



HAL
open science

L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash

Maihepireti Wulamu, Jean-Louis Ballais, Virginie Delorme

► To cite this version:

Maihepireti Wulamu, Jean-Louis Ballais, Virginie Delorme. L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 2013, 7, pp.285-306. 10.4000/physio-geo.3633 . hal-01571443

HAL Id: hal-01571443

<https://amu.hal.science/hal-01571443>

Submitted on 2 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Maihepireti Wulamu, Jean-Louis Ballais et Virginie Delorme

L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Maihepireti Wulamu, Jean-Louis Ballais et Virginie Delorme, « L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 7 | 2013, mis en ligne le 21 septembre 2013, Consulté le 15 octobre 2013. URL : <http://physio-geo.revues.org/3633> ; DOI : 10.4000/physio-geo.3633

Éditeur : Martin, Claude

<http://physio-geo.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur : <http://physio-geo.revues.org/3633>

Ce document est le fac-similé de l'édition papier.

Tous droits réservés

L'APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE AU DOMAINE ARIDE DU XINJIANG (CHINE) : LE CAS DU BASSIN VERSANT DU KARAKASH

Maihepireti WULAMU ⁽¹⁾, Jean-Louis BALLAIS ⁽²⁾ et Virginie DELORME ⁽³⁾

(1) : Université Normale du Xinjiang, URUMQI, CHINE, chercheuse associée à l'UMR 7300 "ESPACE", Aix-Marseille Université et CNRS, AIX-EN-PROVENCE, FRANCE. Courriel : mahpirat02@hotmail.com

(2) : Université d'Aix-Marseille, UMR 7300 "ESPACE", Aix-Marseille Université et CNRS, AIX-EN-PROVENCE, FRANCE. Courriel : jean-louis.ballais@orange.fr

(3) : Fluvial.IS, BRIENNE-LE-CHATEAU, FRANCE. Courriel : laurentvirgo@yahoo.fr

RÉSUMÉ : Le bassin versant du Karakash est situé au Sud du Xinjiang, dans une zone aride. Les inondations qui se produisent l'été, presque tous les ans, détruisent les récoltes, principales sources de revenus pour la population, et entravent le développement socio-économique. La prévention des inondations doit donc y être intégrée à la gestion globale de l'eau. Notre travail a pour objectif de démontrer l'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique, mise au point en France méditerranéenne, dans le bassin versant du Karakash. La cartographie hydrogéomorphologique fournit des informations suffisantes pour permettre aux aménageurs de réaliser une planification spatiale susceptible de prévenir et de réduire les risques d'inondation.

MOTS-CLÉS : zones inondables, risques d'inondation, méthode hydrogéomorphologique, bassin versant du Karakash, Xinjiang, Chine.

ABSTRACT: The Karakash river watershed is situated in an arid zone, in the southern part of Xinjiang. In this watershed, floods occur during summer, almost each year, and destroy crops that are the main income of the population. Flooding cause damages that hinder socio-economical development. Flood prevention must be integrated at the global water management. Our work demonstrates the applicability of hydrogeomorphological method in the Karakash watershed. Hydrogeomorphological mapping provides informations that are able to permit a spatial planning to prevent and reduce flood risks.

KEY-WORDS: flood prone areas, flood risks, hydrogeomorphological method, Karakash river watershed, Xinjiang, China.

I - INTRODUCTION

Les inondations sont classées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde. Celles qui se produisent en Chine sont certainement les plus fréquentes, les plus redoutées et les plus coûteuses. La moitié environ de la population et 60 % des richesses sont concentrés dans les zones à risques d'inondation (H. DONG *et al.*, 2003). Les recherches sur cette problématique se sont focalisées sur les bassins versants du Changjiang et du Huanghe, très densément peuplés, qui subissent les inondations les plus graves et les plus dévastatrices. En revanche, dans la Région autonome ouïghoure du Xinjiang, la plus grande province du pays avec 1 660 000 km² (16 % du territoire chinois – Fig. 1), au Nord-Ouest de la Chine, les inondations ont été peu étudiées. Dans cet espace aride, très faiblement peuplé, pauvre, avec des moyens financiers et humains très limités, l'étude des inondations apparaît *a priori* moins

cruciale que dans d'autres régions. Elle revêt pourtant une importance particulière en raison du dénuement de la population, exclusivement concentrée près des cours d'eau. Les inondations se produisent l'été, durant la période des récoltes, ressource essentielle des habitants. Entre 1949 et 1993, il y a eu 391 grandes inondations, qui ont affecté 3,16 millions d'hectares de terres cultivées et un important cheptel. Près de 3 millions de personnes ont été sinistrées et 1183 sont décédées. Les dommages matériels immédiats ont atteint un montant de 237,5 millions de dollars (M.Q. YE *et al.*, 1994). Durant l'été 1996, des inondations catastrophiques, à cause de la fonte des neiges et des glaces conjuguées à des pluies torrentielles, ont touché presque tout le Xinjiang (K. ABDUKADIR, 2003). Les récents aménagements hydrauliques ont réduit le risque depuis le début du XXI^{ème} siècle. Pourtant, durant l'été 2005, les dommages causés par les inondations ont encore été considérables (L. ZHANG, 2005).



Figure 1 - Division administrative de la République Populaire de Chine et de la Région Autonome du Xinjiang.

Source : M. WULAMU (2010), inspirée de T. PAIRAULT (1996).

L'objectif de notre recherche a été d'appréhender les risques d'inondation dans le bassin versant du Karakash situé dans le district du même nom, au Sud du Xinjiang et au nord du Tibet (plateau de Qinghai-Xizang), sur le piémont nord du Karakorum et du Kunlun, au sud du désert du Takla-Makan (Fig. 2).

II - LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

La méthode hydrogéomorphologique est une méthode naturaliste et qualitative dont la finalité est l'élaboration d'un diagnostic du risque d'inondation (M. MASSON *et al.*, 1996 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2011).

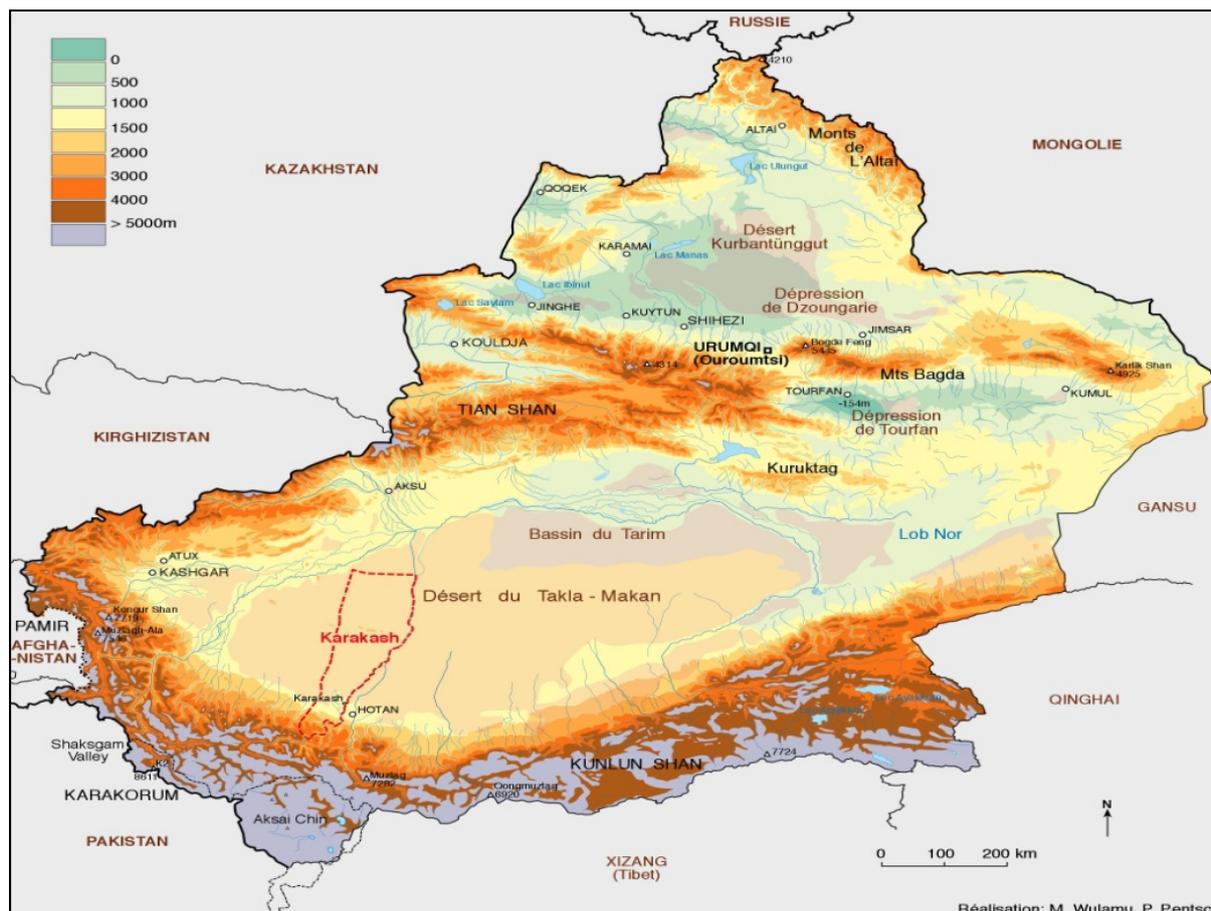


Figure 2 - Province du Xinjiang et localisation du bassin versant du Karakash.

Source : M. WULAMU (2010), fond d'après un atlas du monde publié à Moscou en 1967.

Le fondement de la méthode réside dans la distinction fréquente, à l'intérieur de la plaine alluviale fonctionnelle, de trois lits pour un cours d'eau : 1/ le lit mineur (*low flow bed* ou *low flow channel*), qui est occupé de façon pérenne, sauf exception dans les régions arides ; 2/ le lit majeur (*high water bed*), où se déversent les crues les plus importantes ; et 3/ le lit moyen (*intermediate flow channel*), intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur, façonné par les crues les plus fréquentes (Fig. 3). Un lit majeur exceptionnel (*exceptional high water bed*) est aussi parfois observé (V. DELORME-LAURENT, 2007 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2011 ; V. DELORME-LAURENT *et al.*, 2013).

La cartographie hydrogéomorphologique est le résultat de l'analyse hydrogéomorphologique. Elle débouche sur la limite des zones inondables, dont la validité a été prouvée dans l'ensemble du Midi méditerranéen français (S. CHAVE, 2002 ; C. ESPOSITO *et al.*, 2009 ; C. ESPOSITO, 2012).

III - LE BASSIN VERSANT DU KARAKASH

Le bassin versant du Karakash (Fig. 4), allongé du sud au nord, a une superficie de l'ordre de 26600 km² et il englobe les piedmonts nord des Kunlun et du Karakorum ainsi que le sud

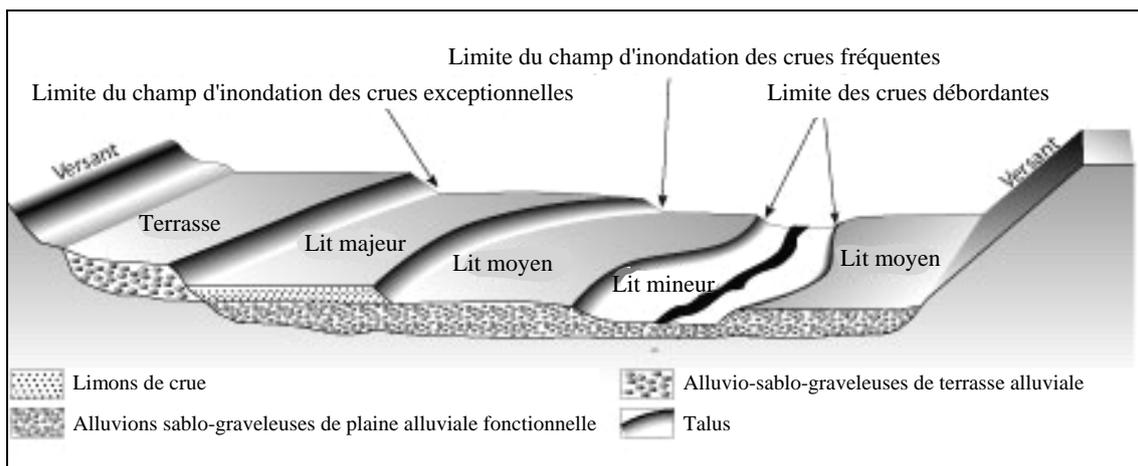


Figure 3 - Relations topographiques entre les différents lits d'un cours d'eau.

Source : J.L. BALLAIS *et al.* (2009).

du Takla-Makan. Le Karakash prend sa source principale dans le Karakorum, vers le sommet de l'Union (6682 m), sur le versant nord, où se localise la plus grande partie des glaciers et la plus forte accumulation de neige (R. COQUE *et al.*, 1991 ; P. GENTELLE, 1992). La majorité des affluents vient des Kunlun. Long de 808 km, le Karakash a un débit moyen annuel de $2,15 \times 10^9 \text{ m}^3$ (68,2 m³/sec) à Ulugata (P. MAMTIMIN *et al.*, 2005).

Dans la partie amont du bassin versant, la plus vaste (19983 km²), le cours d'eau est encaissé, sur 589 km. Il reçoit ici de nombreux affluents. Ce secteur s'étend vers l'aval jusqu'au delà du barrage d'Ulugata, à environ 2000 m d'altitude (Fig. 4). Il est inhabité et, de plus, il est interdit d'accès.

La partie moyenne s'étend du barrage d'Ulugata jusqu'au pont du Karakash (91 km). C'est un piémont de collines et de plaines (Fig. 4). La pente moyenne du lit mineur s'abaisse à 6 ‰. Le nombre et la longueur des affluents, simples torrents-oueds, se réduisent.

La partie aval s'étend du pont du Karakash jusqu'à Koxlash, à 1200 m d'altitude. Sur cette section, longue de 128 km, la pente diminue encore (1,5 ‰ – Bureau d'Hydrologie de Hotan, 2001). Comme de nombreux cours d'eau allogènes (le Nil par exemple et, près du terrain d'étude, le Yurungkash et le Keriya), le Karakash est alors totalement dépourvu d'affluents. En période de forte crue, il conflue avec le Yurungkash et prend le nom de Hotan (Fig. 4).

L'ensemble du bassin versant connaît un climat continental désertique. Dans la partie amont, la température moyenne ne dépasse pas 10 °C en été et descend entre -10 °C et -21 °C en janvier ; alors que, sur le piémont, l'été a une température moyenne de l'ordre de 25 °C (22,5 °C à Ulugata) et les températures moyennes de l'hiver sont à peine négatives (-5°C en janvier à Ulugata). Sur les plus hauts sommets, les précipitations annuelles moyennes peuvent atteindre 400 à 500 mm, mais elles diminuent rapidement avec l'altitude et ne dépassent pas 150 mm vers 4000 m. La neige représente plus de 90 % du total des précipitations et ne fond pas au-dessus de 5500 m. En dessous de 2000 m, les précipitations diminuent encore : 79 mm par an à Ulugata et 36 mm à Hotan, avec un maximum sur la fin du printemps et l'été (83 % des précipitations à Ulugata), qui coïncide avec la fonte des neiges. L'évaporation augmente globalement avec la diminution de l'altitude, mais de manière irrégulière (1885 mm par an à Ulugata, 1594 mm à Hotan, 1314 mm à Karakash) en fonction de facteurs locaux. On



Figure 4 - Bassin versant du Karakash.

Source : M. WULAMU (2010), fond d'après le rapport du Bureau d'Hydrologie de Hotan (2001).

notera l'absence de données sur la partie aval, la plus chaude et la plus sèche (Bureau d'hydrologie de Hotan, 2001).

IV - L'APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE AU XINJIANG

En Chine, la méthode hydrogéomorphologique n'est pas pratiquée. Les deux disciplines, hydrologie et géomorphologie, sont nettement séparées. Dans l'ouvrage *Géomorphologie* de Q. YAN (2005), un chapitre donne quelques indications sur le lit mineur, le lit majeur et la terrasse alluviale, mais il ne définit pas le lit moyen et du lit majeur exceptionnel. Cela signifie-t-il que cette méthode, mise au point dans le domaine climatique méditerranéen, n'est pas applicable dans des domaines climatiques extra-méditerranéens ?

Le domaine méditerranéen n'est pas le seul à avoir un régime de précipitations contrasté qui assure des débits d'amplitude extrême. L'alimentation allogène des cours d'eau du Takal Makan est cause d'une amplitude des débits et des régimes sans rapport avec le milieu aride qu'ils traversent. Le Karakash comme le Yurungkash et le Keriya, qui descendent du Karakorum et des Kunlun et vont généralement se perdre à l'aval dans les sables, ont un régime nivoglacière, qui assure des débits très forts en été (Fig. 5), lors de la fonte des neiges et des glaciers.

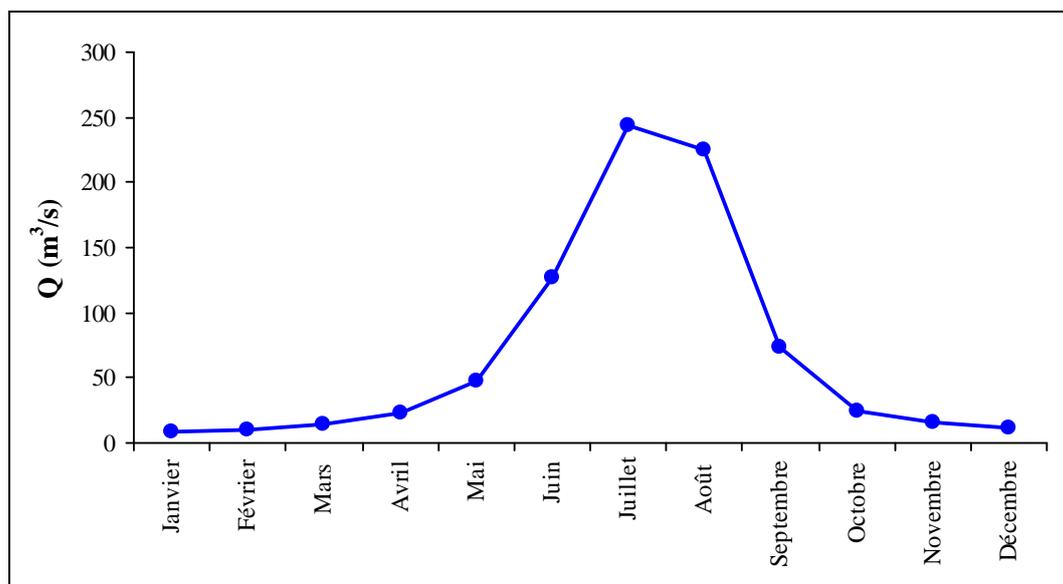


Figure 5 - Débits mensuels moyens du Karakash à la station hydrologique d'Ulugata (1957-1998).

Source : M. WULAMU (2010), d'après le rapport du Bureau d'Hydrologie de Hotan (2001).

Alors que J.P. BRAVARD et F. PETIT (1997) pensent que "*les notions traditionnelles de lit mineur et de lit majeur ne sont pas adaptées aux vallées des milieux arides*", en fait, lit mineur, lit moyen et lit majeur fonctionnent fréquemment dans les vallées des milieux arides (V. DELORME-LAURENT, 2007). La méthode hydrogéomorphologique revêt un intérêt tout particulier dans le Xinjiang pour une première approche du risque d'inondation, car elle repose sur l'observation du terrain et sa cartographie. Elle est relativement rapide par rapport à d'autres méthodes pour une région où les données chiffrées font cruellement défaut et où toute modélisation quantitative est actuellement impossible. Elle est aussi peu coûteuse, ce qui, dans une région pauvre qui dispose de moyens très faibles, est appréciable.

V - LES OUTILS DE LA CARTOGRAPHIE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE ET LEUR ADAPTATION AU CAS DU KARAKASH

1) L'indispensable image satellitaire de Google Earth et ses limites

Les images satellitaires de Google Earth ont constitué l'outil de base indispensable en raison de l'absence de photographies aériennes et de cartes topographiques aux échelles

pertinentes (1/10000 à 1/25000). Nous avons pu disposer seulement de trois cartes topographiques : celle de la préfecture de Hotan (carte administrative) à l'échelle du 1/4230000, celle du bassin versant de la rivière de Hotan au 1/2000000 et la carte topographique de Hotan au 1/750000. Ces échelles sont évidemment totalement incompatibles avec un travail de terrain pour délimiter des zones inondables. Il semblerait que des cartes topographiques à échelle beaucoup plus grande existent, mais ni les services hydrologiques, ni les établissements universitaires d'Urumqi et de Hotan n'en disposent.

Avant l'observation du terrain, nous avons donc dû sélectionner 109 images satellitaires couvrant l'ensemble du bassin du Karakash, de l'amont à l'aval. Seules ces images pouvaient permettre d'appréhender la topographie du secteur d'étude. Nous avons fait une première analyse de ces images, analyse difficile et qui n'a pas pu réduire considérablement les incertitudes sur certaines formes et sur leurs limites, en raison de l'absence de stéréoscopie qui permet une véritable délimitation préalable des unités topographiques (M. MASSON *et al.*, 1996). En particulier, les talus transversaux sont à peu près invisibles sous la végétation des oasis et c'est aussi parfois le cas des talus longitudinaux. De plus, certaines images n'étaient pas claires en raison de la présence de nuages, ou étaient de mauvaise qualité, et n'ont pas pu être utilisées. Lors de la réalisation du travail cartographique, nous n'avons pas utilisé dix images qui couvriraient la partie en amont du barrage d'Ulugata, car ce secteur est interdit d'accès et il n'était donc pas possible de vérifier les formes sur le terrain. Finalement, nous avons pu réaliser 56 cartes des zones inondables à une échelle qui varie du 1/10000 au 1/25000, du pont d'Ulugata jusqu'au village de Kawak où l'écoulement superficiel disparaît en basses eaux.

2) Les observations de terrain

Les cartes ont été vérifiées et complétées lors des diverses périodes de travaux sur le terrain par des relevés de terrain, des enquêtes orales auprès de la population locale et en utilisant le rapport du bureau d'hydrologie de Hotan chaque fois que cela a été possible (M. WULAMU, 2010).

Outre des observations ponctuelles de l'une d'entre nous (M. WULAMU) en 2005, 2006 et 2007, une mission commune de trois semaines a été réalisée en septembre 2008, au cours de laquelle les coordonnées géographiques et les altitudes ont été mesurées avec un GPS Garmin Map 60 CS.

Par rapport aux conditions offertes par le travail de terrain en France (V. DELORME-LAURENT, 2007), plusieurs difficultés supplémentaires sont apparues. Certes, comme dans le Midi méditerranéen français, la présence de cultures à fort recouvrement et les ombres portées des nombreuses haies ont obligé à de longues vérifications, mais la principale difficulté a été l'utilisation des images satellitaires pour le repérage sur le terrain, qui a constitué une perte de temps considérable. Cependant l'observation de la végétation est parfois plus facile et plus utile qu'en domaine méditerranéen puisqu'à de rares exceptions près, cette végétation est absente de l'encaissant et, en dehors des zones irriguées, se limite à une steppe très claire (Photo 1).

3) Les prélèvements et les analyses sédimentologiques

Le but des analyses sédimentologiques est de caractériser les dynamiques de mise en place des dépôts afin de préciser s'il s'agit bien d'apports alluviaux et non d'apports éoliens ou



Photo 1 - Piémont des Kunlun vers Langru. [cliché : J.L. BALLAIS, 2008]

de versant. Du fait de la variation des processus de transports d'amont en aval, chaque unité morphologique est constituée de dépôts différents qui permettent de la caractériser. Nous avons utilisé cette méthode classique pour déterminer puis caractériser les unités de la plaine alluviale fonctionnelle.

Les analyses granulométriques des échantillons ont été réalisées par l'une d'entre nous (M. WULAMU), au CÉRÈGE à Aix-en-Provence, selon le protocole de ce laboratoire : premièrement, un tamisage humide a été effectué pour séparer les trois fractions que sont les fines ($< 0,05$ mm), les sables (entre 0,05 et 2 mm) et le ballast (> 2 mm), ensuite un tamisage à sec a été effectué sur les sables et sur le ballast, quand cela s'est révélé nécessaire, afin de déterminer leur granulométrie (M. WULAMU, 2010).

VI - LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

Le linéaire de la rivière cartographiée représente environ 150 km. En combinant la topographie et l'occupation humaine, donc en termes de risques, nous l'avons découpé en trois zones : montagne-colline (16 cartes échelonnées entre 1850 m et 1480 m), piémont-oasis (30 cartes aux environs de 1300 m) et le désert (10 cartes aux environs de 1250 m) (Fig. 6).

Pour chacune de ces parties de la vallée, nous présenterons ici un exemple de carte qui permet d'appréhender sa dynamique et de délimiter les zones inondables.

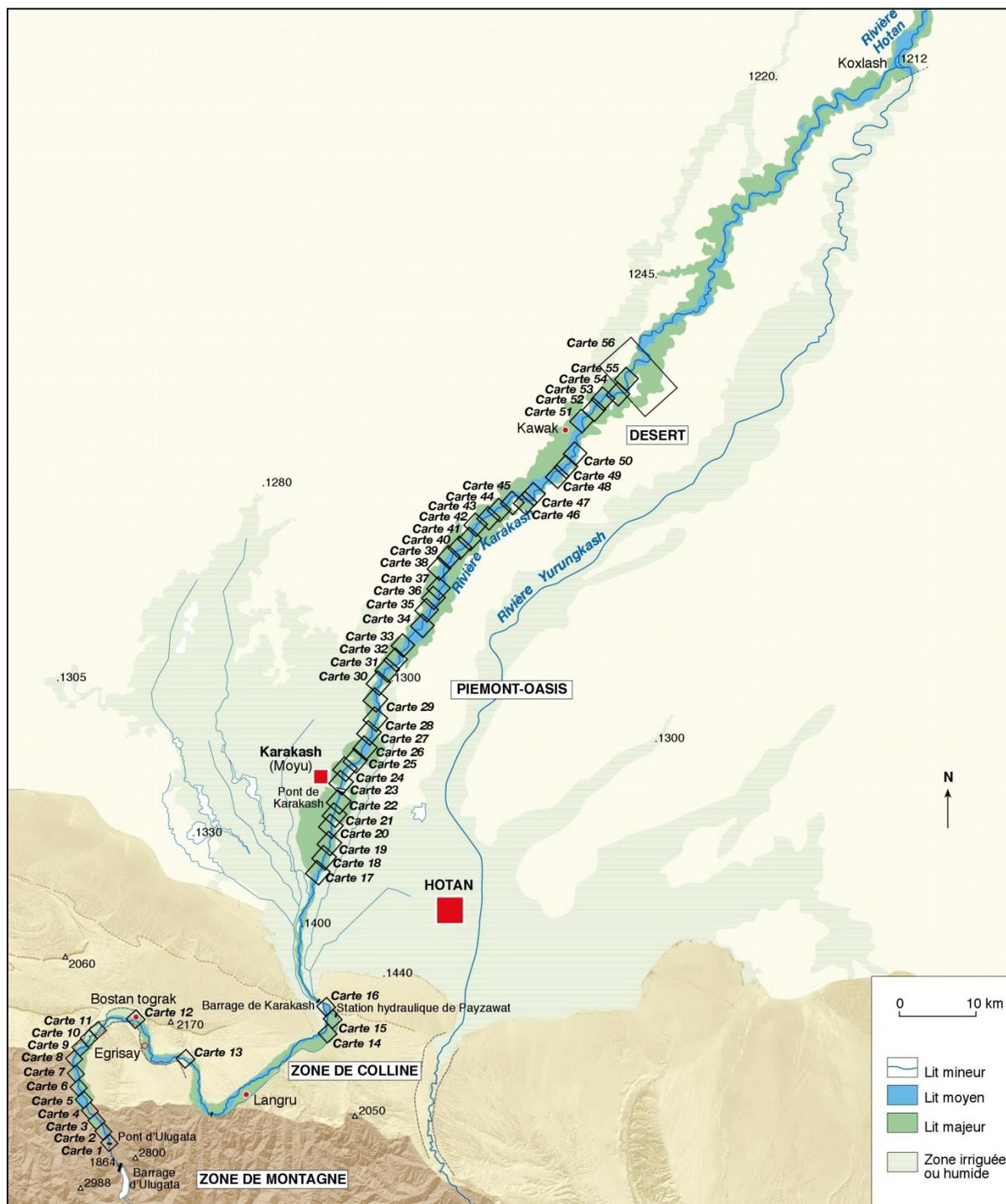


Figure 6 - Localisation des cartes de zones inondables.

Source : M. WULAMU (2010), fond d'après le rapport du Bureau d'Hydrologie de Hotan (2001).

1) Cartographie de la zone montagne-colline

Le secteur représenté (Fig. 7) se situe tout en amont du terrain d'étude (carte 1 de la figure 6). L'étagement des trois lits est particulièrement net.

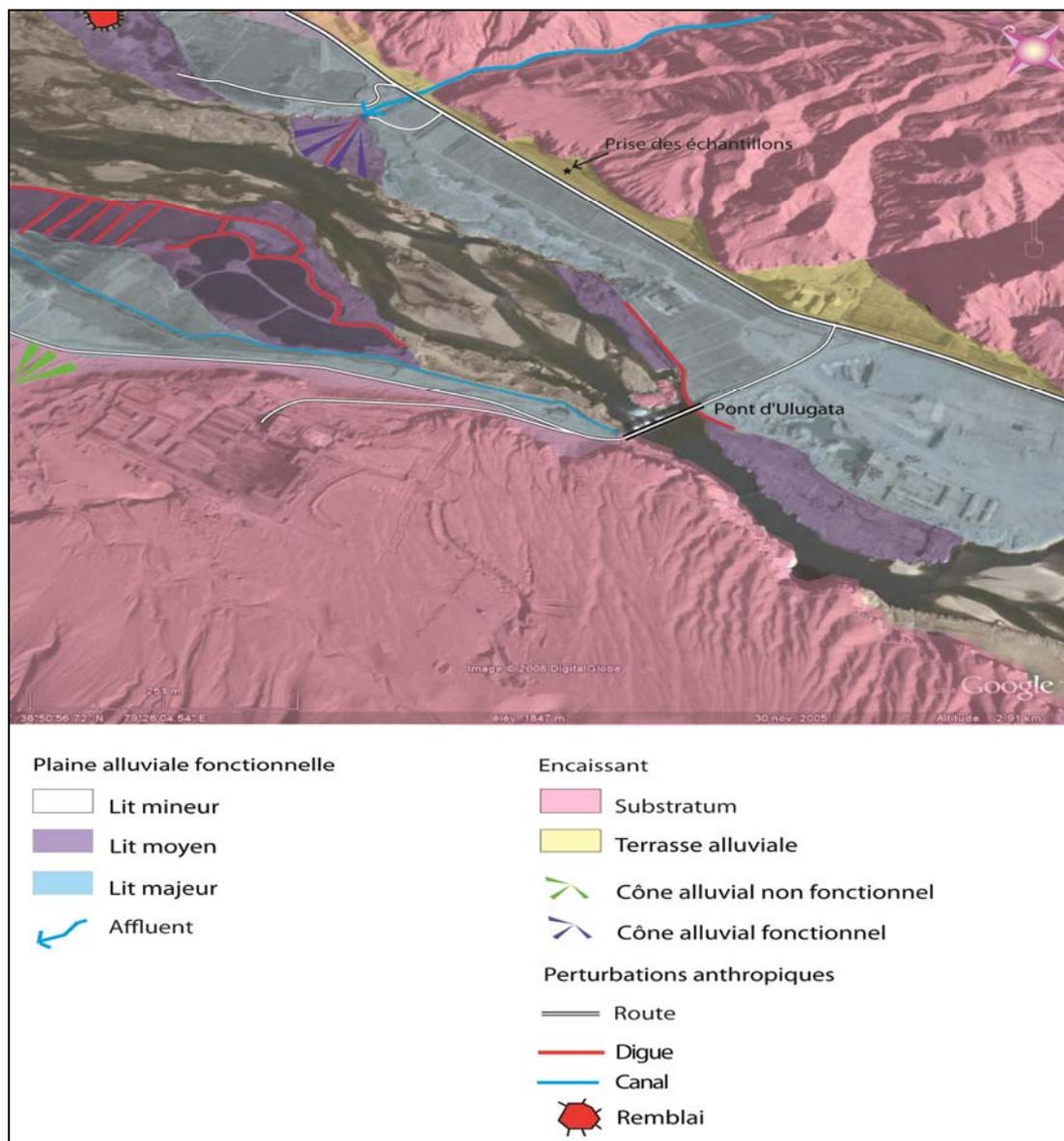


Figure 7 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash au pont d'Ulugata.

Source : M. WULAMU (2010), sur image Google Earth.

Le lit mineur ondule en tressage constitué de galets, de graviers et de blocs arrondis relevant vers l'aval. Les chenaux d'écoulement sont séparés par des affleurements du substratum sur lesquels poussent des tamaris et des herbacées. Vers l'aval, on observe le passage progressif du lit mineur rocheux au lit mineur entièrement modelé dans les alluvions.

Le lit moyen présent sur les deux rives est discontinu et étroit, mais étonnamment plat, comme plus à l'aval (J.L. BALLAIS *et al.*, 2011, p. 25). Constitué de galets et de graviers dans une matrice sableuse abondante, il domine le lit mineur par un talus haut d'environ 3 m. Sa couverture végétale est également constituée d'herbacées et de tamaris (Photo 2). La confluence de petits torrents est souvent marquée par un cône alluvial fonctionnel (R. COQUE *et al.*, 1991). On observe parfois des chenaux.



Photo 2 - Le pont d'Ulugata. Le lit mineur où affleure la roche en place et la rive droite endiguée. [cliché : M. WULAMU, 2008]

Le lit majeur, avec sa topographie horizontale, domine le lit mineur et/ou le lit moyen par un talus subvertical irrégulier haut de plusieurs mètres. Il est bien développé et composé principalement de sables accumulés sur une épaisseur de plus de 1 m. Des cultures irriguées (Photo 3) et des plantations de peupliers (*Populus euphratica*) le colonisent.

L'encaissant est constitué presque exclusivement par le substratum rocheux en rive gauche, alors qu'une étroite terrasse sableuse se maintient en rive droite, 8 à 10 m au-dessus du lit majeur. Vers l'aval, des cônes alluviaux apparaissent, organisés en une à trois générations. À la différence des formations meubles quaternaires couvertes par une steppe buissonnante très claire, le substratum rocheux est totalement dépourvu de végétation, mais porte des placages de dépôts éoliens fossiles.

Dans cette zone, les trois lits sont bien développés et la plaine alluviale fonctionnelle dépasse 1 km de large. La rive droite est plus élevée que la rive gauche, cette rive est très peu occupée par les hommes, les seuls enjeux sont une route et surtout un très gros remblai accumulé en plein lit moyen. En revanche, la rive gauche est habitée et le lit majeur est ici irrigué, cultivé et pâturé. Les graviers du lit moyen sont exploités. En conséquence, le risque d'inondation est plus grave en rive gauche qu'en rive droite.

Pour cette zone, l'enquête orale montre qu'avant la construction du barrage d'Ulugata, les inondations étaient fréquentes, voire annuelles et les dégâts importants. Depuis la construction du barrage, les inondations sont moins fréquentes et les dégâts sont limités (*cf. ci-dessous*).



Photo 3 - Le lit majeur irrigué à 1,5 km en aval du pont d'Ulugata. [cliché : J.L. BALLAIS, 2008]

2) Cartographie de la zone piémont-oasis

Dans sa partie amont, jusqu'à Langru (voir Fig. 6), cette zone présente encore parfois des caractéristiques montagnardes avec le développement de glacis et, surtout, de grands cônes (voir Photo 1) issus des torrents affluents, cônes alluviaux non fonctionnels posés sur la terrasse alluviale principale (J.L. BALLAIS *et al.*, 2011, p. 51) ou cônes alluviaux fonctionnels au moment des rares orages qui se raccordent au lit moyen (M. WULAMU, 2010, p. 34). Le lit majeur est alors réduit ou absent, tandis que le lit moyen s'observe fréquemment. Cela constitue une situation rare, qui n'avait jamais été observée auparavant, car c'est en général le lit moyen qui disparaît (*cf.* ci-dessous) et pas le lit majeur.

Toutefois, dans le cas le plus fréquent, une terrasse alluviale modelée par des paléo-chenaux encadre un lit majeur bien développé, alors que le lit moyen est absent ou réduit, et ce lit majeur, totalement cultivé, peut être rejeté d'un seul côté du lit mineur (J.L. BALLAIS *et al.*, 2011, p. 134). En somme, le lit majeur est bien développé quand la dynamique longitudinale est prédominante (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009). Grâce au grand système d'irrigation mis en place au débouché des Kunlun, de grands canaux irriguent le cône fossile et certaines terrasses alluviales. Vers l'aval, les affluents disparaissent et le réseau hydrographique se réduit à une branche unique (voir Fig. 4).

Plus à l'aval (Fig. 8 – carte 18 de la figure 6), les caractéristiques de la plaine alluviale présentent des similitudes, mais aussi des différences avec la zone de montagne-colline.

Le lit mineur est large, constitué encore de galets et de graviers, avec aussi maintenant du sable, et il évolue progressivement du tressage à l'anastomose avec des îles permanentes. Le nombre de ces îles se réduit, mais elles restent constituées de deux ensembles distincts dont le plus élevé se rattache au lit moyen par ses caractéristiques topographiques, sédimentologiques

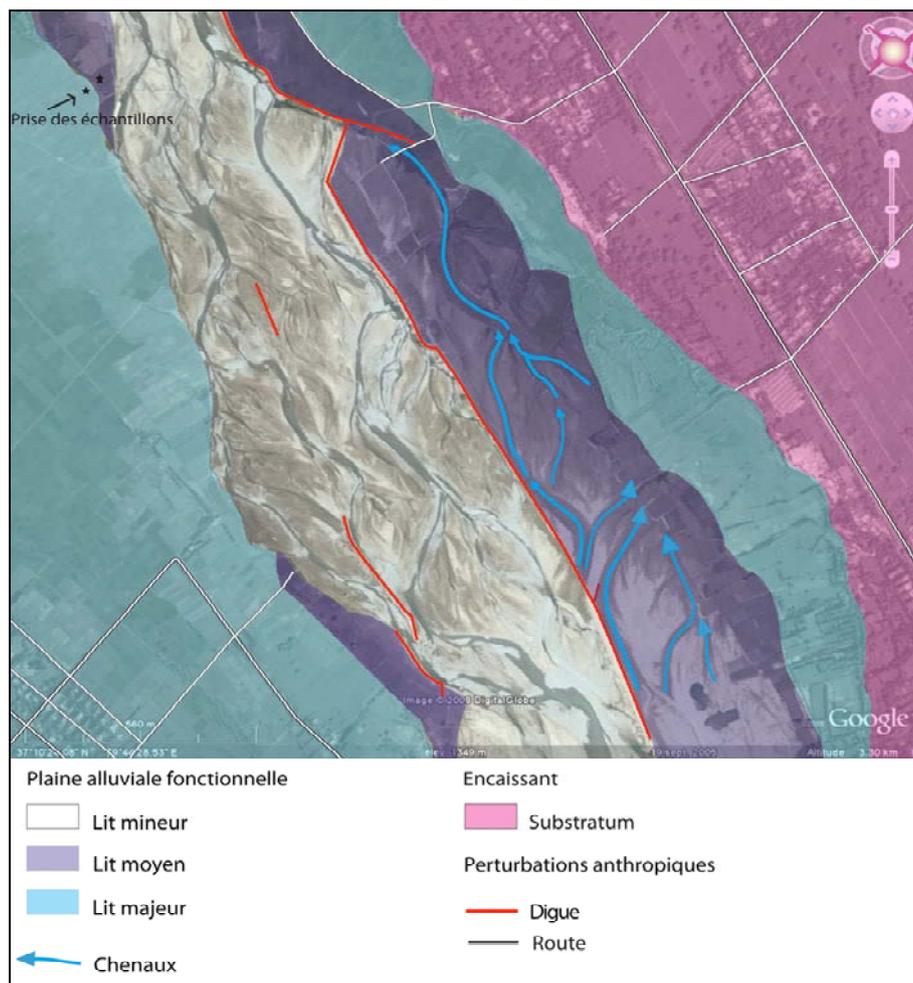


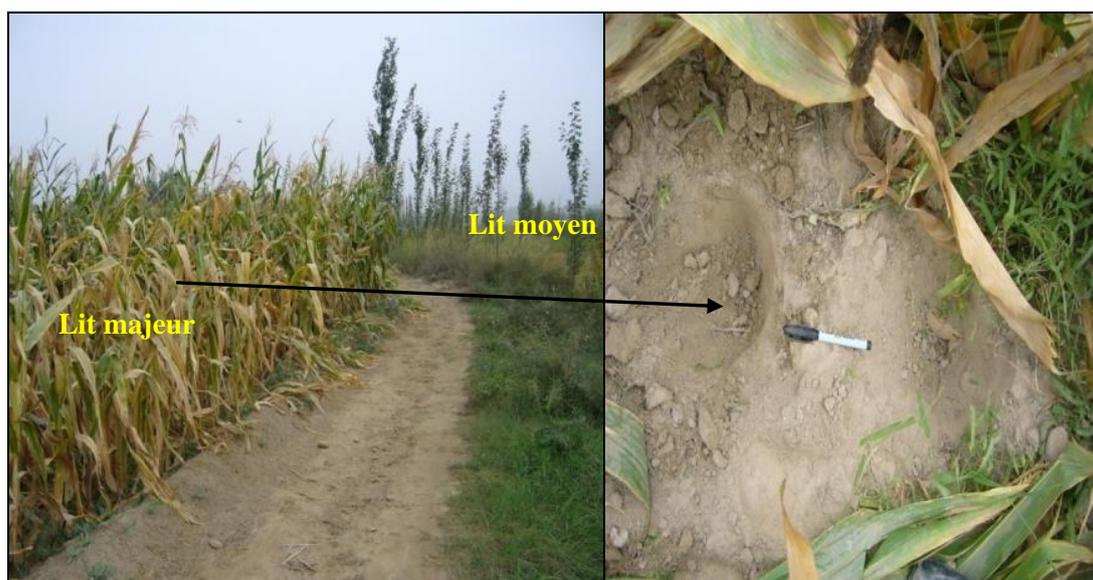
Figure 8 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash dans les districts de Karakash et Hotan.

Source : M. WULAMU (2010), sur image Google Earth.

et sa végétation herbacée exploitée en pâturages pour les chèvres et les moutons. Il est parfois divisé en casiers par des digues de gros galets entre lesquelles un dépôt fin s'est accumulé soit par limonage, soit par apport par les agriculteurs, et est cultivé en coton. Les galets disparaissent progressivement au profit des sables à l'aval du pont du Karakash.

Le lit mineur est parfois dominé par le lit moyen par un talus subvertical d'un à deux mètres sur la rive gauche, tandis que sur la rive droite son extension est limitée par une digue continue qui s'appuie sur le talus naturel. Cependant le style en tresses libres sans séparation nette avec le lit moyen-majeur existe également et le lit moyen comporte de nombreux chenaux de crue. Des échantillons ont été prélevés dans le lit moyen et dans le lit majeur sur la rive gauche (coordonnées GPS : N 37° 11' 19", E 79° 44' 34", altitude 1331 m) (Fig. 8 et Photos 4). L'analyse de l'échantillon du lit moyen (Fig. 9) montre la présence d'un dépôt de matériaux limono-argileux (82,9 %) et sableux (16,7 %). Le sédiment est bien trié ($So = 0,93$). C'est un dépôt d'atterrissement fluvial, avec une énergie d'écoulement très faible. Progressivement, vers l'aval, le lit moyen ressemble de plus en plus au lit majeur : il est devenu très plan (Photo 5), constitué d'une formation fine, couvert d'une strate à peu près continue de graminées avec quelques arbres quand il n'est pas cultivé en rizières. Son altitude relative par rapport au lit mineur ne dépasse plus un à deux mètres. Cette évolution doit être

reliée à la mise en service du barrage d'Ulugata, en 2000. En effet, depuis, le débit instantané est limité à 890 m³/s, alors qu'il atteignait précédemment jusqu'à 1390 m³/s (M. WULAMU, 2010, p. 270). D'après les observations de terrain et l'enquête orale, ce débit de 890 m³/s est suffisant pour inonder le lit moyen, mais insuffisant pour inonder le lit majeur (M. WULAMU, 2010, p. 294). En conséquence, la dynamique du cours d'eau tend à se réajuster sur ces nouvelles valeurs du débit, le lit majeur n'évolue plus mais le lit moyen devient très rapidement, en moins de dix ans, un lit majeur, avec ses caractéristiques topographiques et sédimentologiques.



Photos 4 - Champ de maïs dans le lit majeur et prise d'échantillon (district de Karakash). [clichés : M. WULAMU, 2008]

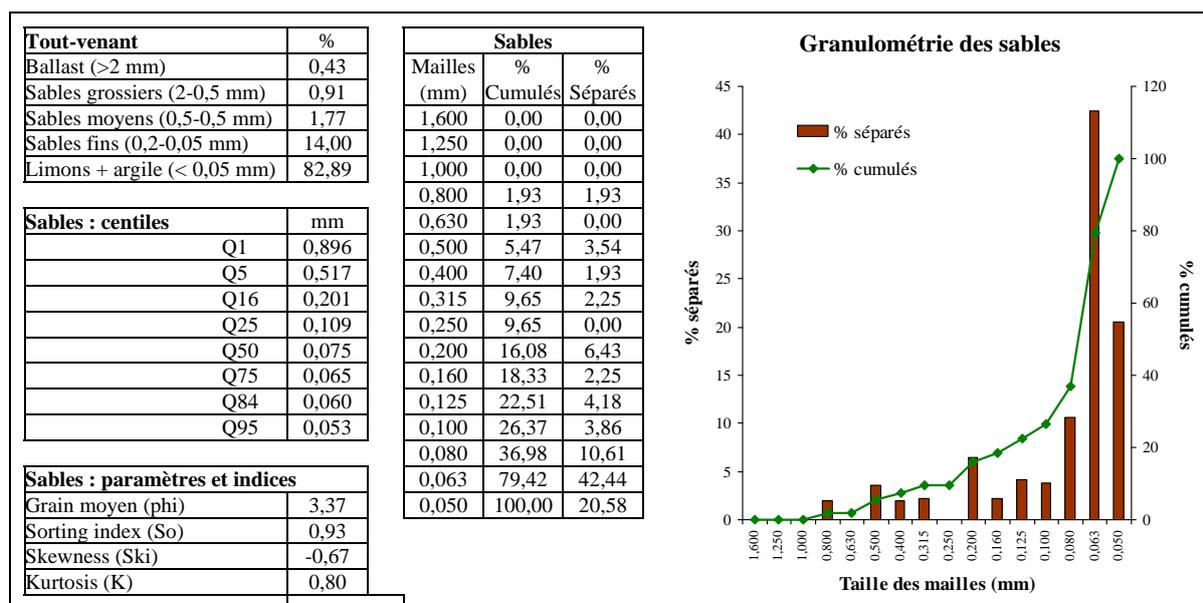


Figure 9 - Résultats des analyses sédimentologiques d'un échantillon prélevé dans le lit moyen sur le territoire du district de Karakash.

Source : M. WULAMU (2010).



Photo 5 - Lit moyen à l'amont de Bostanograk. [cliché : J.L. BALLAIS, 2008]

Le lit majeur, de part et d'autre, domine le lit mineur ou le lit moyen par un talus subvertical de un à deux mètres (Photos 4). Les résultats des analyses sédimentologiques (Fig. 10) sont les suivants : 47,4 % de sables, 52,2 % de limons et argile. Ainsi, paradoxalement, les sédiments sont un peu plus grossiers que dans le lit moyen. En revanche, dans le cas d'échantillons prélevés à Egrisay (M. WULAMU, 2010, p. 140 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2011, p. 44), situé entre les cartes 12 et 13 sur la figure 6, les matériaux du lit moyen comportent encore un peu de ballast (0,64 %) et sont plus sableux (61,9 % contre 41,6 %) et moins limono-argileux (37,4 % contre 58,4 %) que ceux du lit majeur. Mais, dans les deux cas, les différences restent faibles entre les matériaux des différents lits.

L'analyse de la granulométrie de ces lits moyens et majeurs illustre la complexité des interrelations entre les effets naturels et anthropiques. La dominante limono-argileuse du lit moyen indique que le limonage, caractéristique des rizières, est d'origine anthropique, d'où une granulométrie plus fine que celle du lit majeur. Les agriculteurs ont voulu étendre leur superficie cultivable et ont favorisé les atterrissements (J.L. BALLAIS *et al.*, 2011, p. 64). Ils ont également pris le risque de construire dans le lit majeur, parfois en surélevant leurs habitations.

La plaine alluviale fonctionnelle est devenue très large (jusqu'à plusieurs kilomètres), les reliefs bordiers disparaissent et l'encaissant n'est plus représenté que par un cône fossile du Karakash, sur lequel se concentre la plupart des villages et où apparaissent les premières dunes, encore très localisées. Constitué de sables, parfois encore creusé par des paléochenaux, il est mieux développé en rive droite, où il est limité par un talus franc, qu'en rive gauche, où il se raccorde au lit majeur par une longue pente concave. C'est d'ailleurs l'une des nombreuses caractéristiques qui suggèrent que le basculement vers l'est du bassin du Tarim se poursuit (J.P. AVOUAC et G. PELTZER, 1993).

La zone piémont-oasis concentre la majorité de la population de la vallée du Karakash. Les terres cultivées portent du maïs et des rizières, cultures vivrières qui nécessitent beaucoup

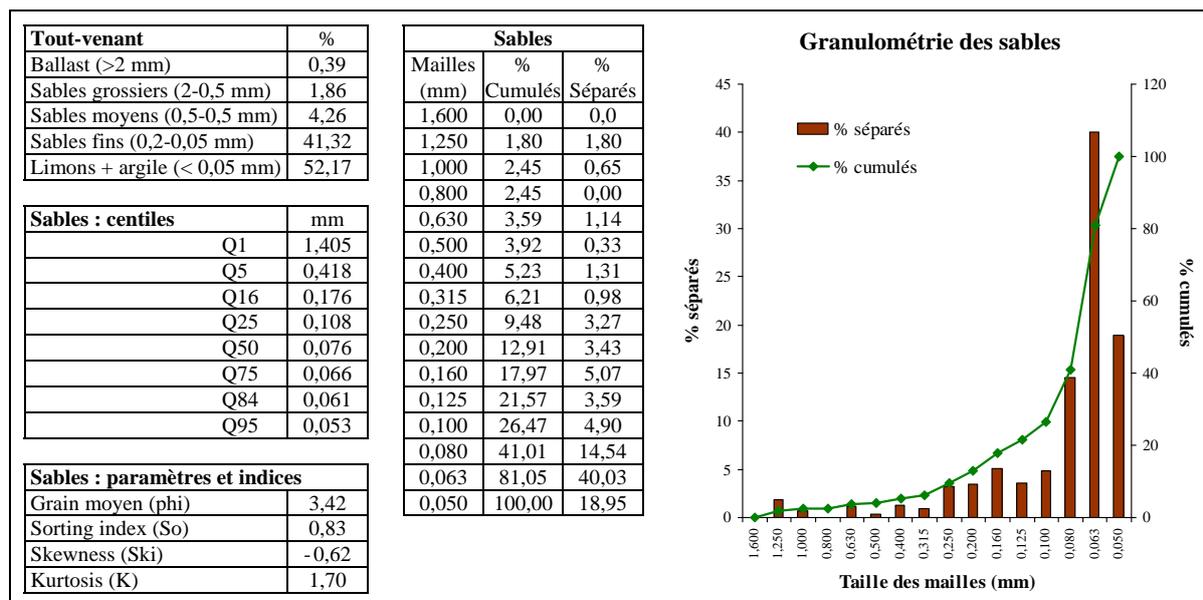


Figure 10 - Résultats des analyses sédimentologiques d'un échantillon prélevé dans le lit majeur sur le territoire du district de Karakash.

Source : M. WULAMU (2010).

d'eau, mais aussi du coton, culture industrielle. L'irrigation, comme en témoignent les travaux de grande hydraulique, est indispensable. Les pâturages pour l'élevage sont importants, en particulier dans le lit moyen. À cela s'ajoutent d'autres enjeux : les équipements (routes) et les usines. Avec l'importance des cultures et des autres activités et la présence de la population dans la vaste plaine alluviale fonctionnelle, le risque d'inondation est grave.

3) Cartographie de la zone désertique et problème des diffluences

Dans la zone désertique (Fig. 11), le lit mineur étroit est à sec et n'a que quelques flaques (Photo 6), Il présente des dilatations et des étranglements avec des chenaux multiples peu profonds à sables thixotropiques et aux berges en pente douce, séparés par des bancs sableux modelés par des *ripple-marks* ou des rides éoliennes, style intermédiaire entre le tressage et l'anabranchement. Il est formé de sables limoneux.

Le lit moyen a disparu, confondu avec le lit majeur qui lui-même tend à se confondre avec le cône fossile.

Le lit majeur domine le lit mineur par un talus vertical haut de 1,5 m. Très vaste, il est couvert par une prairie de graminées avec des tamaris (*Tamarix ramosissima*) et des roseaux (Photo 7), mais il peut être tronçonné par des accumulations dunaires (Fig. 11). Il présente un réseau complexe de larges chenaux et paléochenaux très entaillés, humides, à berges verticales, suspendus de plusieurs décimètres au-dessus du lit mineur, de sorte qu'en termes de risques, on peut les placer dans le lit moyen. Les chenaux, au tracé méandrique déjà remarqué par R. COQUE *et al.* (1991), peuvent s'écarter très loin du lit mineur, au point de former des diffluences. Parfois très profonds, ils peuvent rester en eau toute l'année, constituant des lônes (Fig. 11).

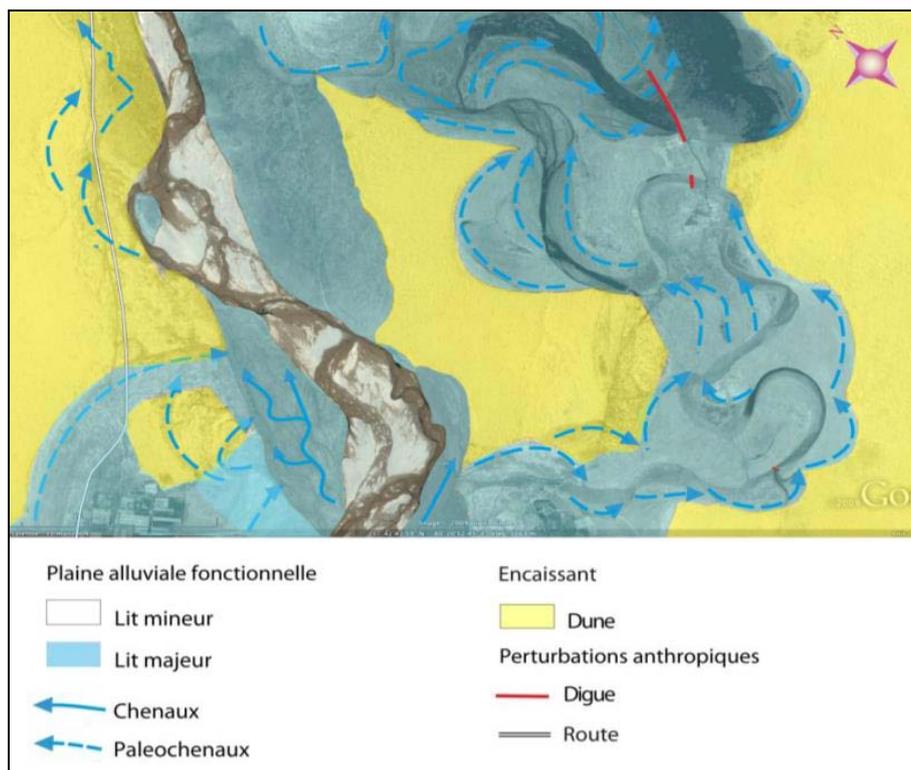


Figure 11 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash à l'aval de Kawak.

Source : M. WULAMU (2010), sur image Google Earth.



Photo 6 - Kawak : le lit mineur et ses chenaux. Sur la rive droite, lit majeur et dune.

[cliché : M. WULAMU, 2008]



Photo 7 - Kawak : lit mineur et lit majeur de rive gauche à dense végétation herbacée. [cliché : J.L. BALLAIS, 2008]

Le substratum n'apparaît plus en rive gauche, mais le cône fossile subsiste en rive droite où il domine le lit majeur d'un talus de un à deux mètres seulement. Il porte la même couverture végétale que ce lit majeur, mais avec une densité de peupliers beaucoup plus forte. Les paléochenaux, plus discontinus, moins encaissés, l'entaillent et disparaissent parfois sous les dunes, qui le recouvrent et constituent ainsi un encaissant mobile très particulier, avec de beaux barkanoïdes orientés NO-SE et des rebdous à tamaris hauts de plusieurs mètres. Des coupes permettent de bien observer le passage des dépôts des paléochenaux, modelés en rides de courant, aux stratifications obliques des dunes, à des altitudes égales ou à peine supérieures à celle du lit majeur.

Un échantillon a été prélevé dans le talus (coordonnées GPS : N 37° 42' 10", E 80° 10' 59") qui sépare un chenal du lit majeur à l'altitude de 1251 m (Photo 6). Les résultats de l'analyse granulométrique (Fig. 12) sont les suivants : 57,0 % de sables (dont 94,9 % de sables fins) et 43,0 % de limons et argile. Comme pour tous les dépôts précédents, l'asymétrie reste négative, caractéristique des lits majeurs (V. DELORME-LAURENT, 2007, p. 173 et suivantes). Rien, dans cette analyse, ne permet d'affirmer une contribution significative des sables éoliens à ces dépôts, en accord avec l'absence de "*source bordering dunes*" et malgré le blocage immédiat par la végétation du lit majeur.

Néanmoins, dans le détail de la cartographie, des problèmes spécifiques se posent, dont il faut tenir compte. Il s'agit de certains apports éoliens, postérieurs à une grande inondation, et qui peuvent masquer la limite entre le lit majeur et l'encaissant, ce qui peut introduire une incertitude et des difficultés de cartographie de vastes zones d'épandage. C'est dans cette zone que l'adaptation de la méthode hydrogéomorphologique est la plus nécessaire, mais les principes de cette méthode n'y sont pas remis en cause. Contrairement à d'autres cours d'eau désertiques, le Karakash ne présente pas d'anabranchement comme la Cooper Creek australienne

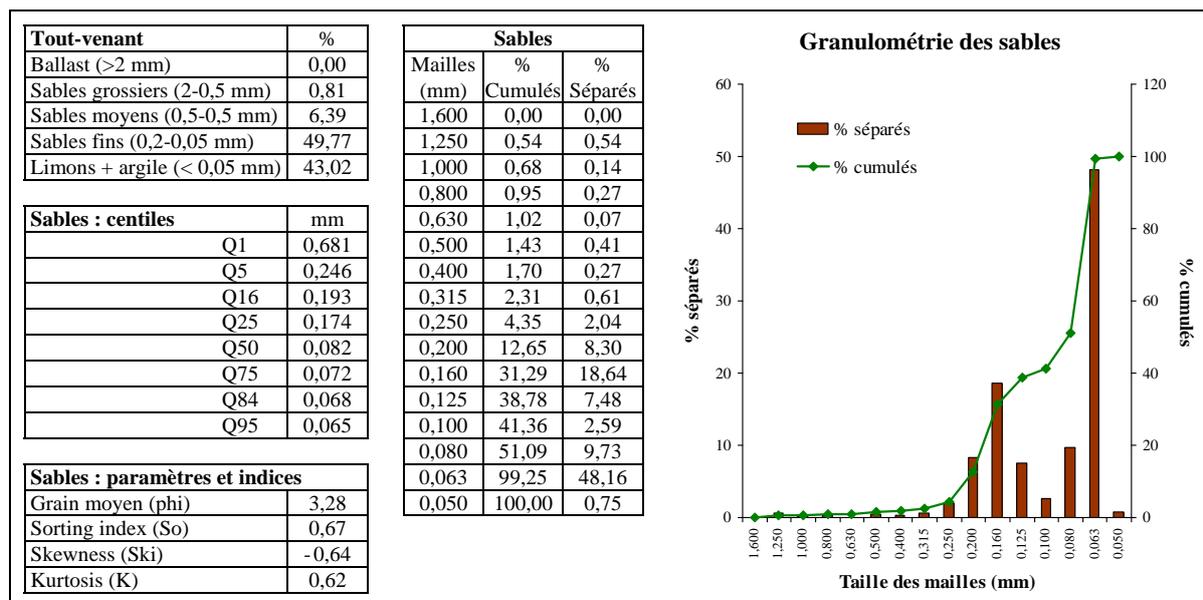


Figure 12 - Résultats des analyses sédimentologiques d'un échantillon prélevé dans le talus du village de Kawak.

Source : M. WULAMU (2010).

(G.C. NANSON et A.D. KNIGHTON, 1996), ni d'épandage-maader comme, par exemple, l'oued Melah (Chott Rharsa, Tunisie) : la distinction entre lit mineur et lit majeur reste toujours nette et on n'observe pas de chenaux libres à fort déplacement latéral. Il ne s'agit donc pas non plus d'un vrai "bouchon dunaire" comme sur l'oued Makhrouga dans le sud tunisien, par exemple, puisque les grandes crues vont rejoindre non seulement le Yurungkash (voir Fig. 4) mais aussi le Tarim (R. COQUE *et al.*, 1991).

Dans cette zone désertique, et à la différence partielle des deux zones d'amont, les inondations sont toujours bienvenues pour la mise en culture car, encore plus qu'au sud, l'irrigation est absolument nécessaire. Il s'agit d'ailleurs d'une zone pionnière avec des villages très récents situés hors de la zone inondable et qui souffrent plus du manque d'eau que des inondations.

VII - CONCLUSION

Dans les deux parties amont, le cours d'eau est pérenne et l'on retrouve donc les trois lits habituels des cours d'eau à régime contrasté, même si le climat est désertique. En revanche, le lit moyen disparaît à l'aval, où le cours d'eau devient saisonnièrement intermittent et où le niveau de base est variable du fait de l'évolution des dunes.

Des trois zones, la montagne-colline, le piémont-oasis et le désert, c'est dans la zone du piémont-oasis que le risque d'inondation est le plus élevé car, malgré l'endiguement, c'est la partie où le débit de crue de la rivière, encore important, cause le plus de dégâts dans un territoire densément peuplé, fortement aménagé et mis en valeur.

Dans le bassin versant du Karakash, les aménagements hydrauliques ont commencé en

1950 et les travaux les plus importants ont été terminés en 2000. L'enquête orale auprès des populations riveraines a montré que depuis 2000, c'est-à-dire depuis la mise en service du barrage hydroélectrique d'Ulugata, le lit majeur n'a pas été inondé. La régulation du débit du cours d'eau a permis d'écarter les crues, en limitant leur débit à $890 \text{ m}^3/\text{s}$ (M. WULAMU, 2010, p. 270), et donc d'éviter des dégâts importants. Cet aménagement, s'il ne supprime pas l'aléa, modifie le fonctionnement de la plaine alluviale et diminue la vulnérabilité des populations et de leurs activités. Faute de statistiques aussi précises que pour le Keriya, plus à l'est (P. GENTELLE, 1992), il n'est pas possible de mettre en évidence le rôle d'une éventuelle diminution de la propagation des crues dans le Takla-Makan. Mais cette protection est limitée, alors que les aménagements ont pour conséquence le développement socio-économique. L'augmentation importante de la population et la multiplication des activités entraînent un accroissement de la vulnérabilité, surtout que les hommes ont tendance à s'installer de plus en plus près de la rivière.

Ces aménagements sont récents et la culture du risque reste présente dans la population locale. Durant les mois d'avril, mai et juin, avant la période des crues et pendant les crues, chaque famille participe à la lutte contre les inondations pour protéger les terres cultivées. C'est une obligation collective. La population ramasse des galets, des branchages, du sable et divers matériaux de récupération pour bâtir ou consolider les digues. Pour la fabrication des gabions, l'État fournit les filets de fer. Tout est fait par la population paysanne, manuellement et gratuitement durant trois mois, presque toutes les années, car remblais et digues sont fréquemment emportés par les inondations. La population a le sentiment d'efforts inutiles, car ces travaux doivent être refaits tous les ans, en raison de leur fragilité faute de moyens techniques et financiers suffisants.

Face à l'aggravation récente de la vulnérabilité aucun plan de prévision, de prévention et de gestion des risques n'a encore été établi.

La cartographie hydrogéomorphologique, enrichie par des enquêtes auprès des populations, fournit des informations sur la dynamique de la rivière qui permettent de délimiter les zones inondables. Elle constitue en cela un outil d'aide à la décision, car elle apporte des éléments pour déterminer la vulnérabilité au risque et pour apprécier ce risque en fonction de l'aléa. Mais elle doit être complétée par la cartographie des activités humaines, la superposition des deux cartographies débouchant sur l'appréhension de la vulnérabilité, à partir de laquelle les choix de gestion du risque peuvent être faits. L'enjeu est alors de parvenir à une gestion équilibrée entre développement et préservation des ressources naturelles, ce qui est particulièrement délicat dans un territoire aride où les équilibres sont particulièrement fragiles et les ressources déjà surexploitées. Dans cette perspective, les fonctions écologiques des plaines alluviales doivent être prises en compte, alors qu'elles sont souvent oubliées au bénéfice de leurs fonctions économiques.

Les informations disponibles sont suffisantes pour réaliser une planification spatiale en vue de réduire et/ou de prévenir le risque d'inondation dans la partie piémont-oasis de la vallée du Karakash, la plus peuplée et la mieux mise en valeur, donc la plus vulnérable. La méthode pourrait être transposée aux autres bassins versants du Xinjiang (M. WULAMU, 2010).

Remerciements : Nous sommes reconnaissants à Madame Doriane SABATIER, qui nous a permis de réaliser les analyses granulométriques au CÉRÈGE, et à Monsieur Patrick PENTSCH,

de l'UFR de Géographie de l'Université de Provence, qui a contribué à la réalisation des cartes, et notamment de celle de la province du Xinjiang.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDUKADIR K. (2003) - *Rapport sur les inondations du Xinjiang*. Rapport du Service Régional d'Hydrologie, non publié, 8 p., en chinois.
- AVOUAC J.P. et PELTZER G. (1993) - Active tectonics in Southern Xinjiang, China: analysis of terrace riser and normal fault scarp degradation along the Hotan-Qira fault system. *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, n° B12, p. 21 773-21 807.
- BALLAIS J.L., CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C. (2009) - Hydrogéomorphologie et inondabilité. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, n° 1, 2007, p. 75-84.
- BALLAIS J.L., CHAVE S., DUPONT N., MASSON É. et PENVEN M.J. (2011) - *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Physio-Géo, collection "Ouvrages", 165 p., en ligne.
- BRAVARD J.P. et PETIT F. (1997) - *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*. Édit. Armand COLIN, Paris, 222 p.
- Bureau d'Hydrologie de Hotan (2001) - *L'analyse de la ressource en eau et hydrologie de la rivière de Karakash*. Rapport du Service Régional d'Hydrologie, non publié, 130 p, en chinois.
- CHAVE S. (2002) - Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemple de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, n° 4, p. 297-306.
- COQUE R., GENTELLE P. et COQUE-DELHUILLE B. (1991) - Observations géomorphologiques préliminaires et désertification dans le piémont nord de la chaîne des Kunlun (région de Hétian et Yutian) et dans la marge sud du désert du Taklamakan (Chine). *Revue de Géomorphologie Dynamique*, n° 1, p. 1-27.
- DELORME-LAURENT V. (2007) - *Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Thèse de l'Université de Provence, 417 + 394 p.
- DELORME-LAURENT V., CHAVE S., ESPOSITO C. et BALLAIS J.L. (2013) - Quatre lits pour un cours d'eau ? L'émergence du lit moyen et du lit majeur exceptionnel. *Actes du colloque "Au fil de l'eau"* (Clermont Ferrand, 2009), p. 243-266.
- DONG H., DONG G. et DING G. (2003) - Appréciation des risques d'inondation par le SIG. *In : Le peuple de la rivière de Changjiang (Yangtsé)*, Wu Han, vol. 34, n° 6, p. 49-51, en chinois.
- ESPOSITO C. (2012) - *Crue du 15 juin 2010 dans le Var. Comparaison des limites de zones inondables connues avec les limites des zones inondées*. CÉTÉ Méditerranée, Rapport, Aix-en-Provence, 129 p.
- ESPOSITO C., CHAVE S., BALLAIS J.L. et DELORME-LAURENT V. (2009) - Hydrological mapping and recent floods in France. *Actes de la Ninth international conference on the Mediterranean coastal environment* (Sochi, Russie), p. 1053-1064.

-
- GENTELLE P. (1992) - Une géographie du mouvement : le désert du Taklamakan et ses environs comme modèle. *Annales de Géographie*, vol. 101, n° 567, p. 553-594.
- MASSON M., GARRY G. et BALLAIS J.L. (1996) - *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Éditions Villes et Territoires, Paris, 100 p.
- MAMTIMIN P., ABLIZ A., ALIM Y. et IMIN I. (2005) - Analyse des relations hydriques entre débits et précipitations au Karakash. *Géographie des zones arides*, Xinjiang, Urumqi, n° 1, p. 57-62, en ouïgour.
- NANSON G.C. et KNIGHTON A.D. (1996) - Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 21, p. 217-239.
- PAIRAULT T. (1996) - Les régions chinoises : industrialisation inégale et développements divergents. *Revue Tiers-Monde*, vol. 37, n° 147, p 548-568.
- WULAMU M. (2010) - *Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : cas du Karakash-Darya*. Thèse de l'Université de Provence, 345 p.
- YAN Q. (2005) - *Géomorphologie*. Publié à Pékin, 250 p., en chinois.
- YE M.Q., LI J.F. et CHEN Y.N. (1994) - *Recherche sur les catastrophes naturelles dans le Xinjiang*. Publié à Pékin, 300 p, en chinois.
- ZHANG L. (2005) - L'inondation. *Le quotidien du Xinjiang*, 17 août 2005, en chinois.

Article reçu le 5 février 2013.

Accepté après révision le 18 septembre 2013.

Mis en ligne le 21 septembre 2013.