Figura 4. Hidrograma de la avenida del río Ksob el 29 de noviembre de 2005 en la estación de Adamna.

chaque station (notion de débit spécifique). Les travaux menés en 1993 par l'ABHT sur le jaugeage différentiel avaient montrés que 67 l/s des eaux de l'oued Ksob s'infiltrent par les calcaires fracturés du Cénomano-Turonien, sur une longueur de 2 Km, contre 42 l/s sur 7 Km infiltrés par les terrains du Plio-quaternaire

A partir des valeurs des débits maxima annuels instantanés établis par la direction régionale de l'hydraulique de Marrakech, et à l'aide d'un logiciel de traitement statistique, nous avons pu ajuster un certain nombre de lois statistiques à un échantillon de crues du Ksob. Le résultat obtenu montre que les lois les plus adéquates sont les lois Weibull-2, Weibull-3 et Log-weibull-3. Les lois de Weibull sont des lois de probabilité utilisées pour l'estimation des fréquences de crues et de leurs

périodes de retour. La fonction de répartition de la loi à deux paramètres (Weibull-2) est définie par:

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-(x/\lambda)^k}$$

k est le paramètre de forme et  $\lambda$  le paramètre d'échelle de la distribution.

La loi de Weibull-3 dispose d'un troisième paramètre de localisation de la distribution  $\theta$ . Elle est définie par:

$$F(x; k, \lambda, \theta) = 1 - e^{-(\frac{x-\theta}{\lambda})^k}$$

Ces lois nous ont permis d'estimer les hauteurs de certaines crues comme suit:

L'analyse de ces données montre que la fréquence des crues est relativement importante en comparaison avec des bassins situés dans le même contexte climatique. En effet, nous avons constaté que des crues de l'ordre de 210 m<sup>3</sup>/s se produisent,

Tableau 2. Paramètres statistiques des débits annuels moyens (m<sup>3</sup>/s) au niveau des différentes stations de l'oued Ksob, pour la période de 1977-2006 (Q: débit, CV: coefficients des variations = Ecart-type/moyenne; R ext.: rapport des extrêmes = Q max/Q min).  
 Tabla 2. Parámetros estadísticos de las descargas anuales medias (m<sup>3</sup>/s) en las diferentes estaciones del río Ksob, para el periodo 1977-2006.

Stations	Q moyen	Ecart-type	CV	Q max	Q min	R ext.
Igrounzar	0,49	0,74	0,96	1,95	0,057	34,21
Zelten	0,51	0,69	1,35	3,49	0,078	44,74
Adamna	1,23	1,36	1,10	6,77	0,12	56,41

Tableau 3. Périodicité des crues de l'oued Ksob (d'après l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift).  
 Tabla 3. Periodicidad de las avenidas del río Ksob (según la Agencia de la Cuenca Hidráulica de Tensift).

Réurrence (ans)	2	5	10	20	50	100	200	Loi d'ajustement
Igrounzar	33	120	210	320	490	640	800	Weibull-3
Zelten	135	326	470	620	820	970		Weibull-2
Adamna	210	540	860	1240	1860	2400	3040	Log-weibull-3

en moyenne, tous les deux ans à Adamna, et que des débits de pointe de l'ordre de 860 m<sup>3</sup>/s y reviennent tous les 10 ans. La crue exceptionnelle de Novembre 2005, avec une pointe de crue de 2550 m<sup>3</sup>/s correspondrait donc à une crue centennale.

### 5.2. Erosion et charge solide

Dans les bassins torrentiels des régions tempérées, les mouvements gravitaires de terrain présentant des caractéristiques d'écoulement sont fréquents (Julian et Anthony, 1997; Malet et al., 2000; D'Amato Avanzi et al., 2004). En utilisant la classification de Hungr et al. (2001), on distingue les glissements évoluant en coulées ou glissements-coulées (earthflow), les coulées de débris (*debris avalanche*), et les laves torrentielles (*debris-flow*). Ces mouvements se différencient par la morphologie des dépôts, la granulométrie, les paramètres mécaniques et les vitesses d'écoulement (Major et al., 1992; Malet et al., 2002; Hürlimann et al., 2003). Dans les régions semi-arides, ces processus d'écoulement extrême sont peu connus. Au Maroc par exemple, les études consacrées à l'érosion et à l'estimation des transports fluviaux ont toutes mis en évidence l'importance quantitative des charges exportées par les bassins versants sous climat semi-aride (Snoussi, 1986; Sibari et al., 2001). L'approche globale souvent utilisée pour l'estimation du bilan des matières transportées en zone semi-aride reste confrontée à la grande irrégularité hydrologique des oueds marocains dont les bassins versants présentent des caractéristiques lithologiques, géomorphologiques et hydroclimatiques propres (Sibari et al., 2001; Loudiki, 1999).

Dans le bassin versant du Ksob, la charge solide charriée en période de crue par l'oued est très importante; il est composé de galets, de sables, de

limons, d'argiles et de débris organiques. Ces matériaux transportés résultent aussi bien de la dégradation des versants abrupts que de la remobilisation des sédiments accumulés, en période de sécheresse, dans le lit de l'oued.

-En amont du bassin, la dégradation spécifique au niveau du confluent des deux sous bassins versants (Igrounzer et Zelten) est de 1000 T/Km<sup>2</sup>/an (Rapport du Ministère de l'Economie, des Finances, de la Privatisation et du Tourisme, 2002). Suite à la situation de cette partie du bassin dans une zone aride à semi-aride (loin des influences maritimes), son couvert végétal est très clairsemé, dominé par l'arganier «*Argania Spinosa*». Cependant en raison de sa surexploitation durant ces dernières années, la forêt d'arganier présente un niveau de dégradation élevé; ces zones sont donc soumises à une érosion de plus en plus intense. La constitution de la charge solide des cours d'eau, charriée ou en suspension, est surtout le fait de surfaces contributrices et non de l'ensemble du bassin versant. Les matériaux transportés sont surtout composés de galets calcaires, d'argiles et de limons, en provenance des versants fortement inclinés. Leurs entrées au niveau des drains principaux se font sous forme de matériaux alluviaux (cône de déjection et confluence des tributaires) et de colluvions (cônes d'éboulis et glissement de terrain). Cette dernière forme de matériaux charriée concerne des faciès plus au moins meubles qui affleurent sur des versants abrupts. Il s'agit plus particulièrement des formations argileuses du Trias, des formations marneuses du Crétacé inférieur et les formations meubles du Plio-quatenaire. Les argiles du Trias affleurent sur une zone étroite en aval du bassin représentant moins de 5% de la superficie totale; cependant elles contribuent de façon importante à la charge solide en raison de leur friabilité. Les formations marneuses du Crétacé inférieur occupent le haut bassin de Zelten sur une superficie

représentant à peu près 25 % du bassin du Ksob et 20 % dans le sous bassin d'Igrounzar.

-Vers la partie aval du bassin, les formations meubles du Plio-quatenaire constituent les principaux faciès géologique de cette partie du bassin. L'oued Ksob constitue un obstacle morphologique vis-à-vis des sables qui migrent vers le Sud, sous l'action des vents dominants du Nord et du NNE, sous forme de dunes barkhanoïdes (Lharti et al., 2006) (Fig. 5). Ainsi, en période de sécheresse le lit de l'oued est partiellement colmaté; les sables de plage continuant leur migration forment barrage à l'embouchure de l'oued. Les eaux constituent alors un petit étang au niveau de Diabet. Dès la première crue importante, le barrage sableux cède et le lit de

l'oued est alors évacué (Figure 5A et B) ; cela peut parfois prendre plusieurs années. Le pont au Nord de Diabet construit en 1922 a cédé dès la première crue en 1925 (d'après la Direction de l'Équipement d'Essaouira). Cette configuration de la partie aval du bassin versant est en partie responsable de la violence des crues. Les sables accumulés en période de sécheresse à l'embouchure de l'oued et dans son lit mineur sont responsables de l'effet de «bouchon» que subit l'oued en période plus humide.

Le débit aléatoire de l'oued Ksob accompagné de la migration des sables vers le sud explique également les cours variables et anastomosés de la partie aval de l'oued. A partir de Diabet, le lit mineur de l'oued fluctue entre les directions Nord

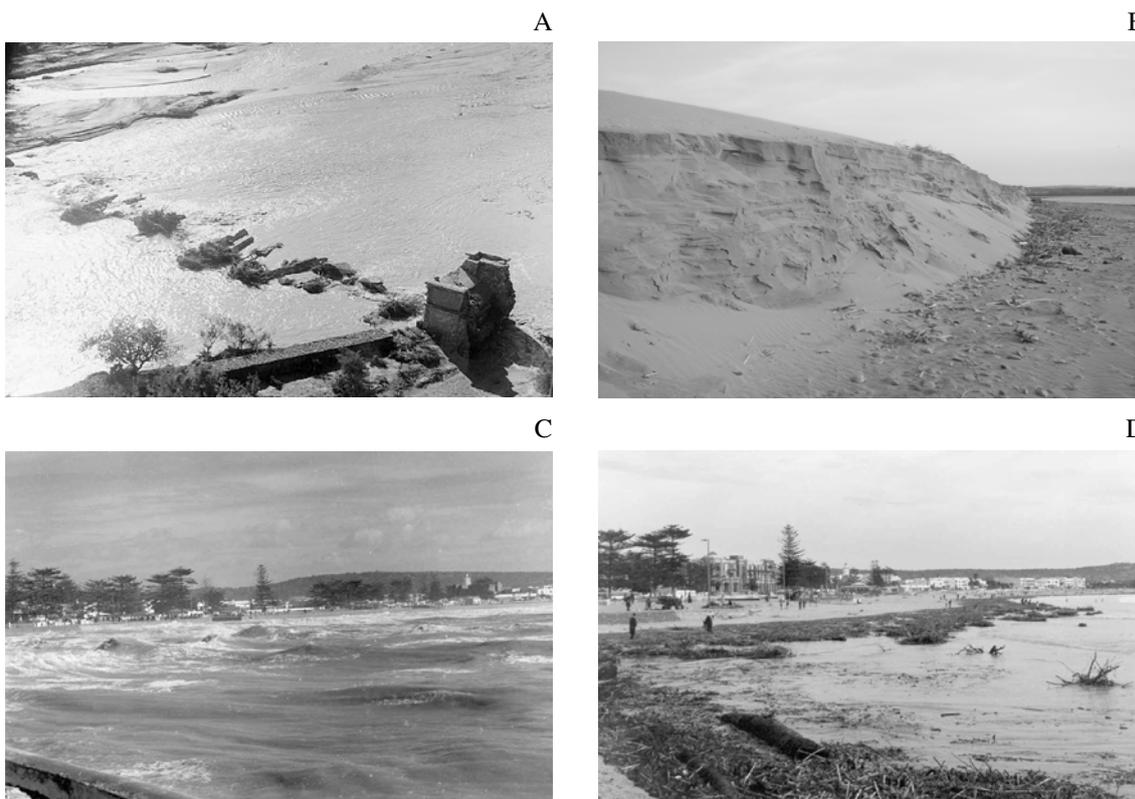


Figure 5. Photos prises à l'embouchure de l'oued Ksob lors de la crue de Novembre 2005 (A- écoulement de l'oued au niveau du pont de Diabet, B- évacuation du barrage de sable, C- apports solides en suspension (Argiles et limons) dans la baie d'Essaouira, D- débris végétaux accumulés sur la plage d'Essaouira au lendemain de la crue.

Figura 5. Tomadas en la desembocadura del río Ksob durante la avenida de noviembre de 2005 (A- escorrentía del río al nivel del puente de Diabet, B- evacuación de la presa de arena, C- aportes sólidos en suspensión (arcillas y limos) en la bahía de Essaouira, D- restos vegetales acumulados sobre la playa de Essaouira inmediatamente después de la avenida.

et Ouest. Ces fluctuations du lit mineur représentent un déplacement de l'embouchure de l'oued d'environ 1000 m depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (Figure 6). Ce déplacement est dû à l'arrivée des sables sur la rive droite de l'oued. Cette déviation correspond à un compromis entre l'avancée des sables (période de sécheresse) et les crues (périodes plus humides). Plus la sécheresse (saisonnière ou pluriannuelle) est prononcée, plus la déviation du lit mineur tend vers l'Ouest, alors qu'une déviation vers le Nord semble suggérer un retour vers des conditions plus humides.

## 6. Conséquences de la construction du barrage Zerrar

Dans le but de servir les besoins des populations en eau et en énergie, la construction des barrages sur les cours d'eau de la surface de la terre est une activité de plus en plus développée. La construction des barrages est une activité très ancienne; les premiers ouvrages connus remontent à 5000 ans et se situent au proche orient. Au XX<sup>ème</sup> siècle, une quantité de barrage de plus en plus gigantesque ont été érigés le long des rivières.

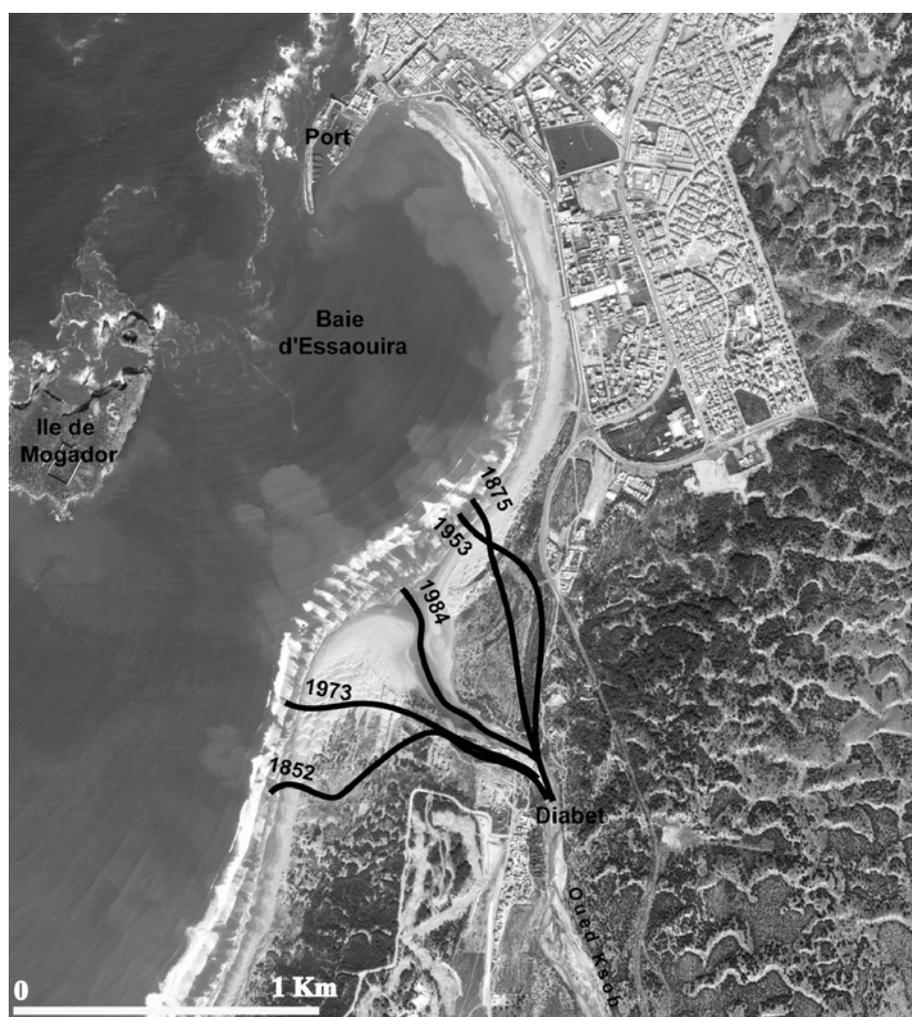


Figure 6. Configuration actuelle de l'embouchure de l'oued Ksob et de la baie d'Essaouira, montrant la trajectoire du lit mineur à différentes époques (photo aérienne 2008).

Figura 6. Configuración actual de la desembocadura del río Ksob y de la bahía de Essaouira, mostrando la trayectoria del canal en diferentes épocas (foto aérea de 2008).

Dans cette perspective, le bassin versant de l'oued Ksob est le siège d'un projet de construction de barrage (barrage Zerrar) en amont de l'oued Ksob. Les travaux de construction de ce barrage ont commencé il y'a un an, au niveau de la station Adamna à une trentaine de Km de la ville d'Essaouira. Diverses raisons ont motivé cette construction parmi lesquelles: l'alimentation de la région d'Essaouira en eau potable, l'irrigation et lutte contre la sécheresse, la régulation des crues, et la création d'aires de loisirs (une station balnéaire avec 6 terrains de golf est en cours de construction dans la région de Diabet).

Cependant, ces aménagements conçus pour répondre à des besoins immédiats, entraînent à moyen et à long terme, un déséquilibre du système naturel de leur environnement. En plus des effets néfastes, engendrés sur les régimes hydrauliques des rivières, sur la qualité de leurs eaux et sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, ils perturbent considérablement le transit et le dépôt des matériaux sédimentaires à l'aval et à l'embouchure. Dans les régions arides et semi-arides plus particulièrement, où l'extension des périmètres irrigués est une nécessité, la construction de barrage sur les fleuves a bloqué les sédiments les plus grossiers qui ne peuvent plus nourrir les dérives littorales responsables de leurs redistributions sur les littoraux. Ceci est la cause essentielle du recul spectaculaire de la côte dans plusieurs régions du monde. A cause de ces effets néfastes, certains barrages sont même considérés aujourd'hui comme des échecs patents.

Dans la région d'Essaouira, en moyenne environ de 200 000 tonnes de sédiments, dont 90 % lors des crues, sont déversés par l'oued Ksob dans la baie chaque année. Ces sédiments se déposent en bonne partie dans le triangle formé par la jetée du port, l'île de Mogador et l'embouchure de l'oued (Figure 5 C et Figure 6). Ces dépôts accumulés en faible profondeur sont ensuite progressivement remaniés au long de la plage par les tempêtes (El Mimouni et al., 2007) (Figure 5D). Des études récentes sur l'évolution morphosédimentaire de la baie d'Essaouira montrent que ces dépôts constituent la source unique des apports dans la baie; les sédiments apportés du Nord d'Essaouira par la dérive littorale transitent directement vers le Sud et ne pénètrent pas dans la baie (Gentile, 1997; Daoudi et al., 2007a).

Le principal impact négatif de la construction du barrage Zerrar serait donc lié à la diminution des apports sédimentaires en aval de l'oued aussi bien au niveau de l'embouchure qu'au niveau de la baie d'Essaouira. En effet, le barrage va constituer un obstacle infranchissable aux sédiments provenant de l'amont du bassin. Il va bloquer les sédiments grossiers, venant du haut bassin et qui sont composés, comme nous l'avons vu auparavant, de galet, d'argiles de limons et de débris végétaux. Les effets néfastes de la diminution des apports sédimentaires sont multiples; ce déficit risque ainsi de provoquer:

-un enfoncement du lit de l'oued en aval (*érosion régressive*): le cours d'eau n'ayant plus de matériaux à transporter, sa compétence (capacité de transport de sédiments) va croître et il va creuser son lit en y arrachant les matériaux accumulés.

-une érosion côtière accentuée au niveau de la baie: le risque majeur de la construction du barrage est lié au fait que la baie d'Essaouira ne sera plus suffisamment alimentée en sédiments. Ceci sera à l'origine de l'accentuation de l'érosion côtière lors des tempêtes et d'un recul conséquent du trait de côte. La plage d'Essaouira, déjà déficitaire en sable (Daoudi et al., 2007b), risque de complètement disparaître à moyen terme.

-Colmatage de l'embouchure de l'oued: en raison de la diminution de l'intensité des crues ou de leur disparition totale, le lit actuel de l'oued sera complètement obturé; les crues n'ayant plus l'intensité suffisante pour évacuer les sables accumulés par le vent dans le lit de l'oued. On assistera ainsi à des changements considérables et imprévisibles dans l'embouchure de l'oued.

-Diminution de la productivité biologique du milieu côtier: comme c'est le cas dans la plupart des barrages édifiés sur des cours d'eau charriant une importante charge solide, l'arrêt des apports de sédiments (sables et limons) emportés par les courants marins à l'embouchure risque de diminuer la productivité biologique de ce milieu côtier.

## Conclusion

En dépit de sa situation dans une zone semi-aride, le bassin versant du Ksob peut atteindre des pointes de crue exceptionnelles. Par ailleurs, les

débites de ces crues sont relativement importants pour une superficie drainée de l'ordre de 1480 km<sup>2</sup>. En plus la nature de l'averse, ce sont donc les caractéristiques lithologiques et morphologiques de ce bassin qui conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire. La forme allongée du bassin, les pentes relativement fortes des versants et des affluents et les affleurements peu perméables sont tous des paramètres qui confèrent aux écoulements un caractère torrentiel et boueux, et offre un environnement propice aux crues. Ceci montre qu'en plus du climat, le milieu physique peut offrir un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau. Une pluie intense qui s'abat sur de tels bassins versants se traduit généralement en écoulement de surface. Les temps de réponse et de concentration des eaux se raccourcissent, ce qui suggère une grande vigilance concernant la prévention et l'installation de systèmes d'alerte en amont des bassins.

La quantité de matériaux charriés ou en suspension est également très importante en période de crue. Cette charge solide qui est entièrement déversée dans la baie d'Essaouira joue un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre morphodynamique et sédimentaire de la plage d'Essaouira. La construction du barrage Zerrar en amont de l'oued Ksob aura pour effet de bloquer une grande partie de ces matériaux en amont, ce qui va engendrer un déficit sédimentaire important au niveau de la plage d'Essaouira. L'érosion côtière prendra de l'ampleur durant les tempêtes; la plage d'Essaouira risque de disparaître à moyen terme.

L'exemple du bassin du Ksob montre combien la dynamique d'un cours d'eau et de son embouchure est liée à celle de tout le bassin versant.

## Références bibliographiques

- Allam, M. & Houmimyd, A. (1990). Etude de protection contre l'ensablement de la liaison routière entre Moulay Bouzarkoun et Essaouira. *Rapport du Service Forestier d'Essaouira*. 65 pp.
- Daoudi, L. & Saidi, ME. (2008). Floods in semi-arid zone: example of the Ourika (High Atlas of Marrakech, Morocco). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 5 (61), 117-123.
- Daoudi, L., El Mimouni, A., Anthony, E., Ben Ali, A. & Sipka, V. (2007a). Suivi topographique de la baie d'Essaouira : un outil efficace pour l'évaluation du comportement morphodynamique de la plage. *4èmes Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement (IV<sup>ème</sup> GEOENV)*, Tétouan, p. 110.
- Daoudi, L., Elmouatez, A., El Mimouni, A. & Anthony, E. (2007b). 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*, 110-118.
- D'Amato Avanzi, G., Giannecchini, R. and Puccinelli A. (2004). The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology*, 14, 415-426.
- El Mimouni, A., Daoudi, L. & Ouajhain, B. (2005). Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'oued Ksob (bassin d'Essaouira, Maroc). *3<sup>ème</sup> journées Internationales des Géosciences de l'Environnement-El Jadida*, p. 127.
- El Mimouni, A., Sipka, V., Daoudi, L. & Anthony, E. (2007). Apport des mesures courantométriques à la compréhension du fonctionnement du système hydrodynamique de la baie d'Essaouira. *4èmes Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement (IV<sup>ème</sup> GEOENV)-Tétouan*, p. 111.
- 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 pp.
- Gentile, W. (1997). Caractérisation et suivi d'un champ dunaire par analyses sédimentologiques et télédétection (Essaouira-Cap Sim, Maroc Atlantique). *Thèse Université de Provence - Aix-Marseille I*, 307 pp.
- Hander (1993). Contribution à l'étude de la Bioclimatologie humaine au Maroc l'exemple d'Essaouira. *Thèse Univ. Paris IV*, 230 pp.
- Humbert, J., Najjar, J., Ambroise, B. & Amiet, Y. (1982). Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins de la petite Fecht et du Ringel barch. *Recherche Géographique Strasbourg*, 19-21, 53-64.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D. and Graf, C. (2003). Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian geotechnical journal*, 40 (1), 161-175.
- Içame, 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 pp.
- Julian, M. & Anthony, E.J. (1997). Mouvements de masse et torrentialité: cas du Tuébi et de la Haute-Tinée, Alpes-Maritimes (France). *Géomorphologie*, 1, 59-72.
- Laftouhi, N. & Perssons, E. (2007). Influence des variations climatiques sur le régime hydrologique du bassin versant du Ksob (Essaouira, Maroc). *Document technique en hydrologie, USCO-Paris*, 80, 85-98.
- Lharti, S., Flor, G., Daoudi, L., Flor, G.B., El Mimouni, A. & Ben Ali, A. (2006). Morfologia y Sedimentología del

- complejo playa/dunas costeras de Essaouira (Marruecos atlantico) : modelo de transporte costero. *Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela* (A. Pérez Alberti y J. López Bedoya, ed.), 401-417.
- Loudiki, M. (1999). Transports de matières par les crues : impact sur les retenues de barrages et canaux d'irrigation. *Journées d'étude sur les réformes des infrastructures hydro-agricoles suite aux crues de la province du Haouz de Marrakech*, p. 3.
- Major, J.J., Pierson, T.C. (1992). Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.*, 28, 841-857.
- Malet, J.P., Maquaire, O., Klotz, S. (2000). The Super-Sauze flowslide. Triggering mechanism and behaviour. *Proc. VIIIth Int. Symp. Landslides, Cardiff*, 999-1005.
- Michard, A. (1976). Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 252, 408 p.
- Rapport de la Direction Provinciale de l'Agriculture de Marrakech (1999). Dégâts des crues dans la province du Haouz: Constats et interventions. *Journées d'étude sur les réformes des infrastructures hydro-agricoles suite aux crues de la province du Haouz de Marrakech*. 26 p.
- Rapport du Ministère de l'Economie, des Finances, de la Privatisation et du Tourisme (2002). Projet d'élaboration des relevés topographiques des études hydrologiques des sites de l'Oued de Bouissafen et de l'Oued Ksob pour le compte des études de faisabilité d'Aménagement des stations touristiques balnéaires de la plage blanche et de Mogador. *Note de synthèse. A.D.I.*
- RESING (1996). Monographie locale de l'environnement d'Essaouira. *Observatoire National de l'Environnement du Maroc (ONEM), Rapport interne*, 116 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, 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, 41-49.
- Saidi, ME., Daoudi, L, Aresmouk, H. & Blali, A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard : exemple de la crue du 17 Aout 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *Rev. Sécheresse, Paris*, 14 (2), 1-8.
- Sibari, H., Haidi, S. & Ait Fora, L., (2001). Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride: bassin versant de l'Inaouène, Maroc. *Science et changements planétaires. Rev. Sécheresse*, 12(3), 187-93.
- Snoussi, M. (1986). Nature, estimation et comparaison de flux de matière issus des bassins-versants de l'Adour (France), du Sebou, de l'Oum-Er-Rebia et du Souss (Maroc): Impact du climat sur les apports fluviaux à l'océan. *Thèse Univ. Bordeaux I*, 409 pp.
- Weisrock, A. & Fontugne, M. (1991). Morphogenèse éolienne littorale au Pleistocène supérieur et à l'Holocène dans l'Oulja atlantique marocaine. *Quaternaire*, 2, 565-569.
- Weisrock, A. (1991). Géomorphologie et paléo-environnements de l'Atlas atlantique, Maroc. Thèse, Paris, 931 p, et Notes et Mémoires Serv.Géol. Maroc, n° 332, Rabat, 1993, 487pp.