

5. Cartes des phénomènes d'inondation de deux bassins versants marocains: problèmes méthodologiques

par

Emmanuel REYNARD¹, Gabriela WERREN¹, Mohamed LASRI², Khalid OBDA²
& Yaya EL KHALKI³

Résumé.—REYNARD E., WERREN G., LASRI M., OBDA K. & EL KHALKI Y., 2013. Cartes des phénomènes d'inondation de deux bassins versants marocains: problèmes méthodologiques. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 71-81.

La cartographie des phénomènes constitue une étape essentielle de la réalisation de cartes de dangers. Cet article présente les problèmes méthodologiques liés à la réalisation d'une carte des phénomènes d'inondation dans les bassins versants des agglomérations de Fès et Beni Mellal au Maroc. L'étude s'est notamment heurtée à la nécessité d'élaborer une légende adaptée au milieu semi-aride méditerranéen, à l'indigence des données hydrologiques, à la qualité très variable des fonds topographiques, à l'urbanisation rapide qui modifie constamment le contexte et à la taille différente des deux bassins versants étudiés, qui a nécessité d'adapter la légende pour chacune des deux zones.

Mots clés: Risque d'inondation, carte des dangers, carte des phénomènes, Maroc.

Abstract.—REYNARD E., WERREN G., LASRI M., OBDA K. & EL KHALKI Y., 2013. Map of flood phenomena in two Moroccan watersheds: methodological issues. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 71-81.

Cartography of phenomena is one of the main steps in the process of hazard map elaboration. This paper discusses methodological issues related to the elaboration of maps of flood phenomena in two urban watersheds in Morocco: Fez and Beni Mellal. The main problems were the necessity to use a mapping legend adapted to Mediterranean semi-arid environments, the availability of hydrological data, the poor quality of base maps, the rapid urban growth that constantly modifies the context, and, finally, the different size of the studied watersheds, that necessitated to adapt the legend for each of the two areas.

Keywords: Flood risk, hazard map, phenomena map, Maroc.

¹Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bât. Géopolis, CH-1015 Lausanne; tél.: +41 (0)21 692 30 65.

E-mail: emmanuel.reynard@unil.ch

²Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales et d'Aménagement (LAGEA), Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université de Fès-Saïs, Route d'Imouzzer, 30000 Fès, Maroc.

³Département de Géographie, Université de Beni Mellal, FLSH, Avenue Ibn Khaldoun, BP 524, Beni Mellal, Maroc.

INTRODUCTION

En Suisse, l'élaboration de cartes de dangers est devenue au cours des dernières décennies un instrument incontournable de la protection contre les dangers naturels (ZIMMERMANN *et al.* 2005, KUNZ & HURNI 2008). Sur fond de changement climatique mais aussi socio-politique et démographique, la question des risques liés aux aléas naturels se pose de plus en plus dans les pays en voie de développement tels que le Maroc (EL FOUNTI 2003). Dans ce cadre, une initiative de la Direction du Développement et de la Coopération suisse (DDC) vise un transfert de savoir-faire dans le domaine du risque, par le développement de cartes de dangers d'inondation dans des bassins versants urbanisés.

Cet article est centré sur la mise en œuvre de la méthodologie développée en Suisse et sur les adaptations nécessaires dans un environnement naturel et socio-économique différent. Quels défis faut-il relever et dans quelle mesure la méthode s'adapte-t-elle à la réalité marocaine? Nous développons cette thématique en analysant les résultats de la première phase du projet qui avait pour objectif l'élaboration d'une carte des phénomènes d'inondation.

LE PROJET ET LES TERRAINS D'ÉTUDE

La DDC est engagée au Maroc depuis 2008 dans des projets destinés aux migrants de passage et des mesures de prévention des catastrophes naturelles. Dans ce second domaine, les actions portent principalement sur la prévention, la mise en place d'équipes locales de sauvetage (ZUMSTEIN 2010) et le transfert de savoirs. L'un des volets du programme de la DDC au Maroc vise à élaborer une carte indicative des dangers hydrologiques dans les bassins versants des agglomérations de Fès et de Beni Mellal (figure 1).

L'étude a été confiée conjointement au Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales et d'Aménagement (LAGEA) de l'Université de Fès et à l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL). Elle a reçu également l'appui du Département de Géographie de l'Université de Beni Mellal. Elle est réalisée en plusieurs étapes: (1) l'élaboration d'une carte des phénomènes, (2) l'analyse hydrologique des bassins versants, (3) l'élaboration d'une carte de la vulnérabilité et, finalement, (4) d'une carte indicative des dangers d'inondation au 1: 25'000. L'étude doit aboutir à la rédaction de recommandations en vue de la gestion des risques d'inondation.

Les résultats préliminaires ont fait l'objet de deux publications présentant les principales caractéristiques hydrogéomorphologiques des deux bassins versants (LASRI *et al.* 2011, WERREN *et al.* 2012). Les deux bassins versants sont très différents du point de vue de la surface et des caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques.

Le bassin versant de l'oued Fès couvre une surface de 879 km² et se compose de trois unités topographiques différentes (figure 2): le causse du Moyen Atlas au sud, formé de plateaux étagés du sud au nord entre 2020 et 1000 m, le plateau du Saïs, qui représente la partie la moins élevée du bassin versant (600 à 400 m) avec une douce inclinaison (0.1%) du sud vers le nord, et les Rides pré-rifaines, au nord, qui forment une montagne d'altitude moyenne (900 m), surplombant la vallée de l'oued Fès (altitude Minimale: 200 m) par des

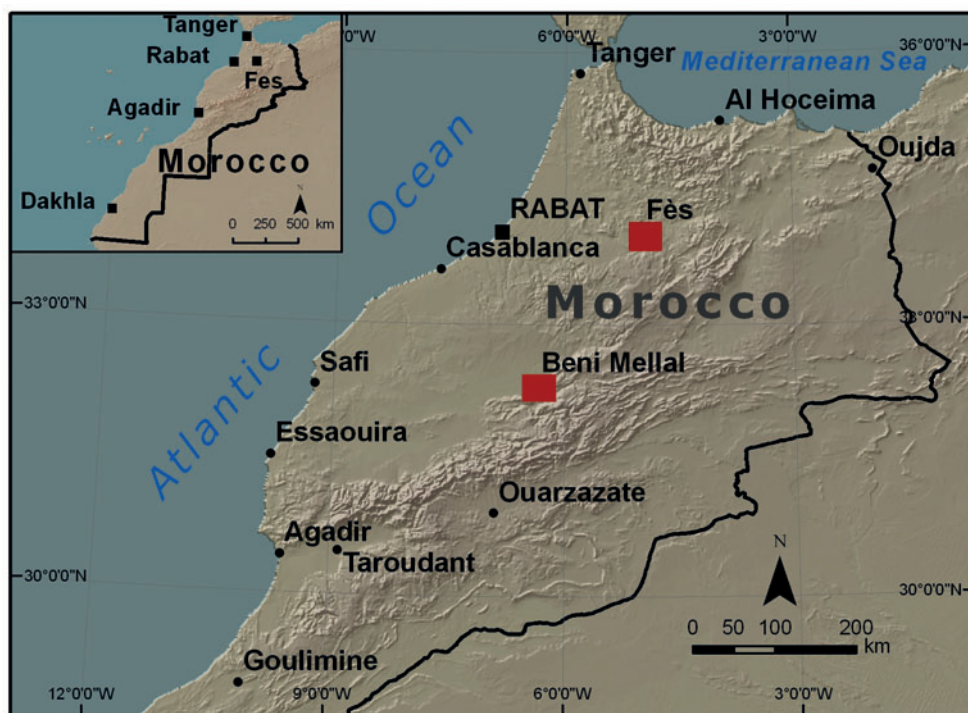


Figure 1.—Situation des deux bassins versants étudiés.

Localisation of the two studied watersheds.

versants raides et ravinés. La pluviométrie moyenne est comprise entre 979 mm par an sur le causse au sud et 500 mm à Fès, avec une très forte irrégularité intra- et interannuelle. Le temps de concentration des oueds est compris entre 1 h et 5 h selon les affluents de l'oued Fès (LASRI *et al.* 2011).

La ville de Beni Mellal est située à l'exutoire de quatre petits bassins versants de montagne (figure 3), d'est en ouest, les oueds Sabek (26.1 km²), Aïn El Ghazi (14 km²), El Handak (31.1 km²) et Kikou (63.7 km²). Les altitudes sont comprises entre 450 m et 2411 m. Les quatre oueds ont creusé des canyons spectaculaires, avec des vallées amont aux versants très raides et à la végétation très dégradée (WERREN *et al.* 2012). La pluviométrie est relativement faible, avec des moyennes annuelles de l'ordre de 617 mm par année à El Ksiba (1050 m) et de 415 mm à Beni Mellal (537 m). Comme dans le bassin de l'oued Fès, la variabilité intra- et interannuelle est très élevée, mais ici, vu la taille et la compacité des bassins versants, ainsi que la dégradation des versants, les temps de concentration des crues sont très courts, de l'ordre de 15 à 30 minutes sur les petits affluents et de moins de deux heures sur les oueds principaux.

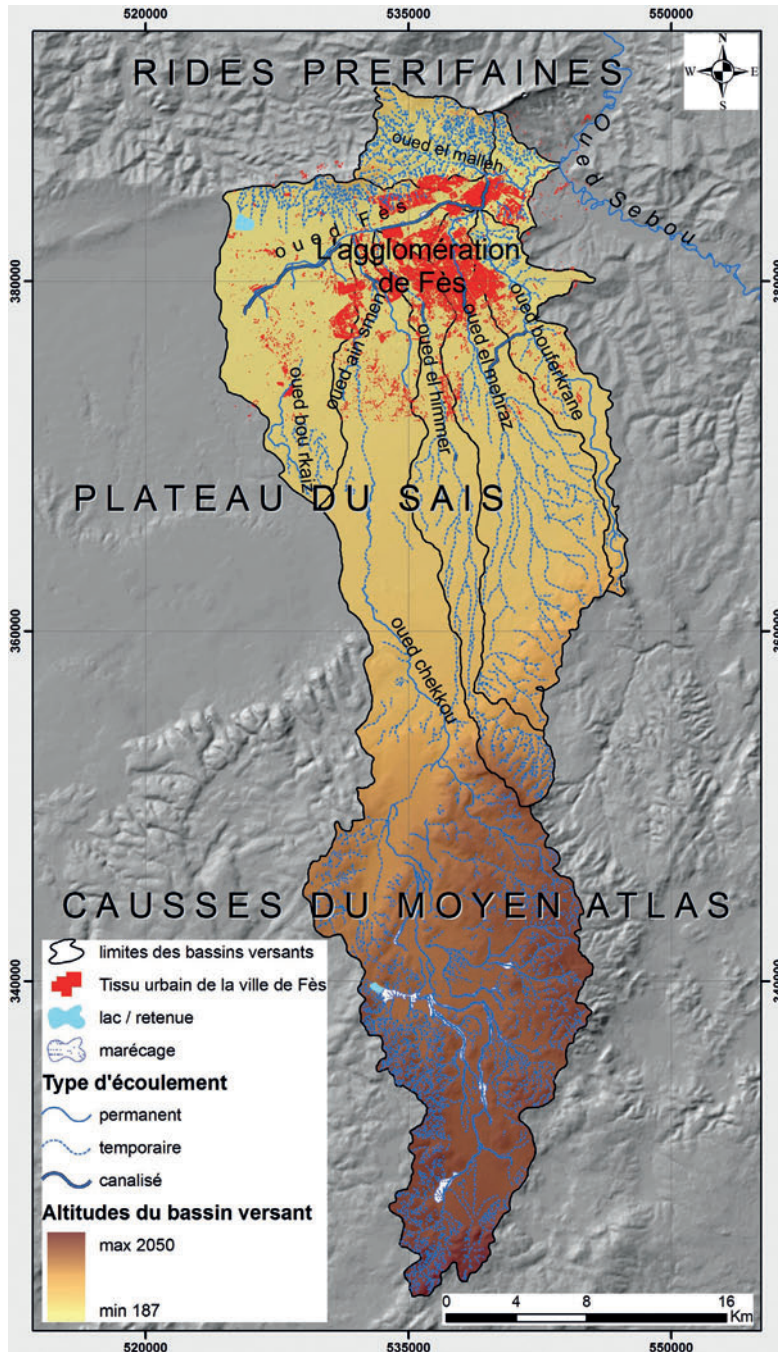


Figure 2.—Caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques du bassin versant de l'oued Fès.
Hydrological and geomorphological features of oued Fez watershed.

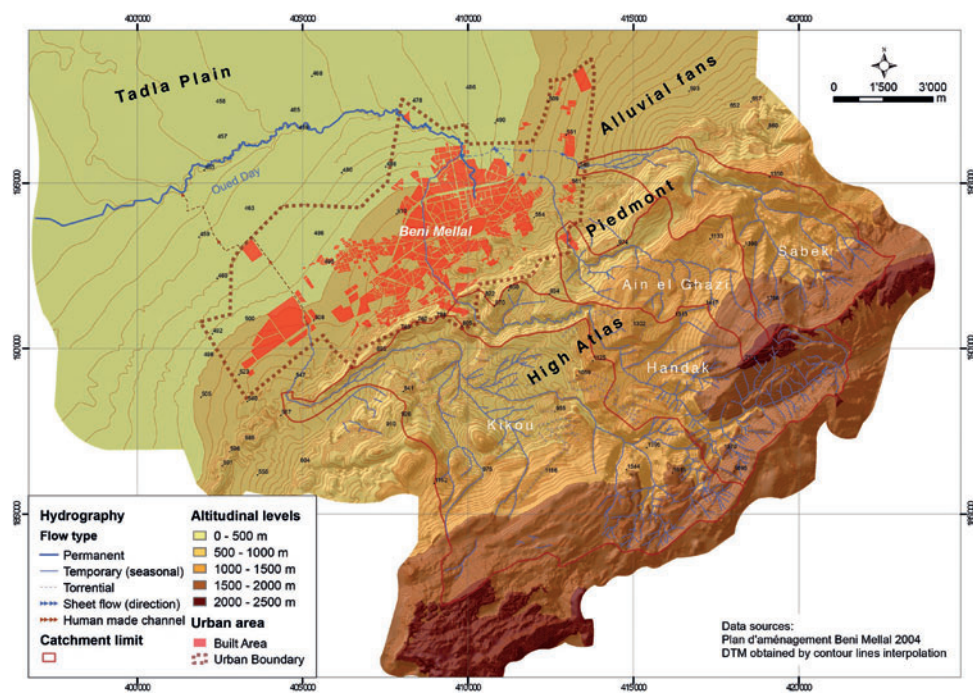


Figure 3.–Caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques des bassins versants de la région de Beni Mellal.

Hydrological and geomorphological features of watersheds in Beni Mellal area.

LA CARTE DES PHÉNOMÈNES

L'élaboration de la carte

La cartographie des phénomènes a pour but une analyse détaillée des témoins laissés par des événements à forte intensité et en même temps, elle sert à désigner les sites critiques du point de vue du danger naturel (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995). Dans les deux bassins versants étudiés, la carte des phénomènes joue un rôle central en vue de l'élaboration de la carte indicative des dangers d'inondation dans la mesure où le manque de données hydrologiques limite les possibilités de modélisation hydrologique et hydraulique. Deux approches complémentaires principales ont été adoptées.

La première est la méthode suisse de cartographie des phénomènes (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995). Ses principes de base ont été retenus, soit la mise en carte de tous les éléments d'ordre géomorphologique, hydrologique ou anthropique qui ont un rôle dans le développement ou l'amplification d'un événement de crue et désigner les lieux critiques pour l'évolution d'un événement (WERREN *et al.* 2012). La seconde est la méthode hydrogéomorphologique, développée en France, qui consiste à étudier finement la morphologie des plaines alluviales et à retrouver sur le terrain les limites physiques associées aux différentes gammes de crues qui les ont façonnées (MASSON *et al.* 1996,

BALLAIS *et al.* 2005, BALLAIS *et al.* 2011). Cette méthode a été privilégiée pour les secteurs situés en amont de la ville de Fès qui présentent une morphologie de plaine alluviale. La délimitation des unités hydrogéomorphologiques s'est arrêtée au niveau des lits majeurs en raison de la grande incertitude concernant les lits moyens dont les limites sont plus ou moins floues à cause des travaux de labour, notamment dans la partie basse de la plaine. A la différence de la méthode d'origine, qui utilise principalement des photos aériennes, la cartographie de la plaine alluviale a été réalisée sur le terrain, à l'aide d'un instrument de cartographie mobile.

Une autre adaptation a été faite pour le terrain de Beni Mellal, qui est constitué principalement de larges cônes alluviaux datant du Quaternaire ancien, qui induisent un comportement hydrogéomorphologique spécifique marqué par des écoulements en nappe. Dans ces zones, nous nous sommes basés sur la méthode américaine du National Research Council (NRC) conçue pour les cônes alluviaux (NRC 1996). Nous nous sommes également appuyés sur la méthode géomorphologique intégrée espagnole, qui vise à délimiter des zones de danger en fonction de l'extension spatiale d'événements représentatifs (FERNANDEZ-LAVADO *et al.* 2007, FURDADA *et al.* 2008). Finalement, certains éléments de la légende élaborée dans le cadre de ce projet ont été tirés de la méthode de cartographie du risque de CAMARASA BELMONTE & SORIANO GARCIA (2008) qui attribue des degrés de dangerosité aux différentes formes du relief.

A partir de ces différentes bases méthodologiques, une légende spécifique qui tient compte des caractéristiques hydrogéomorphologiques des deux terrains étudiés a été élaborée. Elle met en évidence les éléments naturels et anthropiques représentatifs pour la compréhension de la problématique des inondations dans chacun des cas.

Trois contextes hydrogéomorphologiques ont été distingués: le contexte de vallée (commun aux deux terrains), les plaines alluviales (sur l'oued Fès) et les cônes alluviaux (spécifiques à Beni Mellal). Pour chaque type d'environnement, des formes spécifiques ont été cartographiées. Différents éléments anthropiques ont également été cartographiés, notamment les objets obstruant les écoulements, les remblais, les canaux artificiels et les différents types d'occupation du sol, ainsi que les principales voies de communication. Ces objets sont très utiles pour la mise en évidence des sites critiques qui, en zone urbanisée, sont souvent liés à une interaction entre les formes anthropiques et le fonctionnement naturel des hydrosystèmes.

Dans les deux cas, les traces d'un épisode de référence récent ont également été repérées lors de campagnes de terrain et l'extension spatiale de cette crue de référence a été cartographiée. A Fès, il s'agit de l'inondation de mars 2010 qui a provoqué des dégâts importants et affecté de nombreuses zones habitées (LASRI *et al.* 2011 et figure 4). A Beni Mellal, il s'agit de la crue du 29 septembre 2009, qui a touché les quatre bassins versants débouchant sur la ville et dont l'ampleur est considérée comme exceptionnelle (WERREN *et al.* 2012). La crue du 8 mars 2010 a également été documentée. La délimitation de ces crues servira à la vérification des résultats issus des travaux de modélisation hydrologique (deuxième phase de la recherche).

Les deux cartes générales ont été élaborées sur support informatique au moyen du logiciel SIG ArcMap. La carte générale des phénomènes a été réalisée à une échelle de 1: 15'000 pour le terrain de Beni Mellal et 1: 20'000 pour celui de Fès. Elles sont accompagnées d'un rapport explicatif (REYNARD *et al.* 2011).

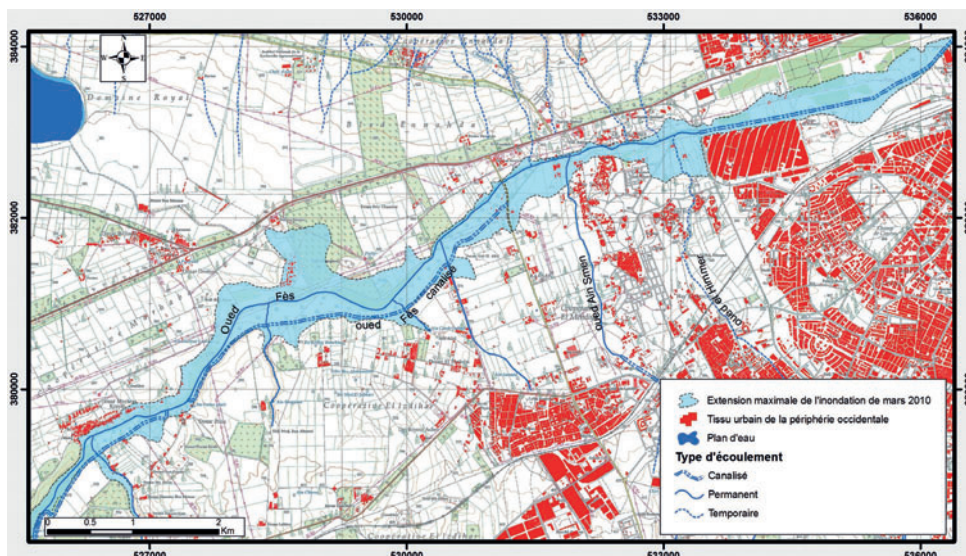


Figure 4.—Extension spatiale de l'inondation de mars 2010 à la périphérie de Fès.
Spatial extension of the flood of March 2010 in Fez periphery.

Des approches différenciées

Les caractéristiques hétérogènes des deux terrains ont imposé des choix méthodologiques différents. Dans le cas de Fès, dont le bassin versant couvre une surface d'environ 800 km², les cours d'eau ont mis en place des plaines alluviales dans lesquelles la méthode hydrogéomorphologique française est la plus adaptée.

Le terrain de Beni Mellal est formé de quatre petits bassins versants dont les crues éclair débouchent sur une zone de piémont formée d'anciens cônes alluviaux sur lesquels s'est développée la ville (EL KHALKI & BENYUCEF 2005, EL KHALKI *et al.* 2005). Les dépôts alluviaux étant difficiles à différencier sur les cônes, la cartographie a consisté principalement à repérer les témoins de crues existant sur le terrain (traces d'érosion, anciens chenaux, zones d'épandage, etc.), avec un accent mis sur la morphologie de cône alluvial, qui impose un comportement hydrogéomorphologique spécifique (écoulement en nappe, existence de nombreux chenaux distribuant les eaux arrivant à l'apex des cônes) (figure 5).

Les défis cartographiques

Un obstacle important dans la mise en carte des éléments recueillis sur le terrain a été l'hétérogénéité des données disponibles pour la création de la carte de base. Ainsi, pour le terrain de Beni Mellal, les modèles numériques de terrain (MNT) à disposition ont une faible résolution spatiale et une marge d'erreur significative. Notre choix s'est arrêté sur le MNT ASTER, à une résolution de 30 m, qui couvre l'entier du bassin versant. Des données plus précises provenant du plan de restitution de la ville de Beni Mellal sont disponibles

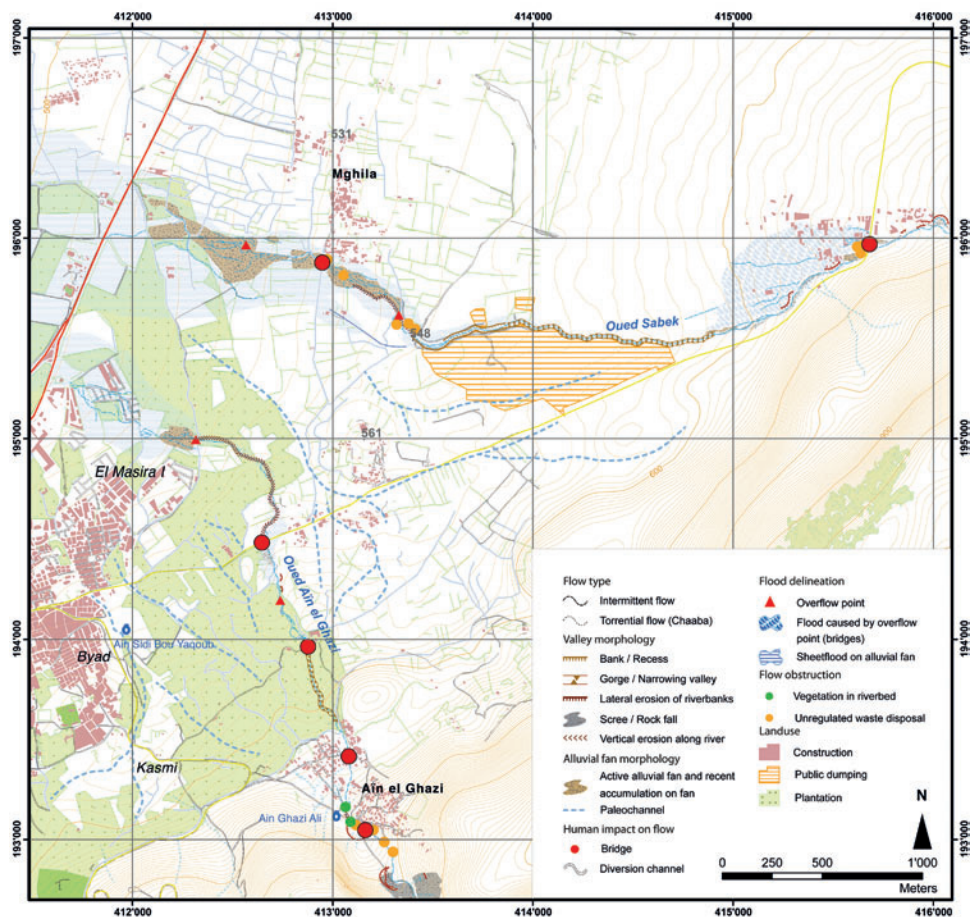


Figure 5.—Extrait de la carte des phénomènes d'inondation de Beni Mellal.

Excerpt of the map of flood phenomena in Beni Mellal.

seulement pour la zone urbaine. Par conséquent, garder l'unité de la carte impose une perte d'information et des déformations fortuites des données existantes (figure 6).

Un deuxième problème est constitué par la rapidité des changements observés sur les terrains étudiés (constructions, remblais, travaux de génie civil, etc.). Pour cette raison, nous avons décidé, en cours de réalisation, de ne pas prendre en compte des changements qui seraient survenus après les levés sur le terrain. Les deux cartes doivent être considérées comme représentatives de la situation en juin 2010. Elles ne tiennent pas compte de transformations plus récentes. En raison de l'urbanisation rapide, les données urbaines ont par ailleurs nécessité une mise à jour réalisée par numérisation des éléments à l'aide des dernières données GoogleMaps disponibles.

Le contexte des deux terrains d'étude est marqué par une grande dissemblance. D'une part, les caractéristiques des deux bassins versants ne sont pas les mêmes. Par ailleurs,

la situation des deux villes par rapport aux phénomènes hydro-géomorphologiques est complètement différente. La mise en carte et la structuration d'une légende uniforme et homogène pour les deux terrains a représenté un réel défi. Nous avons toutefois essayé d'harmoniser les deux travaux afin d'obtenir une certaine similitude entre les deux légendes. Ceci a été rendu possible par la définition de catégories de phénomènes (hydrographie, types d'écoulement, éléments anthropiques influençant l'écoulement) identiques sur les deux terrains, par l'utilisation d'un fond de carte similaire dans les deux cas et par la structuration de la légende et le choix de symboles identiques sur les deux terrains.

Finalement, s'est posé un problème d'échelle, dû principalement aux différences de taille entre les terrains étudiés et à la nécessité de pouvoir lire les détails de certains secteurs riches en informations. La méthode suisse se base sur une légende dite « modulable » qui contient des symboles complémentaires pour des cartes à différentes échelles. Nous avons ainsi réalisé une carte générale pour chaque agglomération urbaine, accompagnée de « cartes-zooms » présentant en détail les sites-clés ou des problèmes spécifiques.

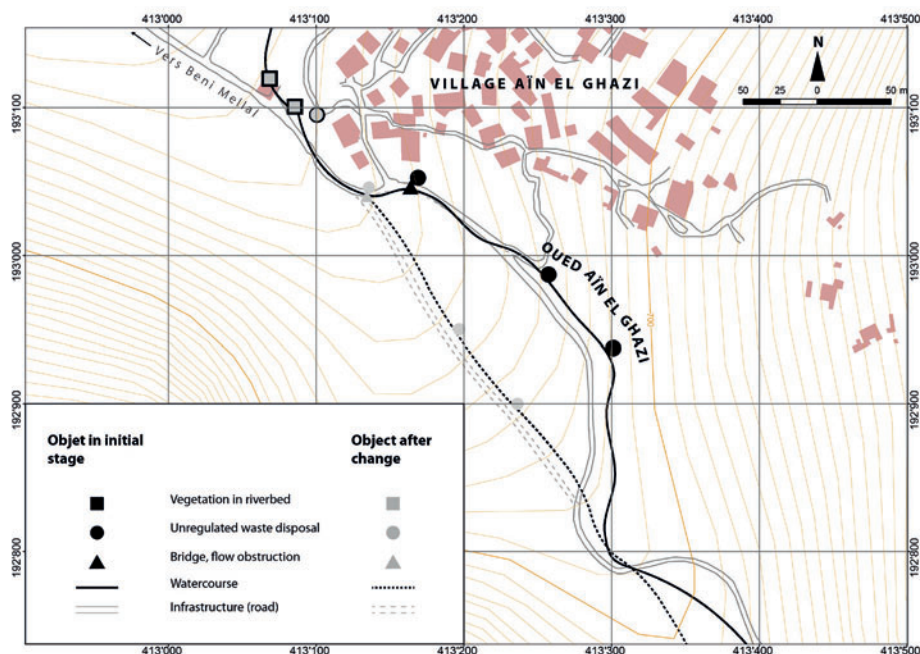


Figure 6.—Déformations induite par la mauvaise qualité des cartes de base.
Deformations caused by the poor quality of base maps.

CONCLUSION

Les difficultés rencontrées dans l'élaboration des cartes des phénomènes réalisées dans le cadre de cette étude mettent bien en évidence les défis liés à la transposition des approches cartographiques développées dans les pays industrialisés dans des contextes de pays en

voie de développement (ZIMMERMANN *et al.* 2005): la difficulté d'obtenir des bases topographiques à haute résolution, de qualité identique pour l'ensemble du bassin versant étudié et l'indigence des données de mesures (climatiques, hydrologiques), qui limitent les possibilités de modélisation et rendent ainsi la cartographie des phénomènes d'autant plus importante et intéressante en termes de coûts.

Dans les deux bassins étudiés, le défi majeur demeure toutefois la difficulté à obtenir des données numériques sur l'intensité des précipitations et sur les débits journaliers et instantanés des cours d'eau nécessaires à la modélisation. Ce manque de données limite fortement les possibilités de modélisation hydrologique et hydraulique et nécessite le recours à des approches semi-quantitatives basées sur le calcul d'indicateurs hydrologiques. C'est l'objet de la deuxième phase du projet et nul doute que la carte des phénomènes constituera un très bon moyen de valider les résultats obtenus dans cette seconde phase. La carte des phénomènes constitue pour le moment un document très utile pour les documents d'aménagement, en l'absence d'une véritable carte des risques.

REMERCIEMENTS

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet «Gestion du risque d'inondation dans deux bassins versants marocains: Fès et Beni Mellal», initié et financé par la Direction du développement et de la coopération (DDC) suisse. Nous remercions tout particulièrement MM. Fabrizio Poretti, Roderick Kühne et Manuel Stark, représentants de la DDC à Rabat, ainsi que M. Jürg Zumstein et Mmes Barbara Egger et Jana Zemp, conseillers principaux auprès de la section Moyen Orient et Afrique du Nord à la DDC, pour leur soutien. Nos remerciements vont également aux collègues de Lausanne et de Fès pour les fructueuses discussions sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- BALLAIS J.-L., CHAVE S., DUPONT N., MASSON E. & PENVEN M.-J., 2011. La méthode hydro-géomorphologique de détermination des zones inondables. *Physio-Géo* (www.physio-geo.fr), collection Ouvrages, 168 p. [www.physio-geo.fr, consulté le 3 avril 2011].
- BALLAIS J.-L., GARRY G. & MASSON M., 2005. Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation: le cas du Midi méditerranéen français. *C.R. Géosciences* 337: 1120-1130.
- CAMARASA BELMONTE A. M. & SORIANO GARCIA J., 2008. Peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundacion en ramblas mediterraneas : los llanos de Caraixet y Poyo. *Cuadernos de Geografia* 83: 1- 26.
- EL FOUNTI L., 2003. La gestion des risques au Maroc. In: 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003, 6 p.
- EL KHALKI Y. & BENYOUCEF A., 2005. Crues et inondations de l'oued El Handak: genèse, impact et propositions d'aménagement (Atlas de Beni Mellal). *Etudes de Géographie physique* 32: 47-61.
- EL KHALKI Y., TAÏBI A. N., BENYOUCEF A., EL HANNANI M., HAFID A., MAYOUSSI M., ZMOU A., RAGALA R. & GEROYANNIS H., 2005. Processus d'urbanisation et accroissement des risques à Beni Mellal (Tadla-Azilal, Maroc): apports des SIG et de la télédétection. *Mosella* 30: 148-161.
- FERNANDEZ-LAVADO C., FURDADA G. & MARQUÉS M. A., 2007. Geomorphological method in the elaboration of hazard maps for flash-floods in the municipality of Jucuaran (El Salvador). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 455-465.
- FURDADA G., CALDERON L. E. & MARQUÉS M. A., 2008. Flood hazard map of La Trinidad (NW Nicaragua). Method and results. *Natural Hazards* 45: 183-195.
- KIENHOLZ H. & KRUMMENACHER B., 1995. Recommandations. Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 38 p.

- KUNZ M. & HURNI L., 2008. Hazard maps in Switzerland. State-of-the-art and potential improvements. *In: Proc. 6th ICA Mountain Cartography Workshop*, Lenk (Switzerland), 133-138.
- LASRI M., OBDA K., TAOUS A., AMYAY M. & REYNARD E., 2011. L'agglomération de Fès et sa périphérie face au risque d'inondation. Résultats préliminaires. *In: Actes du colloque "Aménagement périurbain: processus, enjeux, risques et perspectives"*, 17-18 février 2010, 189-206.
- MASSON M., GARRY G. & BALLAIS J.-L., 1996. Cartographie des zones inondables: approche hydro-géomorphologique. Les Editions Villes et Territoires, Paris. 100 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) COMMITTEE ON ALLUVIAL FAN FLOODING, 1996. Alluvial fan flooding. National Academy Press, Washington DC.
- REYNARD E., LASRI M., WERREN G., OBDA K., AMYAY M. & TAOUS A., 2011. Carte des phénomènes d'inondation des bassins de Fès et Beni Mellal. Rapport de recherche, CD-rom + deux cartes. Lausanne, Fès. 38 p.
- WERREN G., REYNARD E. & EL KHALKI Y., 2012. Cartographie des phénomènes en vue de la réalisation de la carte indicative des dangers hydrologiques dans la ville de Beni Mellal, Maroc. *In: Actes du colloque "La montagne marocaine: géomorphologie, environnement et développement"*, 5-6 mai 2010, sous presse.
- ZIMMERMANN M., POZZI A. & STOESEL F., 2005. Vademecum hazard maps and related instruments. The Swiss system and its application abroad. Capitalisation of experience. Swiss Agency for Development and Cooperation, Berne. 34 p.
- ZUMSTEIN J., 2010. Secouristes Volontaires de Proximité (SVP) – Maroc. Direction du Développement et de la Coopération, Berne. 1 p.