



UNIL | Université de Lausanne

Institut de géographie



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Laboratoire d'Analyses Géo- Environnementales
et Aménagement (LAGEA) URAC54

Carte des phénomènes d'inondation des bassins de Fès et Beni Mellal

Emmanuel REYNARD, Mohamed LASRI, Gabriela
WERREN, Khalid OBDA, Mhamed AMYAY, Ali TAOUS

Rapport rédigé dans le cadre du projet « Gestion du risque
d'inondation dans deux bassins versants marocains : Fès et Beni
Mellal », financé par la Direction du Développement et de la
Coopération suisse

Lausanne, Fès, mars 2011

Carte des phénomènes des bassins de Fès et Beni Mellal – notice explicative

1. Introduction

Les cartes des phénomènes des bassins versants de Fès et Beni Mellal (Maroc) constituent les résultats de la première étape du projet *Gestion du risque d'inondation dans deux bassins versants marocains : Fès et Beni Mellal*, financé par la Direction du Développement et de la Coopération (DDC) suisse. Le projet s'inscrit dans une stratégie de la DDC au Maroc, visant à développer des instruments de gestion des risques naturels et de prévention des catastrophes naturelles.

L'étude a été confiée conjointement au Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales et d'Aménagement (LAGEA URAC 54) de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellahde (USMBA), Fès, sous la direction du Prof. Khalid Obda, et à l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL), sous la direction du Prof. Emmanuel Reynard. 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 est réalisée principalement sous la forme de deux thèses de doctorat (la première rédigée par Mohamed Lasri à l'USMBA, Fès, la seconde par Gabriela Werren, à l'Université de Lausanne) et 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., 2011) et d'une publication mettant l'accent sur les enjeux méthodologiques dans l'élaboration de la carte des phénomènes (Reynard et al., 2011).

Ce rapport présente la carte des phénomènes des deux zones d'étude. Il est accompagné d'une carte générale pour chacun des deux cas, ainsi que de différents zooms sur certains secteurs particuliers. Le rapport est organisé en quatre parties. Dans un premier temps, nous décrivons les principales caractéristiques de la cartographie des phénomènes et nous explicitons le choix de la légende choisie pour cette étude. Cette dernière est décrite dans une deuxième partie. Les troisième et quatrième parties constituent la notice explicative des deux cartes. Nous concluons le rapport par quelques perspectives pour la suite du projet.

2. Cartographie des phénomènes

2.1 La cartographie des phénomènes et sa place dans la cartographie des dangers

La carte des phénomènes est l'expression d'une « analyse méticuleuse du terrain » (Loat & Petraschek, 1995:7) qui est menée afin de désigner les témoins géomorphologiques des aléas et de spatialiser les « sites critiques » définis par l'intensité ou l'occurrence des phénomènes dangereux (Loat & Petraschek, 1995:7). L'analyse du terrain mène à l'élaboration d'une carte géomorphologique qui peut néanmoins englober des éléments de géologie, hydrologie, etc. et des éléments anthropiques pertinents dans la représentation du danger.

Dans la pratique suisse de la cartographie des dangers (ARE, OFEG, OFEFP 2005 :15), la carte des phénomènes est un élément essentiel, dont les conclusions sont complétées par un inventaire des événements passés et par la modélisation du danger. Elle sert à vérifier les modèles et à mettre en évidence les situations les plus dangereuses par la spatialisation des phénomènes. Dans des situations où les données à disposition pour la modélisation de l'aléa restent éparées ou peu précises, la cartographie géomorphologique compense ces manques et peut aller jusqu'à constituer la seule approche prise en compte pour l'évaluation du danger.

2.2 Principales approches

Une recherche documentaire a été menée pour établir un bilan des méthodologies et pratiques liées à la cartographie de l'aléa (cartographie des phénomènes) dans différents pays. La recherche a été orientée en fonction des spécificités des terrains d'étude. Ainsi, l'accent a été mis sur les méthodes applicables à un environnement semi-aride, qui prennent en compte la morphologie en cônes alluviaux et qui puissent compenser le manque de données hydrologiques dans les bassins versants concernés.

Les principales approches recensées sont (Tabl. 1) :

- L'approche suisse (*Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*, Kienholz & Krummenacher, 1995) : cette méthode est à la base de la présente étude.
- L'approche hydrogéomorphologique française (Masson et al., 1996 ; Ballais et al., 2005 ; Ballais et al., 2011), qui cartographie les différents éléments géomorphologiques et hydrologiques constituant la plaine alluviale pour désigner ensuite des zones de différente dangerosité.
- L'approche dite « Méthode géomorphologique intégrée » qui vise à délimiter des zones de danger en fonction de l'extension spatiale d'évènements représentatifs (Fernandez-Lavado et al., 2007 ; Furdada et al., 2008).
- L'approche « NRC », spécifique aux zones de cône alluvial (NRC, 1996), qui part du principe que les cônes alluviaux ont un comportement hydro-géomorphologique différent des plaines alluviales ; par conséquent, des méthodes distinctes sont à utiliser pour la délimitation des zones dangereuses dans cet environnement géomorphologique spécifique.
- La méthode de cartographie du risque (Camarasa et al., 2001) qui attribue des degrés de dangerosité aux différentes formes du relief.

Méthode	Cadre : acteurs, contexte	Description	Evaluation	Références
Phénomènes (Suisse)	PLANAT (recherche, professionnels, gouvernement) Contexte: national	Cartographie de détail le long des cours d'eau	Méthode de base de l'étude	Kienholz & Krummenacher, 1995
Hydrogéomorphologique (France)	Gouvernement, recherche, professionnels Contexte: national	Délimite les composantes de la plaine alluviale et leur attribue un degré de danger	Applicable en dehors des cônes alluviaux	Masson et al., 1996 ; Ballais et al. 2005 ; Ballais et al. 2011
NRC (Etats-Unis)	Recherche, professionnels, gouvernement Contexte: national	Détermine les parties actives (inondables) d'un cône alluvial	Spécifique aux cônes alluviaux	NRC, 1996
Géomorphologique intégrée (Espagne)	Recherche : groupe RISKINAT, Université de Barcelone (UB) Contexte: catastrophe naturelle	Cartographie des traces géomorphologiques d'un événement de référence	Compense l'absence de données hydrologiques Elaborée pour une zone de cône alluvial	Fernandez-Lavado et al., 2007 ; Furdada et al., 2008
Risque (Espagne)	Recherche Contexte: local (Valencia)	Classifie les formes selon leur dangerosité en cas d'inondation	Adaptée aux cours d'eau temporaires Bonne connaissance géomorphologique et hydrologique du terrain requise	Camarasa et al., 2001

Tableau 1. Principales approches pour la cartographie des phénomènes.

2.2.1 La légende modulable pour la cartographie des phénomènes (Suisse)

En Suisse, la prévention contre les crues se réalise par la régulation des zones à bâtir, la revitalisation des cours d'eau et des mesures de protection (travaux) (ARE, OFEG, OFEFP 2005). Ces mesures passent obligatoirement par la reconnaissance des dangers à travers la carte des dangers. La carte des dangers, sans avoir de statut juridique en soi, est un instrument obligatoire pour la réalisation des plans directeurs cantonaux et des plans d'aménagement communaux, qui eux, ont valeur de régulation.

La coordination des mesures liées à la prévention des dangers naturels en Suisse est intégrée par la Plateforme Nationale « Dangers Naturels » PLANAT, un organisme extra-parlementaire qui regroupe les différents acteurs concernés, publie et met en œuvre les mesures nationales surtout à l'aide de recommandations aux autorités responsables de la prévention des dangers naturels.

Pour la réalisation de la carte des dangers, une première phase d'identification des dangers se concrétise par une cartographie géomorphologique (ou des phénomènes) accompagnée de l'inventaire des événements passés liés au(x) risque(s) étudié(s). La légende modulable pour la cartographie des phénomènes (Kienholz & Kruppenacher, 1995) est un document conçu pour l'harmonisation au niveau national des cartes géomorphologiques qui servent de base à l'élaboration des cartes de dangers. Dans le cas de l'aléa hydrologique, on passe à une évaluation des caractéristiques du cours d'eau en cartographiant tous les éléments spécialement problématiques.

L'analyse de terrain a pour objectifs la reconnaissance / interprétation des témoins muets de processus dangereux, d'un côté, et la reconnaissance des sites critiques sur le terrain, de l'autre.

Deux légendes ont été élaborées, pour différents types de besoins / échelles : une légende minimale pour des études à petite échelle (études régionales) et une légende élargie pour des études ciblées et à grande échelle. Modulables, ses symboles peuvent être modifiés et composés selon les besoins. La légende modulable se base sur des légendes existantes et reste analogue pour différentes échelles. Du point de vue du graphisme, la légende utilise une couleur par processus. Pour ce qui est du contenu, elle se base sur la force du signe pour représenter la gradation de la « force » de chaque phénomène. Ainsi, un signe sera plus accentué si le processus est plus intense, actif, profond, jeune ou évident (Loat et Petrascheck, 1997).

2.2.2 La méthode hydrogéomorphologique (France)

« Approche géographique qui étudie le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées et en particulier les formes fluviales mises en place au fur et à mesure des crues successives » (DIREN PACA, 2007:1), cette méthode a été mise au point dans les années 1980 par des experts du Ministère de l'équipement français, des scientifiques et des bureaux d'étude privés (DIREN PACA, 2007 ; Ballais et al., 2005). Validée depuis 1996 par les ministères responsables de la prévention des dangers d'inondation, elle est actuellement recommandée au niveau national pour réaliser les Plans de prévention du risque d'inondation (DIREN PACA, 2007).

Le point de départ a été le constat que ce sont les crues rares et exceptionnelles qui façonnent la plaine alluviale dans son ensemble. En dépit de l'urbanisation, sous conditions climatiques constantes, « *les crues exceptionnelles actuelles se propagent dans les mêmes limites que les crues du passé* » (Ballais et al., 2005). Ainsi, cette méthode explore en détail la plaine alluviale d'un cours d'eau, visant à en délimiter les principales composantes : lit mineur, lit moyen, lit majeur et l'encaissant, représenté par les terrasses, les versants et les accumulations de colluvions sur ces derniers. Selon cette approche, la limite maximale du lit majeur constitue aussi la surface inondable lors des crues exceptionnelles et coïncide donc avec la limite des surfaces soumises au risque d'inondation.

La cartographie des composantes de la plaine alluviale est réalisée d'une part par l'étude des documents photogrammétriques et d'autre part par un travail de terrain étudiant la morphologie et les différences sédimentologiques entre celles-ci. En plus des trois types de lits, on cartographie également des éléments secondaires comme les axes de crue et les bras de décharge, les cônes torrentiels et les glacis-cônes, ainsi que les zones de raccordement entre reliefs responsables d'apports latéraux par ruissellement.

Composante de la plaine alluviale	Temps de retour de crue	Degré de l'aléa
Lit mineur	1 à 2 ans	
Lit moyen	2 à 10 ans	Aléa très fort à fort
Lit majeur	10 à 100 ans	Aléa fort en chenaux de crue et modéré en plaine d'inondation
Lit majeur exceptionnel	Plus de 100 ans	Aléa faible
Versant	Non inondé	Pas d'aléa
Terrasses	Non inondé	Pas d'aléa
Colluvions	Non inondé	Pas d'aléa

Tableau 2. La relation entre unités hydrogéomorphologiques et degré d'aléa (DIREN-PACA, 2007 :45)

Il y a correspondance entre les différentes parties de la plaine alluviale et les temps de retour des crues (Tabl. 2). Ainsi, le lit mineur contient les crues fréquentes, le lit moyen les crues moyennes et le lit majeur les crues rares ou centennales. Le lit majeur exceptionnel contient les crues exceptionnelles avec un temps de retour supérieur à 100 ans. La répartition naturelle de l'aléa peut néanmoins être modifiée par l'intervention d'infrastructures jouant un rôle d'entrave lors de la propagation de la crue. Il s'agit donc par définition d'une méthode naturaliste, dont les résultats seront uniquement qualitatifs. La méthode ne permet donc pas une estimation quantitative des débits de crue, des hauteurs d'eau ou des vitesses.

La méthode hydrogéomorphologique a été conçue principalement pour des cours d'eau méditerranéens du Sud de la France dont le régime hydrologique est comparable aux cours d'eau marocains. Elle se base sur l'étude géomorphologique des plaines alluviales et met à disposition un bon instrument d'estimation de l'aléa hydrique en absence de données hydrologiques. Elle se prête très bien pour la cartographie du bassin versant de Fès, où elle représente la principale approche. Sur le terrain de Beni Mellal, elle est peu utilisable, en raison du contexte géomorphologique de cônes de piémont.

2.3 L'approche adoptée dans le projet

Ce projet a été conçu comme un transfert de connaissances et de l'expérience suisse en ce que concerne le danger naturel vers le Maroc. De ce point de vue, la méthode de cartographie suisse dite des phénomènes a été retenue comme méthode de base pour le projet. Pourtant, des modifications importantes liées au caractère semi-aride du terrain d'étude ainsi qu'aux caractères morphologiques spécifiques des deux terrains d'étude ont été apportées.

Ainsi, les principes de base de l'approche suisse ont été retenus : mettre en carte 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., 2011).

Dans la cartographie proprement dite, des approches différentes ont été ajoutées ou adaptées. Sur les deux terrains d'étude, des crues, qualifiées de rares ou exceptionnelles, ont eu lieu pendant la phase de terrain. 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). 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., 2011). La crue du 8 mars 2010 a également été documentée. Ainsi, les zones inondées lors de ces événements de crue ont été délimitées précisément par recueil de données sur les hauteurs d'eau à partir des traces restantes sur le terrain. Cette approche s'apparente à la méthode « géomorphologique » espagnole et elle permettra notamment une vérification ultérieure des modélisations hydrologiques et hydrauliques projetées. Cette adaptation a été utilisée sur les deux terrains d'étude avec succès.

Dans le cas du bassin versant de Fès, l'application de la méthode hydrogéomorphologique a été privilégiée pour les secteurs situés en amont de la ville qui présentent une morphologie de plaine alluviale. Cependant, 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 cet égard, la désignation de zones inondables pour différents temps de retour des crues sera confirmée par les résultats à obtenir lors de la modélisation. Ainsi, une forte composante de terrain a été privilégiée dans ce projet, notamment pour atténuer l'incertitude liée à la faible précision des données à disposition. 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 nécessaire 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 : des crues éclair provenant des bassins versants contigus s'épanchent en écoulement en nappe avec une diminution jusqu'à la disparition des chenaux. Une cartographie des formes les plus récentes a été réalisée, dans le sens de la méthode américaine conçue pour les cônes alluviaux (NRC 1996).

3. Légende de la carte des phénomènes

3.1 Démarche adoptée

La démarche suivante a été adoptée :

- Création d'une base de données des bassins versants sur le logiciel de SIG ArcMap©. Cette base de données a permis de mettre en évidence la situation des terrains d'étude (les deux villes) par rapport aux effets de l'aléa hydrologique des bassins.
- Délimitation de l'extension des terrains à prendre en compte pour la cartographie des phénomènes. Le choix a pris en considération plusieurs critères fondamentaux, à savoir :
 - La limite de l'extension des espaces urbains (enjeux existants) ;
 - Les zones situées en dehors de l'espace urbain mais pouvant influencer directement les écoulements (facteurs diminuant ou aggravant l'aléa) ;
 - La future extension urbaine, qui sera orientée par les prochains plans d'aménagement. Ces nouvelles extensions urbaines vont bénéficier des documents cartographiques du projet.
- Acquisition et traitement de données cartographiques disponibles (plans de ville, différentes missions de photographies aériennes, images satellites récentes, plans de restitution, plans d'aménagement).
- Cartographie des phénomènes sur le terrain à l'aide de l'outil de cartographie mobile MobileMapper© et du logiciel ArcPad© de ESRI. Cet appareil nous permis de cartographier les phénomènes à des échelles très détaillées. On s'est focalisé à cet égard sur plusieurs phénomènes et processus liés aux inondations, notamment :
 - les éléments de l'hydrographie et leurs caractéristiques ;
 - la morphologie fluviale et les processus des espaces fluviaux traduisant l'hydrodynamisme des cours d'eau en question ;
 - les témoins géomorphologiques sur trois domaines différents : fonds de vallée, plaines alluviales et cônes de piémont (à Beni Mellal) ;
 - les impacts de l'action anthropique sur les écoulements ; l'interprétation de ces derniers permettra de prévoir des scénarios éventuels en cas de crues ;
 - les traces des inondations ayant touché récemment les deux terrains ; on s'est basé sur des visites de terrain ainsi que sur le questionnement des riverains ayant vécu ces événements.
- Intégration et mise au propre des données collectées sur le SIG ArcMap©. Le traitement de ces données a permis d'orienter la structuration de la légende pour les deux terrains.
- Elaboration du fond de carte à partir des plans de restitution. Ces derniers ont été mis à jour à partir des images satellites plus récentes pour compléter les composantes de l'occupation du sol.
- Choix de l'échelle des cartes selon l'extension des deux terrains d'étude (1:15'000 pour Beni Mellal et 1:20'000 pour Fès). Des zooms seront envisagés pour des cartes de détail.

3.2 Structure de la légende

La légende a été structurée en fonction des données collectées sur terrain de façon qu'elle puisse répondre aux objectifs des cartes des phénomènes. La légende a été divisée en cinq parties.

3.2.1 Hydrographie

Cette catégorie regroupe les éléments hydrographiques. Les formes ont été classées en trois groupes :

- éléments linéaires pour le réseau hydrographique de différents types (permanent, saisonnier, intermittent) ;
- éléments surfaciques pour les plans d'eau et leur nature (lacs, marécages permanents, marécages temporaires) ;
- éléments ponctuels pour les points d'eau (sources).

En plus des éléments naturels de l'hydrographie, ont également été utilisés des figurés traduisant les changements de la nature du réseau hydrographique, notamment les canalisations (canal à ciel ouvert, canal couvert, canal de déviation, canalisation en cours, canal d'irrigation (*séguia*)) (Fig. 1).

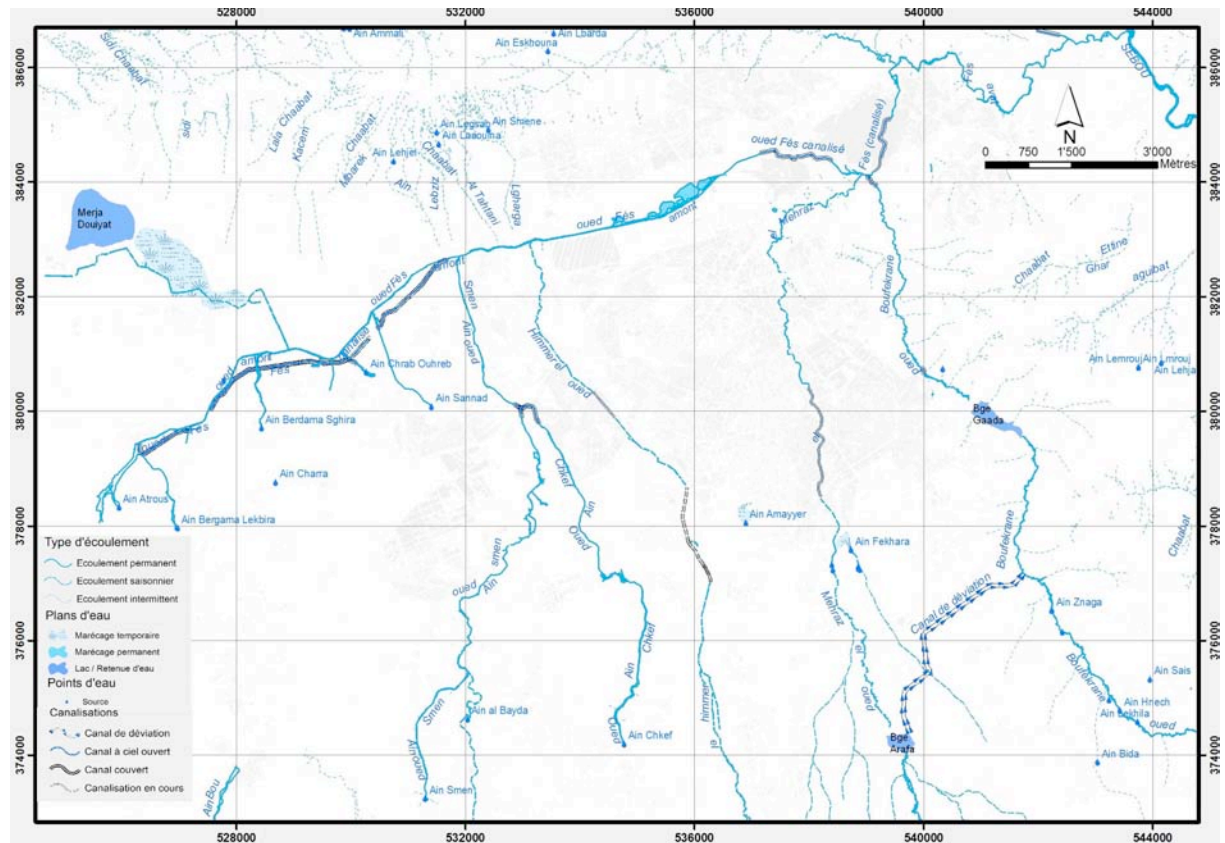


Figure 1. Éléments de l'hydrographie et canalisations.

3.2.2 Modelé et processus des espaces fluviaux

Cette catégorie se base sur les méthodes de la cartographie géomorphologique par excellence. Les différences géomorphologiques entre les deux terrains ont nécessité plusieurs adaptations de la légende. Trois domaines ont été définis, chacun recelant ses propres modelés et processus géomorphologiques (Fig. 2) :

- Domaine des plaines alluviales : nous nous sommes focalisés surtout sur la cartographie des lits majeurs (naturels, anthropisés) et sur la nature de leurs limites (limite marquée par une microtopographie, limite peu marquée, limite floue) ;

- Domaine des vallées : nous avons cartographié les processus morphogéniques (tronçon à sapement de berge, tronçon à érosion verticale) et les modelés actifs ou hérités des vallées (paléovallées, gorges, éboulis / éboulements, barres d'alluvions en lit majeur, talus / niches d'arrachement) ;
- Domaine des cônes de piémont : nous avons pu cartographier des paléochenaux sur des cônes hérités, ainsi que des cônes de déjection actifs avec des alluvions récentes.

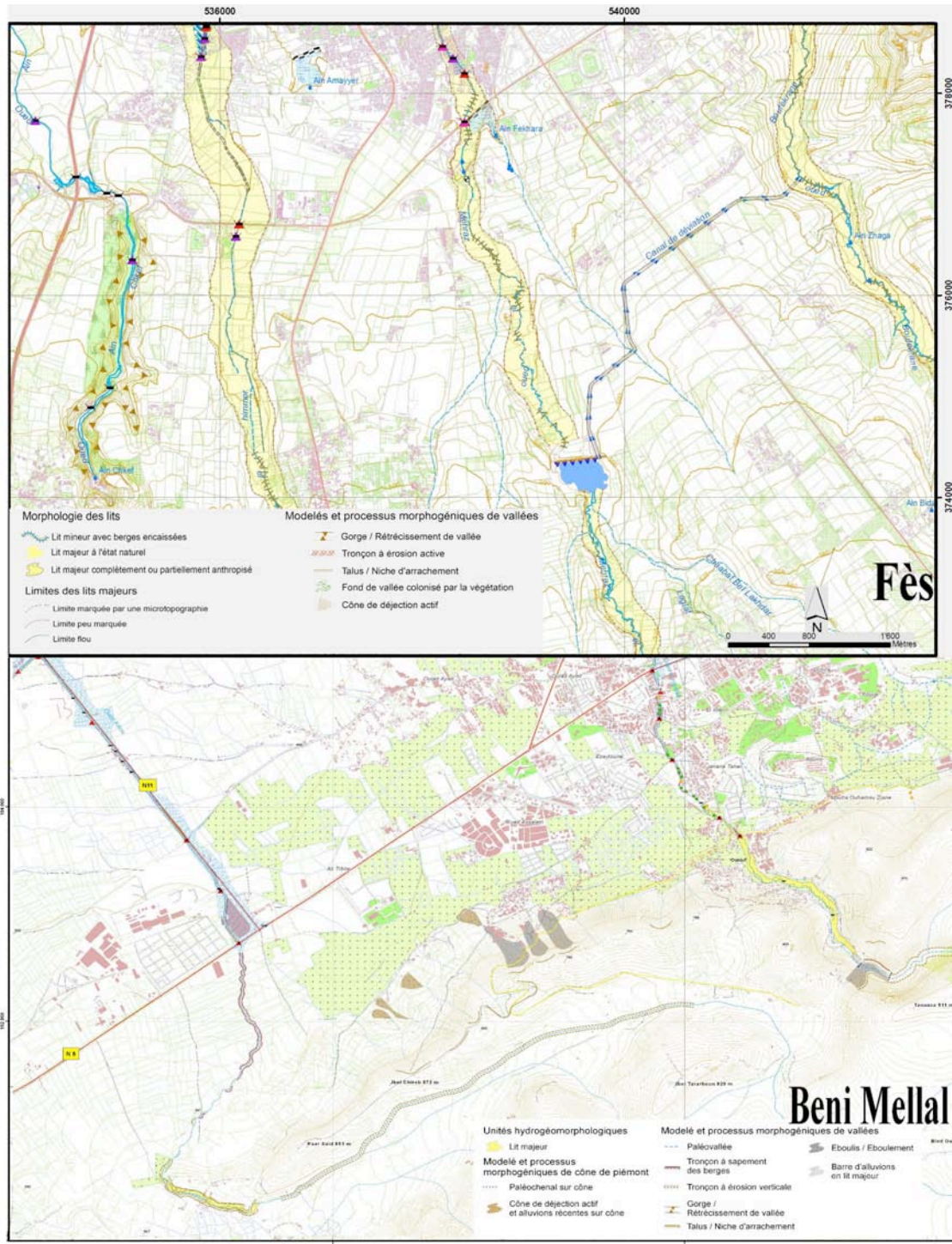


Figure 2. Eléments des modelés et processus des espaces fluviaux.

3.2.3 Impacts de l'action anthropique sur l'écoulement

L'impact de l'action anthropique sur l'écoulement peut amplifier l'aléa d'inondation comme il peut l'amortir. C'est pour cette raison que nous avons introduit ces informations dans le cadre de la cartographie des phénomènes liés aux inondations. La collecte de ces données s'est faite par le biais d'observations sur le terrain et sur la base de témoignages des riverains. Ces informations ont été structurées selon l'impact des éléments anthropiques sur l'écoulement (Fig. 3) :

- Éléments présentant des obstacles à l'écoulement (digues, route en remblais, décharge) ;
- L'impact des ponts a également été approché comme étant des points de débordement. La fréquence des débordements des ponts a été évaluée sur la base du calibre des dalots, des traces de colmatage et des témoignages des riverains. Sur la base de ces critères, nous avons classé les ponts en plusieurs catégories : les ponts qui ne débordent jamais (surtout au niveau des vallées étroites) ; les ponts qui débordent rarement (durant les crues exceptionnelles) ; ceux qui débordent fréquemment (dont les dalots sont sous-dimensionnés) et ceux qui débordent très fréquemment (dont les dalots sont sous-dimensionnés et partiellement colmatés).

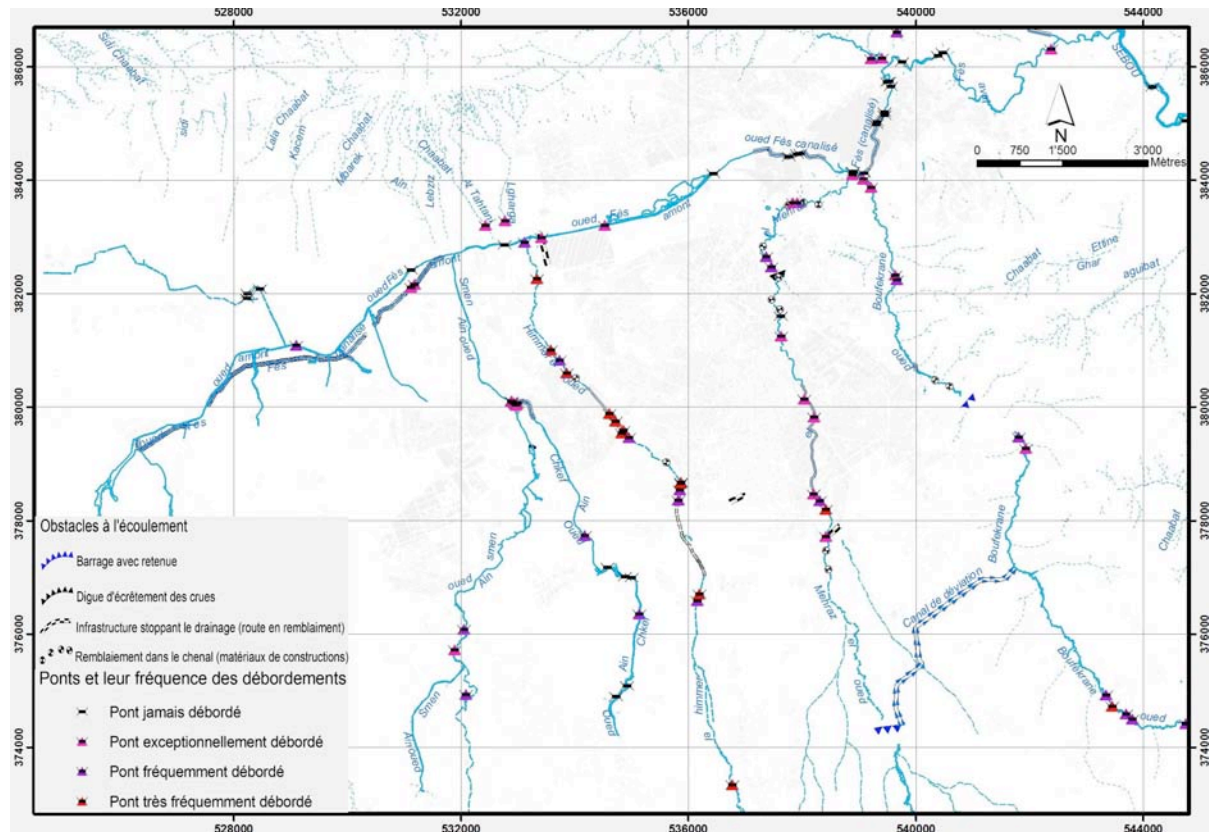


Figure 3. Éléments anthropiques influençant l'écoulement

3.2.4 Délimitation des zones inondées

La cartographie des événements historiques d'inondation constitue l'une des informations les plus pertinentes dans la cartographie des phénomènes (Fig. 4). Les événements de grande ampleur ayant eu lieu dans le passé (inondation du 26 septembre 1950 à Fès, par exemple) ont été impossibles à documenter. Par contre, les événements récents qui ont touché les deux terrains peuvent être qualifiés d'événements de référence vu leur ampleur. 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). 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., 2011). La crue du 8 mars 2010 a également été documentée.

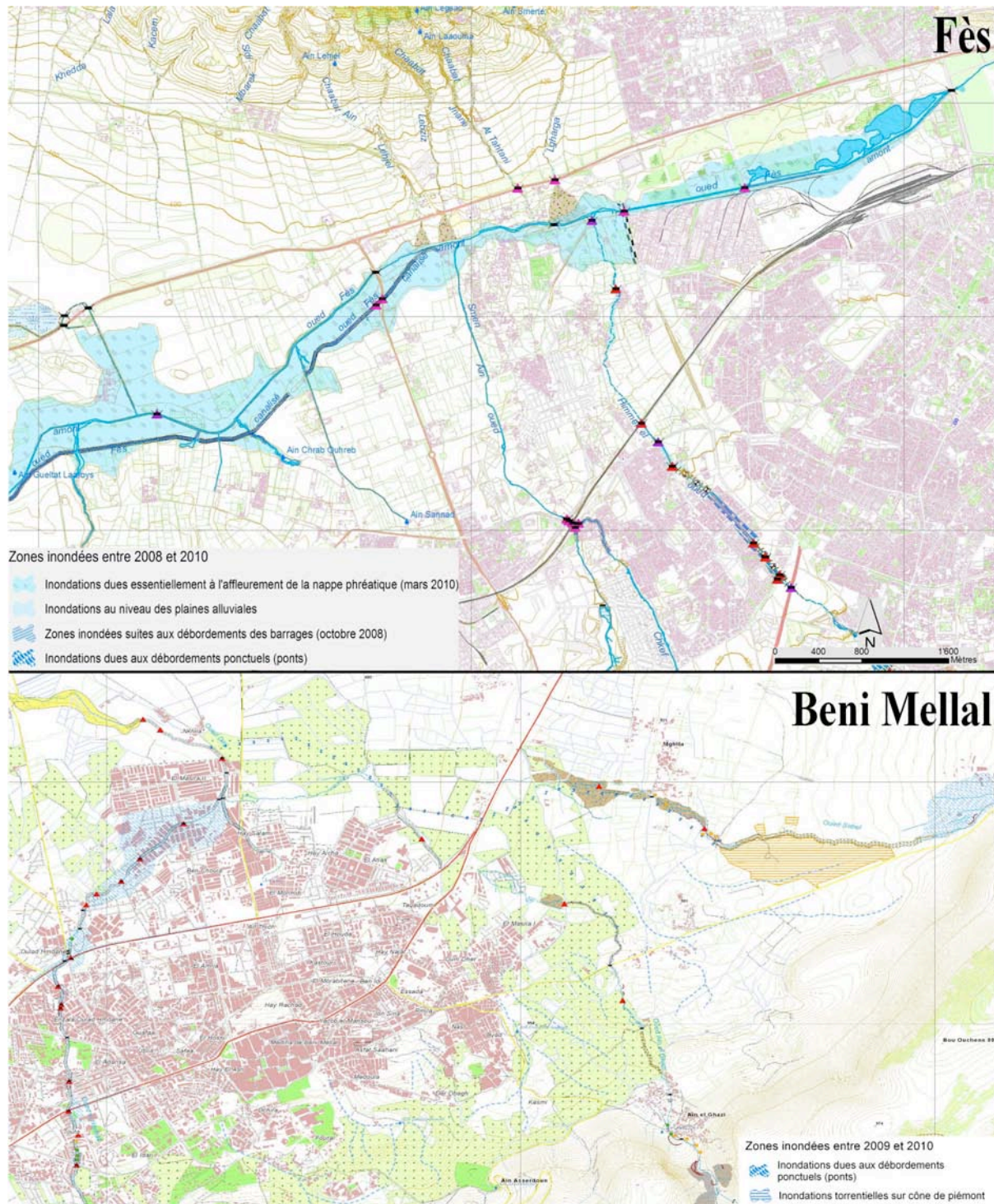


Figure 4. Documentation des épisodes d'inondation (dits « de référence »).

Pour cartographier ces événements (2008 à 2010), nous nous sommes appuyés à la fois sur les traces des inondations repérées sur le terrain et sur les témoignages des riverains. Selon la genèse et les caractéristiques de ces événements, nous avons classé ces inondations en fonction de leur typologie, à savoir :

- les inondations dues essentiellement à l’affleurement de la nappe phréatique qui ont submergé une vaste surface tout au long de la vallée de l’*oued* Fès. Bien que ce phénomène entre dans le cadre des inondations statiques, il a causé des dégâts matériels très importants et affecté plusieurs dizaines de familles qui sont devenues sans abri ;

- les inondations des plaines alluviales : ce phénomène a été frappant après les grandes crues de l'oued Sebou et de ses affluents en février 2010 ;
- les inondations suite aux débordements de barrages en octobre 2008 à Fès. Ce phénomène s'est caractérisé par sa violence et sa brutalité ;
- les inondations dues à des débordements ponctuels, notamment au niveau des ponts sous-dimensionnés ou colmatés ;
- les inondations torrentielles sur cônes de piémont dans la ville de Beni Mellal, causant d'importants dégâts à cause de leur grande charge solide.

3.2.5 Fond de carte

Sur les deux terrains, le fond de carte a été créé à partir des plans de restitution (Fès 2007, Beni Mellal 1999), qu'il a été possible de convertir en fichiers adéquats pour le traitement sur SIG. Nous avons ainsi obtenu une base de données des éléments du fond de carte, qui a été ensuite mise à jour à partir des images satellites récentes. La légende des fonds de carte a été structurée en trois éléments (Fig. 5) :

- l'occupation du sol (cultures, oliveraies, zones construites, etc.) ;
- les voies de communication ;
- les éléments de la topographie (courbes de niveau).

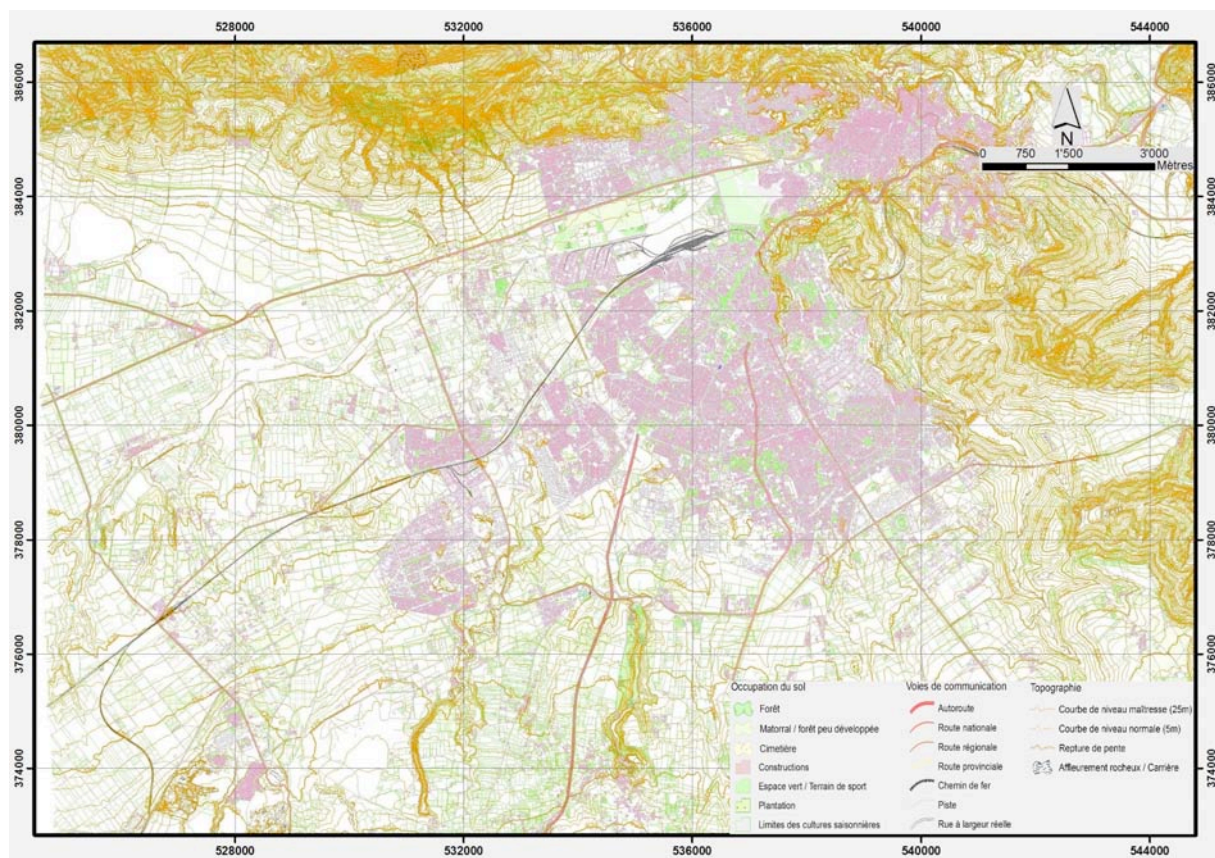


Figure 5. Eléments du fond de carte.

3.3 Similitudes et différences entre les deux terrains

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.

Les différences sont dues à la grande hétérogénéité des phénomènes inventoriés sur les deux terrains.

3.4 Problèmes rencontrés

Un obstacle important dans la mise en carte des éléments recueillis sur le terrain a été constitué par l'hétérogénéité des données disponibles pour la création de la carte de base. Ainsi, pour le terrain de Beni Mellal, les 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 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 (Reynard et al., 2011).

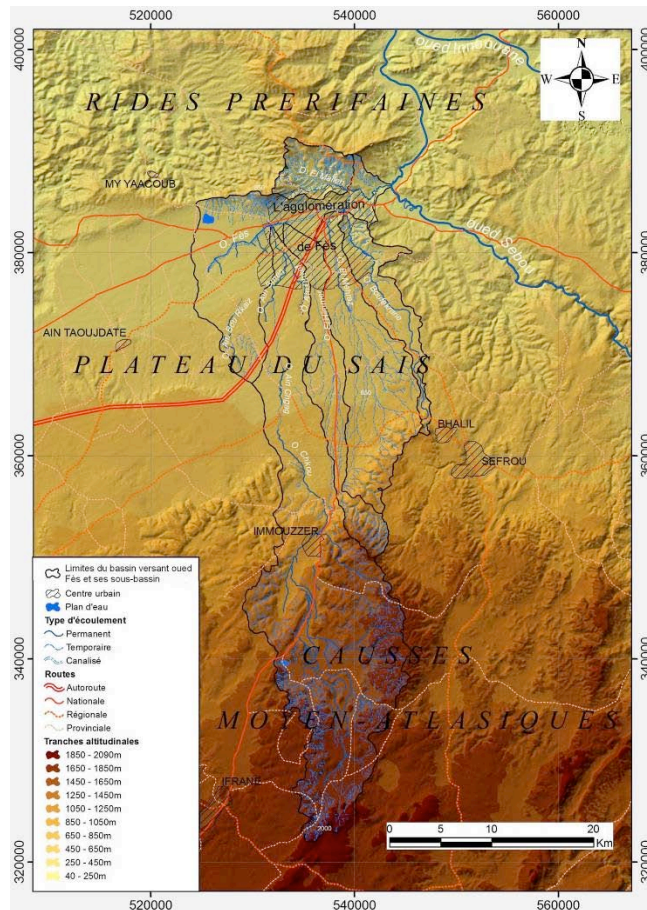
Un deuxième problème est constitué par la rapidité des changements observés sur les terrains étudiés (constructions, remblais, travaux de génie civil, etc.). Pour cette raison, nous avons décidé, en cours de réalisation, de ne pas prendre en compte des changements qui seraient survenus après les levés 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.

4. Carte des phénomènes du bassin versant de Fès

4.1 Le bassin versant et le contexte urbain

Avec une superficie de 879 km², le bassin versant de l'oued Fès se situe entre les parallèles 33°30' et 34°08'N et entre les méridiens 4°54' et 5°09'W. Il se compose de trois unités topographiques différentes (Fig. 6).



Le causse du Moyen Atlas au S correspond à la zone la plus élevée. Il prend l'allure de plateaux étagés du sud (casse d'Immouizzer : 2020 m) vers le nord (casse de Sefrou : 1400 m). Cette unité est dominée par les formations massives d'âge secondaire (calcaires et dolomies du Lias) reposant en discordance sur le substratum argileux du Trias (Fig. 7 inspirée de Taltasse, 1953).

Le plateau de Saïs représente la partie la moins élevée du bassin versant (400 à 700 m), avec une douce inclinaison (0.1 %) du sud vers le nord. Il s'agit d'une dépression de remplissage mio-plio-quaternaire surmontant les calcaires et dolomies du Lias et les formations complexes du Dogger (Fassi 1999).

Le nord du bassin versant est limité par les Rides pré-rifaines qui apparaissent comme une montagne moyennement élevée (Jbels Tghat et Zalagh : 900 m) présentant une superposition de formations liasiques (calcaires blanchâtres) reposant directement sur le substratum triasique (argiles) (Cherai 2009).

Figure 6. Topographie du bassin versant de l'oued Fès.

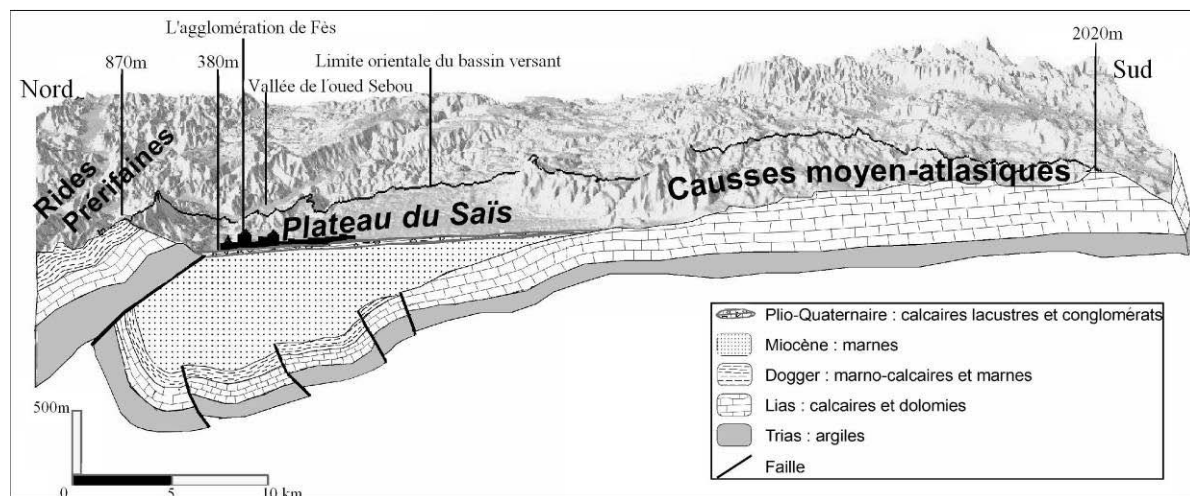


Figure 7. Coupe géologique schématique du bassin versant de l'oued Fès, inspirée de Taltasse (1953).

Le bassin jouit d'un climat méditerranéen influencé par la continentalité. Il est marqué par un contraste prononcé entre un été chaud et sec et un hiver frais et humide, ainsi que par une irrégularité intra-annuelle et interannuelle des apports pluviométriques, ces derniers étant décroissants du S vers le N (Fig. 8).

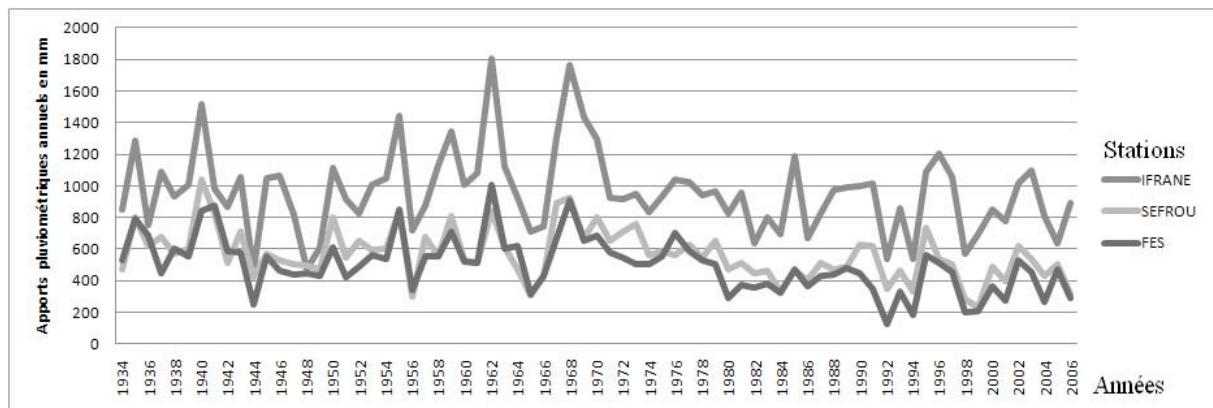


Figure 8. Variation spatio-temporelle des précipitations dans le bassin versant de l'oued Fès. Source : Agence hydraulique de Sebou.

Du point de vue hydrologique, le bassin versant de l'oued Fès (879,37 km²) est drainé par un réseau hydrographique relativement dense. Il est composé de plusieurs sous-bassins de tailles et morphologies différentes : oued Boufekrane (52,40 km²), oued El Mehraz (52,40 km²), oued El Himmer (80,74 km²), oued Chkou (428,08 km²) et oued El Malleh, à l'aval du bassin versant (34,03 km²). L'oued Fès représente le principal collecteur qui reçoit plusieurs affluents. Certains prennent naissance dans le causse du Moyen Atlas (oueds Boufekrane, El Mehraz, El Himmer, Chkou) et ont un écoulement saisonnier à intermittent ; d'autres affluents, alimentés par les sources artésiennes du plateau de Saïs (oueds Ain Chkef, Ain Smen, Ain Chgag et Ain Bou Rkaiz), ont un écoulement permanent. Les rides préférales contribuent aussi à l'alimentation de l'oued Fès (oued El Malleh et autres ravins).

L'agglomération de Fès se situe en zone de confluence du réseau hydrographique du bassin. Dès sa création, il y a douze siècles, son premier noyau (la médina de Fès) a trouvé dans sa situation à proximité de l'oued Fès et de la large vallée de l'oued Sebou une localisation stratégique afin de satisfaire ses différents besoins en eau. Au fil de son histoire, Fès a vécu des mutations majeures pour aboutir aujourd'hui à une agglomération couvrant à peu près une surface de 100 km² pour une population supérieure à un million d'habitants.

On peut résumer ces mutations en deux périodes majeures. La période coloniale (1912-1957) a été l'époque de la création de la ville nouvelle, dite « européenne », au-delà des murs de la médina. Cette période a ouvert le champ pour l'expansion urbaine et la suppression des droits acquis de la population de la médina. L'oued Fès (surnommé l'oued « Ljaouahir » ou des diamants pour sa pureté) irriguait les jardins de la médina. Il est devenu l'évacuateur des égouts de la ville nouvelle et il l'est toujours. La période post-coloniale correspond à la modification du mode d'urbanisation. L'explosion démographique de la ville de Fès a commencé après la période l'indépendance. La population a été multipliée par trois en 44 ans seulement (1960-2004). Cette croissance démographique a été accompagnée par un développement anarchique et chaotique, et le plus souvent incontrôlable, du tissu urbain, ce qui a eu pour conséquence de nombreuses installations dans des zones inondables, causant de nombreux problèmes environnementaux, de planification et de gestion du risque d'inondation.

4.2 Description des principales caractéristiques hydro-géomorphologiques

La diversité des caractéristiques morphologiques des bassins versants (Tableau 3), elles-mêmes influencées par les caractéristiques topographiques, géologiques et climatiques, se traduit par la dissemblance des caractéristiques hydro-géomorphologiques des cours d'eau d'un bassin versant à un autre et par conséquent du degré de l'aléa hydrologique et de son type.

Bassins versants	Oued Fes	Oued Boufekrane	Oued El Mehraz	Oued El Himmer	Oued Chkou	Oued El Malleh	
Périmètre	207,11 km	63,14 km	75,71 km	80,03 km	158.46 km	27,99 km	
Superficie	879,37 km ²	52,40 km ²	137,70 km ²	80,74 km ²	428.08 km ²	34,03 km ²	
Compacité	1.95	2,44	1,80	2,49	2,14	1,34	
Rectangle équivalent	L	93,45 km	29,76 km	33,91 km	37,92 km	67.99 km	10,80 km
	ℓ	9,41 km	1,76 km	4,06 km	2,12 km	6.29 km	3,15 km
Dénivelé théorique	2030 - 190 = 1840 m	1115 - 300 = 815 m	1210 - 300 = 910 m	1760 - 380 = 1380m	2030 - 380 = 1650 m	900 - 260 = 640 m	
Pente théorique	1,96%	2,73%	2,68%	3,63%	2.43%	5,92%	
Dénivelé utile	1350 m	420 m	660 m	1010 m	1310 m	370 m	
Pente utile	1.44%	1,41%	1,94%	2,66%	1,92%	3,42%	
Densité de drainage	1,68 km/km ²	1,40 km/km ²	1,33 km/km ²	1,70 km/km ²	1,79 km/km ²	4,03 km/km ²	

Tableau 3. Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l’oued Fès et de ses sous-bassins

Oued Fès

L’oued Fès représente la principale artère du réseau hydrographique du bassin (Figure 9). Il a une direction SW-NE en traversant la ville de Fès et sa *médina* sur un tronçon de 24 km avant de rejoindre l’oued Sebou. Ce cours d’eau apparaît au niveau du domaine de Ras El Ma, où il est alimenté par des sources très importantes (Photo 1) : Aïn Ras El Ma, Atrous, Bergama, Sennad, etc. qui lui garantissent un écoulement permanent, permanence soutenue par une nappe phréatique qui affleure d’ailleurs directement dans la vallée de l’oued Fès.

En fonction de ces caractéristiques hydro-géomorphologiques, on peut différencier deux domaines différents de l’espace fluvial de l’oued Fès :

Oued Fès amont : de sa source jusqu’au palais royal, sur un tronçon de 12 km. Sa vallée est caractérisée par une pente très douce, dans laquelle affleure la nappe phréatique qui donne des zones marécageuses (Merja). En plus des sources qui lui donnent naissance, l’oued Fès amont reçoit les eaux de plusieurs affluents.

Sa rive droite est alimentée en permanence par les eaux du bassin de l’oued Chkou, notamment les *oueds* Ain Chkef et Ain Smen. L’oued El Himmer rejoint également la rive droite de l’oued Fès amont ; bien qu’il soit le plus souvent sans débit, il joue un rôle important dans l’alimentation de l’oued Fès en période des pluies. La rive gauche, quand à elle, reçoit les torrents de Jbel Tghat.

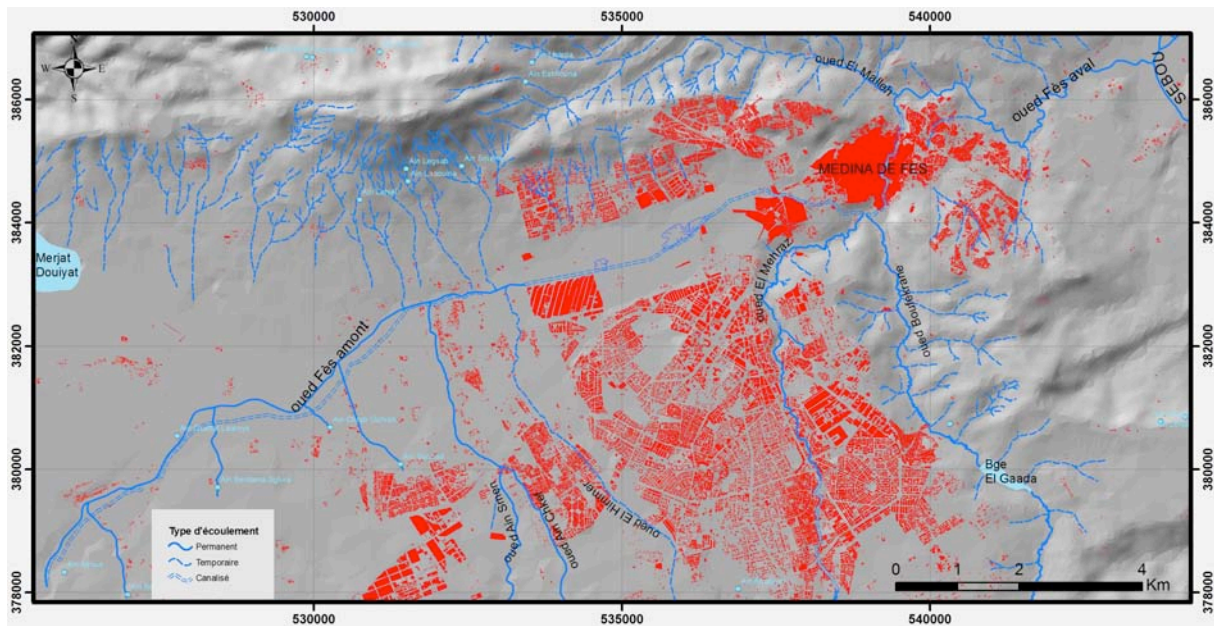


Figure 9. L'Oued Fès et ses affluents.

Oued Fès Aval : à l'entrée de la médina, les *oueds* El Mehraz et Boufekrane rejoignent l'*oued* Fès et renforcent son débit en période de pluies. Au niveau de la médina, l'*oued* Fès draine un canal dont la capacité d'évacuation oscille entre 50 et 80 m³/s. Après avoir traversé la médina, l'*oued* Fès aval rejoint la vallée qu'il a façonnée, en laissant plusieurs terrasses étagées datant du Quaternaire récent pour déboucher à l'*oued* Sebou.



Il faut mentionner que l'*oued* Fès reçoit la majeure partie des eaux usées de l'agglomération de Fès. Le traitement de ces apports polluants n'est pas suffisant ; par conséquent, l'*oued* Fès est considéré comme étant le principal polluant de l'*oued* Sebou et cause d'impacts environnementaux très néfastes.

Photo 1. Ain Bergama Lakkira dans la zone amont de l'oued Fès

Oued Boufekrane

Le bassin de l'*oued* Boufekrane s'étend sur une surface de 52 km² et une longueur de 29 km. Il prend origine à la source El Kantra, au pied du Jbel Ksiksou (1115m) situé dans le Moyen Atlas (Figure 10). Il représente la limite orientale du bassin versant de l'*oued* Fès, mais aussi du plateau de Saïs. Ce bassin versant est très allongé (indice de compacité de Gravelius = 2,44), sous forme d'une vallée plus ou moins encaissée, individualisant le chenal de l'*oued* Boufekrane. Ce dernier rejoint l'*oued* Fès à l'entrée de la médina.

Le régime de l'*oued* Boufekrane est principalement pluvial. Cependant, ce cours d'eau coule en permanence, car, tout au long de son trajet, il reçoit l'eau de plusieurs sources. Pendant l'été, la plupart de ces sources tarit, ce qui diminue l'écoulement de l'*oued* Boufekrane à quelques litres/seconde.

La majeure partie du bassin versant est caractérisée par une dominance des roches friables (marnes), permettant à différentes formes d'érosion de se développer.

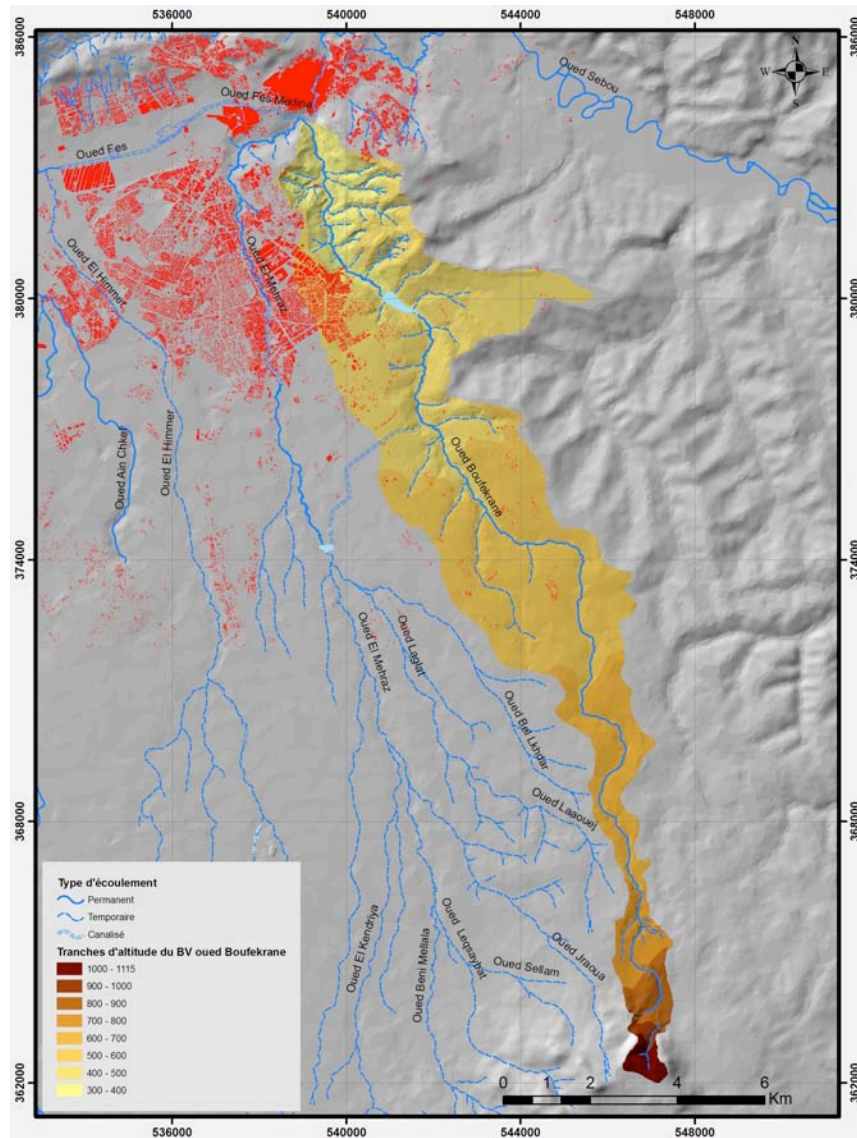


Figure 10. Le bassin versant de l'oued Boufekrane dans son contexte régional

La construction du barrage El Gaada (Photo 2), dont la retenue est d'environ 2,8 millions de m³ et du canal de dérivation des eaux de l'oued El Mehraz vers l'oued Boufekrane avec une longueur de 4100 m et une capacité d'évacuation est de 35 m³/s, ont fortement modifié les caractéristiques hydrologiques des deux bassins limitrophes. Ces constructions avaient pour principal objectif de contrôler les crues et diminuer leur risque. Malheureusement, la grande confiance qui a été accordée à ces ouvrages de protection a joué un rôle primordial dans l'augmentation de la vulnérabilité. En effet, un grand glissement des habitations (quartier Aouinat El Hajjaj) vers le fond de la vallée de l'oued Boufekrane a eu lieu après la construction du barrage El Gaada. Un établissement scolaire (école Mokhtar Essoussi) a même été construit à quelques mètres du lit mineur de l'oued Boufekrane. Ces infrastructures sont exposées aux inondations lors des débordements du barrage ou pendant l'ouverture de la vanne de vidange de ce dernier.



Photo 2. Barrage collinaire El Gaada presque plein

Avant de rejoindre l'oued Fès, l'oued Boufekrane déborde au niveau de Bab Jdid à plusieurs occasions. Ces débordements sont le plus souvent dus à l'incapacité du pont et du canal de Bab Jdid d'évacuer les crues de Boufekrane qui inondent une bonne partie de l'entrée de la médina jusqu'à Rcef.

Oued El Mehraz

Le bassin versant de l'oued El Mehraz couvre une surface de 137 km² et une longueur d'environ 34 km. Il est limité à l'Est par le bassin versant de Boufekrane et à l'Ouest par le Bassin de l'oued El Himmer (Figure 11).

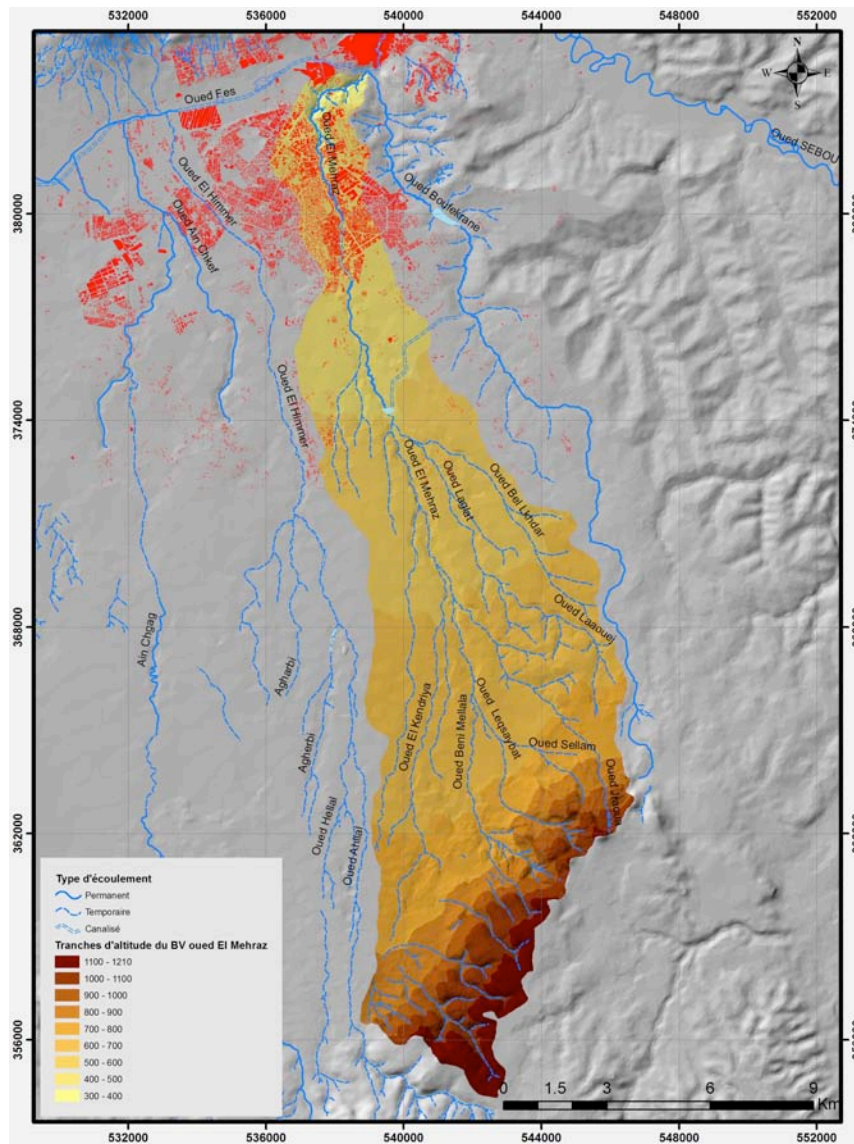


Figure 11. Le bassin versant de l'oued El Mehraz dans son contexte régional

La partie amont est située dans la tranche altitudinale de 900 à 1200 m qui correspond au *dir* de Sefrou sur lequel les affluents de l'oued El Mehraz ont incisé des ravins qui lui donnent naissance. L'oued El Mehraz ne prend son nom qu'après la confluence de ces affluents, qui sont par ailleurs relativement ramifiés.

Ce bassin versant a un régime pluvial : en dehors des périodes pluvieuses, le réseau hydrographique est généralement sans débit. Cependant, l'écoulement de l'oued El Mehraz est périodiquement alimenté par des sources temporaires, elles-mêmes alimentées par quelques résurgences de la nappe superficielle. Par ailleurs, pendant les mois d'été, l'oued El Mehraz est complètement à sec.

Cet *oued* est le plus dangereux du point de vue de l'aléa d'inondation, la crue du 26 septembre 1950 étant le témoin le plus important. En effet, selon une note de la direction des travaux publics (du 12 juin 1951), le débit de pointe de la crue de l'*oued* El Mehraz a dépassé 500 m³/s et ravagé tout ce qui était situé sur sa trajectoire. La crue du 13 octobre 1989 a également été documentée par l'Agence du bassin de Sebou (DRH Sebou Fès à l'époque) ; cette crue a largement dépassé 150 m³/s.



Vu la grande vulnérabilité face à l'aléa hydrologique de l'*oued* El Mehraz, plusieurs ouvrages de protection contre les inondations ont été édifiés. En 1993, le barrage Moulay Arafâ (Photo 3) a été mis en place directement après la confluence du réseau hydrographique du bassin, il a une capacité de 0,62 millions de m³, accompagné d'un canal de déviation des eaux qui sont déversées vers l'*oued* Boufekrane.

Photo 3. Barrage collinaire Moulay Arafâ

En 2008, ces deux ouvrages n'ont pas été suffisants pour protéger la zone aval (quartier Montfleurie) qui a été touchée par les crues suite au débordement du barrage. Plus récemment, des travaux de canalisation du tronçon urbanisé de l'*oued* El Mehraz ont eu lieu ; il s'agit d'un canal couvert dont la capacité est d'environ 20 m³/s (Photo 4). Plus en aval, la digue de Dhar El Mehraz joue un grand rôle dans la protection de la médina.

Photo 4. Canal couvert de l'*oued* El Mehraz dans le quartier Montfleurie



Oued El Himmer

L'*oued* El Himmer draine le bassin le plus étalé des sous-bassins de l'*oued* Fès (indice de compacité de Gravelius = 2,49). Il occupe une surface de 80 km² et a une longueur d'environ 38 km. Il est limité à l'Est par le bassin de l'*oued* El Mehraz et à l'Ouest par le Bassin de l'*oued* Chkou (Figure 12). Cet *oued* prend naissance dans un canyon très encaissé dans le massif calcaire de Kandar (1760m) ; à la sortie de ce dernier, son chenal prend l'allure d'un torrent très violent (Photo 5).

Bien que le dénivelé de ce bassin versant soit très important (1380 m), le système général de ces pentes n'est pas très prononcé (2,6 %), car la tranche d'altitude 1000-1760 m est limitée au niveau du massif de Kandar qui présente seulement 16 % de la surface générale du bassin versant. Cela a des conséquences sur le temps de concentration de cet *oued* qui est d'environ 3,5 h.



Photo 5. Oued El Himmer à la sortie du massif de Kandar

Comme les *oueds* Boufekrane et El Mehraz, l'*oued* El Himmer a un régime pluvial. Ses réponses hydrologiques diffèrent fortement entre l'amont et l'aval. A l'amont, l'*oued* El Himmer est caractérisé par des crues éclair à cause du relief fort du massif de Kandar, ces crues provoquant un grand charriage de matériel grossier.

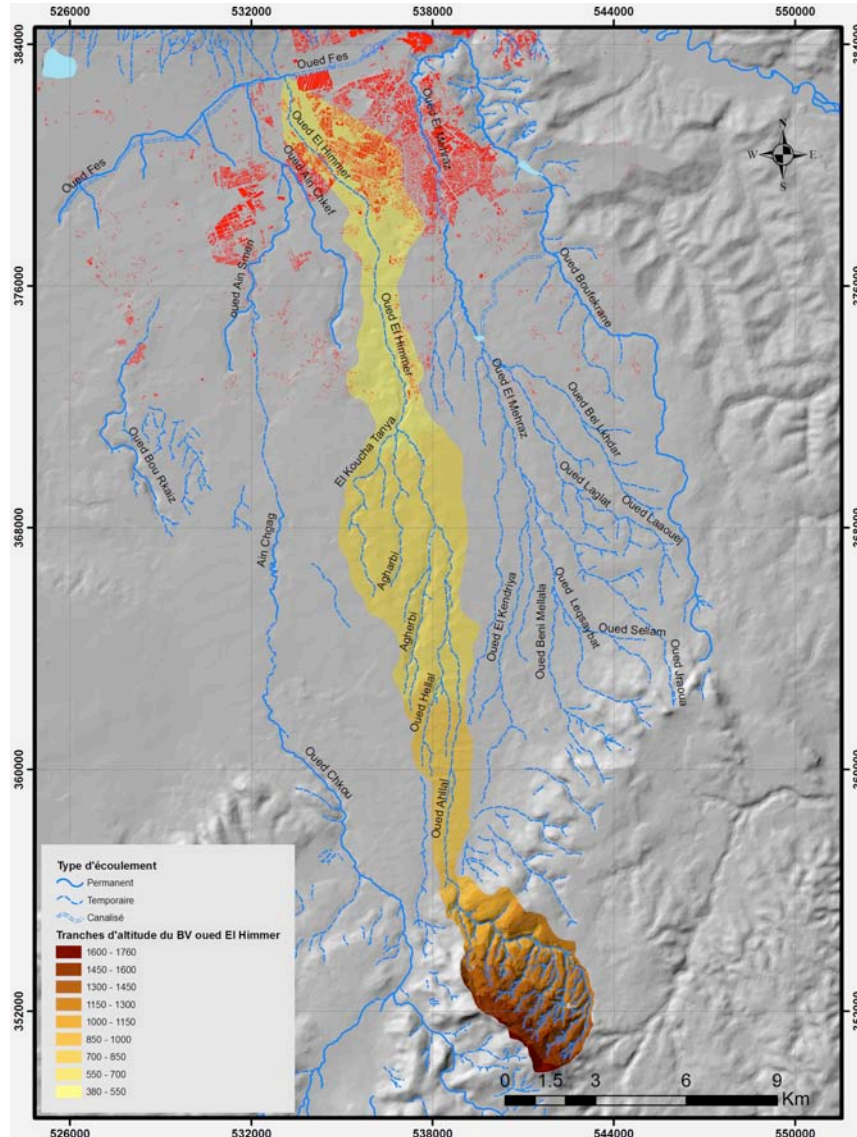


Figure 12. Le bassin versant de l'*oued* El Himmer dans son contexte régional



Vers l'aval, les crues perdent leur force et tendent à avoir un écoulement laminaire, qui s'alimente de quelques affluents. A ce niveau là, le transport solide de l'*oued* El Himmer se limite à des sables fins et des limons rougeâtres (Photo 6) qui donnent à l'*oued* El Himmer sa nomination (l'*oued* rougeâtre). Les débordements de cet *oued* en aval ont créé de petites plaines alluviales.

Photo 6. Trace du débordement de l'*oued* El Himmer sur la traversée de la route Fès Bhalil.

Avant de rejoindre l'agglomération de Fès, l'oued El Himmer trouve plusieurs obstacles sur sa trajectoire, sur lesquels il déborde et perd son énergie. En effet, l'oued El Himmer traverse la route de Fès – Imouzzer à trois reprises, par des ponts sous-dimensionnés, favorisant les débordements (Photo 6). La piste de l'aéroport de Fès – Saïs présente quand à elle un obstacle pour l'écoulement. En octobre 2000, une crue de l'oued El Himmer a débordé du canal souterrain de la piste de l'aéroport et inondé une partie de la piste. Cette crue a atteint 2 mètres de hauteur.



Dans la ville de Fès, la plupart des ouvrages de franchissement (ponts et canaux couverts) de l'oued El Himmer sont sous-dimensionnés et le plus souvent partiellement bouchés. Les débordements des crues sont très fréquents, touchant plusieurs quartiers. La traversée du chemin de fer pose également problème. La buse est sous-dimensionnée (Photo 7) ; par conséquent, les rails sont souvent noyés pendant les crues, ce qui perturbe le trafic ferroviaire à plusieurs occasions.

Photo 7. Buse insuffisante pour l'évacuation des eaux au passage de la voie de chemin de fer

Actuellement, plusieurs lotissements en cours d'aménagement empiètent sur les zones inondables de l'oued El Himmer, notamment suite aux travaux de canalisation sur un tronçon d'environ 2 km avec un débit de 25 m³/s, qui donnent un faux sentiment de sécurité. En effet, il ne faut pas oublier que les crues de l'oued El Himmer peuvent être dévastatrices, comme elles l'ont été le 26 septembre 1950 avec un débit de pointe d'environ 150 m³/s (selon une note de la Direction des travaux publics du 12 juin 1951).

Oued Chkou

Avec une surface de 428 km², l'oued Chkou draine le plus grand sous-bassin de l'oued Fès. Il coule sur une longueur d'environ 68 km, pour un dénivelé de 1650 m (Figure 13). Contrairement aux autres sous-bassins de l'oued Fès, la majeure partie du bassin versant de l'oued Chkou s'étend sur les Causses moyen-atlasiques. La tranche altitudinale 1000-2030 m couvre 71 % de la surface du bassin versant.



Photo 8. Oued El Qantra en amont du bassin versant de l'oued Chkou

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Chkou est très complexe. En amont, il est très dense et présente des écoulements permanents, tandis qu'à partir du *dir*, l'écoulement s'individualise et devient endoréique avant de s'enchaîner à deux reprises à partir des sources artésiennes du plateau de Saïs (Ain Chgag et Ain Smen). Le bassin versant de l'oued Chkou peut être divisé en trois domaines différents.

Le domaine des causses moyen-atlasiques. Il s'agit du causse d'Imouzzer, qui est considéré comme zone 'humide' du fait qu'elle constitue une barrière pour les perturbations humides atlantiques. La pluviométrie est élevée, pouvant atteindre 1808 mm/an (en 1962 à la station d'Ifrane). Les températures sont relativement douces en été et froides en hiver, période durant laquelle elles

tombent souvent en dessous de 0°. Par conséquent, la neige est fréquente et peut perdurer pendant plusieurs jours à haute altitude et sur les versants ombrés (Lasri et al., 2011).

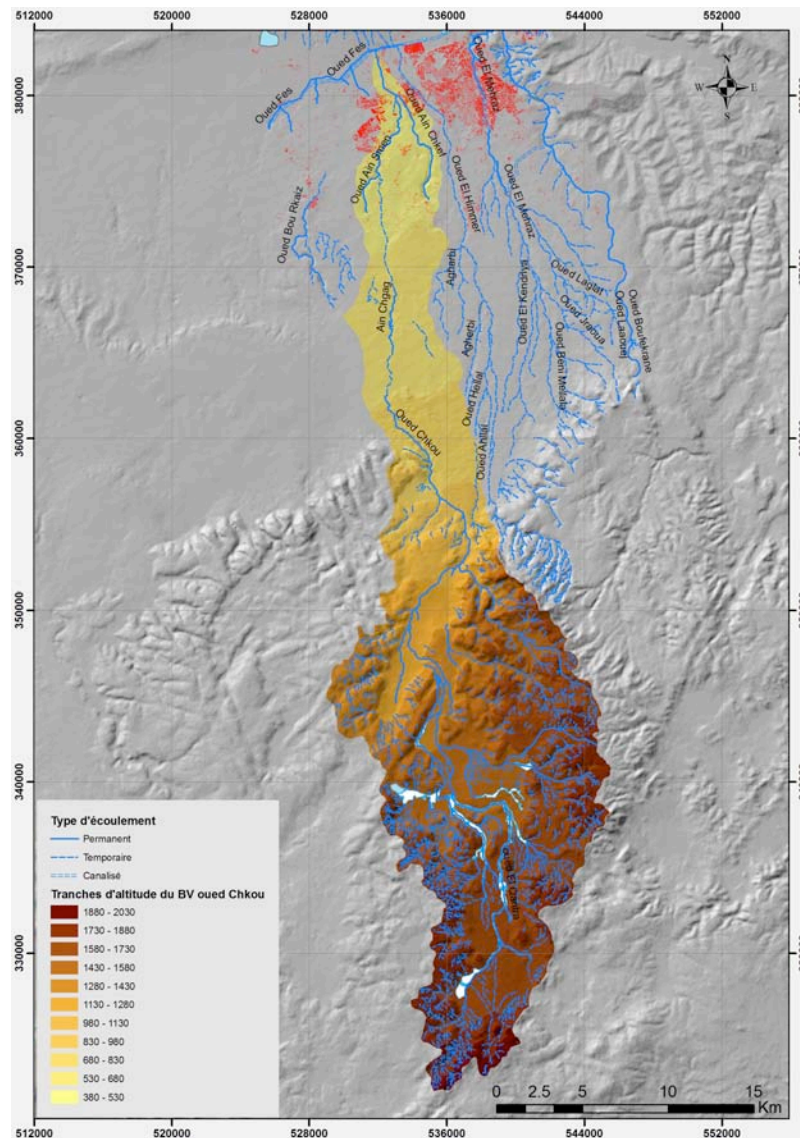


Figure 13. Le bassin versant de l'oued Chkou dans son contexte régional

En raison de la grande dominance des roches carbonatées du Lias (calcaire et dolomie), cette partie du bassin versant est karstique. Les sources sont très abondantes ; par ailleurs, la nappe affleure et crée des lacs (dayat Aoua et dayat Hachlaf).



Photo 9. Oued Chkou à l'amont de Ain Chgag

Le couvert végétal est bien développé, sous forme de forêts de chêne vert, ainsi que quelques cèdres occupant les points culminants. L'arboriculture (pommiers) est omniprésente dans les dépressions. L'oued Chkou apparaît à proximité de Dayat Hachlaf où il prend le nom d'oued El Qantra (Photo 8).

Le domaine du dir. L'écoulement de l'oued Chkou est capturé par plusieurs *seguias*¹ qui irriguent des vergers et des maraîchages. Le débit diminue ainsi de plus en plus, avant de s'assécher. Cependant, en périodes de fortes pluies, les crues de l'oued Chkou peuvent être importantes et arrivent à rejoindre l'oued Ain Chgag.

Le plateau du Saïs. La source artésienne Ain Chgag réactive le drainage de l'oued Chkou pendant la saison sèche, période durant laquelle l'oued Chkou peut s'assécher encore une fois avant de rejoindre le canyon de l'oued Ain Smen. A partir de ce dernier, l'oued draine en permanence jusqu'à l'oued Fès. L'oued Ain Chkef, pour sa part, soutient l'écoulement en aval et le rend régulier.

En ce qui concerne les inondations l'agglomération de Fès, la crue de l'oued Chkou du 26 septembre 1950 est le seul événement notable relevé. Cette crue a dépassé 150 m³/s (selon la note de la Direction des travaux publics du 12 juin 1951). De nos jours, l'expansion urbaine glisse vers des zones inondables de l'oued Ain Smen (aval de l'oued Chkou), augmentant ainsi la vulnérabilité. Par ailleurs, ces dernières années l'oued a débordé à plusieurs reprises au niveau des traversés de routes et inondé les quartiers limitrophes.

Oued El Malleh

Le bassin versant de l'oued El Malleh couvre une surface de 34,03 km². Il draine la zone marneuse des rides pré-rifaines, avant de rejoindre l'oued Fès aval. Ce bassin versant est ramassé (indice de compacité de Gravelius = 1,34) et son réseau hydrographique est très ramifié et avec une grande densité de drainage (4,03 km/km²) (Figure 14).

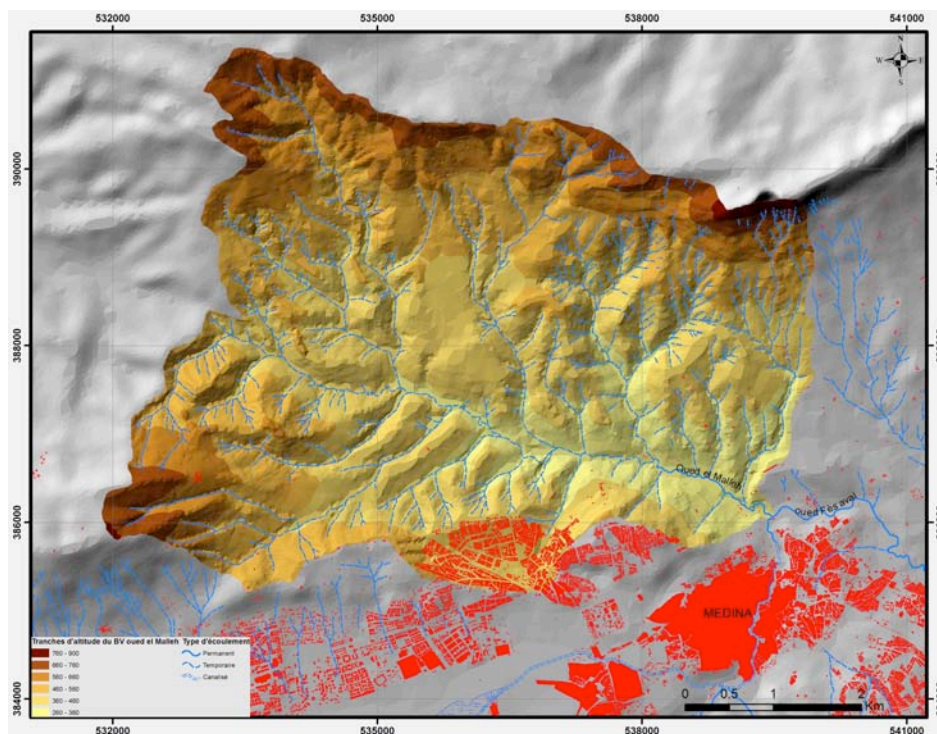


Figure 14. Bassin versant de l'oued El Malleh

Le système des pentes de ce bassin est élevé (pente théorique = 5,92 %), favorisant une érosion agressive en l'absence de couvert végétal. Tous ces facteurs rendent l'écoulement de l'oued El Malleh très torrentiel, avec un bref temps de concentration (0h57m). Cependant, pour le moment, le risque d'inondation lié à l'oued El Malleh reste très faible en l'absence d'enjeux vulnérables. Toutefois, ce bassin versant présente un autre risque majeur lié aux mouvements des terrains marneux, sur lesquels

¹ Canal d'irrigation traditionnel.

se trouvent les quartiers périphériques septentrionaux de Fès (quartiers Ben Sliman, El Hassani, El Wifaq) menacés par des processus d'effondrement. Ces derniers abritent une très grande densité de la population.

Oued Bou Rkaiz

L'*oued* Bou Rkaiz se localise à la périphérie SW de l'agglomération de Fès. Il s'agit d'un canyon encaissé (10 à 20 mètres) dans les calcaires lacustres du Pliocène. Cet *oued* est alimenté par plusieurs sources artésiennes dont Ain Bou Rkaiz est la principale. Il draine le canyon sur une longueur d'environ 7 km avant de se terminer au niveau d'une dépression travertineuse dans le domaine de Zliligue (Figure 15). Cette dépression infiltre la majorité des eaux de l'*oued* Bou Rkaiz qui rejoignent la nappe phréatique et resurgissent ensuite dans les sources de l'*oued* Fès.

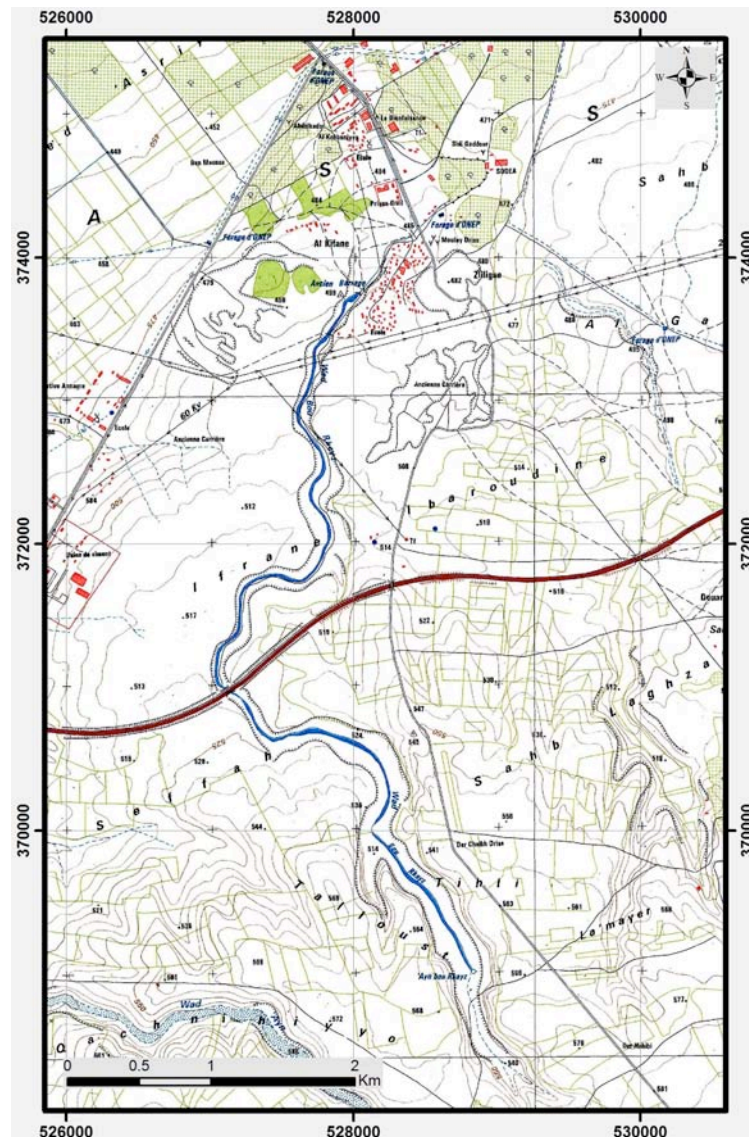


Figure 15. Oued Bou Rkaiz (Extrait de la carte topographique d'Ain Chkef 2007 au 1 : 25'000)

A partir des années 1970, le débit de l'*oued* Bou Rkaiz a fortement diminué. La cause n'est pas seulement une succession d'années sèches, mais aussi la grande exploitation des eaux de la nappe pour satisfaire les besoins en eau potable et irriguer les vastes terrains agricoles. Actuellement, les eaux de l'*oued* Bou Rkaiz peinent à atteindre la dépression qui absorbe la totalité des eaux.

Le 20 février 2010, suite aux précipitations intenses qui se sont abattues sur la totalité du bassin versant de l'*oued* Fès, les sources de l'*oued* Bou Rkaiz ont généré une crue exceptionnelle (Photo 9). Cette dernière a inondé la prison civile de Bou Rkaiz. La route provinciale Ras El Ma – Ain Taoujdate

(qui est en remblai) a stoppé les crues de l'oued et augmenté la hauteur d'eau au niveau de la dépression et de la partie submergée de la prison. La partie aval (en dessous de la route où se trouvait un lotissement en cours d'aménagement) a également été touchée par ces inondations, suite à l'incision d'un canal (Photo 10) au niveau de la route, permettant l'évacuation des eaux de la crue.



Photo 9. La décrue de l'oued Bou Rkaiz



Photo 10. Canal d'évacuation de la crue de l'oued Bou Rkaiz

4.3 Principaux enjeux de gestion

Les conditions attractives, qui expliquent l'installation de Fès dans une zone abondante en eau, provoquent actuellement une situation de grande vulnérabilité face à un aléa d'inondation remarquable (Lasri et al., 2011).

Oueds	Boufekrane		El Mehraz		El Himmer		El Malleh	Chkou
Temps de concentration au niveau de :	Entrée de la ville	Exutoire	Entrée de la ville	Exutoire	Entrée de la ville	Exutoire	Exutoire	Amont de l'oued Ain Smen
	2h39m	2h54m	1h22m	2h38m	2h39m	3h30m	0h57m	5h07m

Tableau 4. Temps de concentration calculé pour les principaux cours d'eau

Bien que l'oued Fès soit le principal collecteur du réseau hydrographique du bassin versant, les affluents qui prennent naissance sur le causse moyen-atlasique sont les plus dangereux en matière d'aléa hydrologique, du fait de leur caractère brutal et violent. En raison de l'absence de stations hydrométriques sur le bassin versant, ces deux caractères (soudaineté et violence des crues) ont été approchés au moyen de formules empiriques. Les résultats obtenus démontrent que l'aléa hydrologique de ces oueds est très élevé. D'une part, le temps de concentration des cours d'eau est très court (Tableau 4), ce qui rend les opérations de prévision et d'alerte des riverains difficiles. D'autre part, les débits de pointe des oueds sont très élevés, limitant ainsi le rôle des ouvrages hydrauliques pour la protection contre les inondations.

Les événements historiques qu'a connus Fès témoignent de l'importance de l'aléa hydrologique. Les événements les plus spectaculaires sont ceux du 26 septembre 1950 et du 13 octobre 1989, suite à des précipitations orageuses concentrées sur les versants nord des causes Sefrou et Imouzzar. Ces précipitations ont causé des inondations dévastatrices dans l'agglomération de Fès et sa périphérie par débordement des oueds Boufekrane, El Mahraz, El Himmer et Chkou. Heureusement, la médina de

Fès n'a pas subi les effets de ces inondations, grâce autant aux débordements des *oueds* dans la périphérie sud de la ville qu'à la présence de la digue de Dhar El Mehraz qui a écrêté les crues à l'entrée de la médina.

Un autre type d'aléa hydrologique est présent dans le bassin versant de l'*oued* Fès : il s'agit des inondations dues essentiellement à l'affleurement de la nappe phréatique. Ce phénomène touche la vallée de l'*oued* Fès amont et cause des inondations très étendues qui peuvent persister pendant une période considérable. Ce processus dépend des mécanismes de remplissage - vidange de la nappe phréatique, ainsi que des apports du drainage superficiel.

Ces événements avaient tendance à être oubliés, mais grâce aux événements récents de 2008, 2009 et 2010 qui ont touché le Maroc en général, la mémoire du risque s'est réactivée auprès des différents acteurs concernés. Malgré cette prise de conscience récente, le champ d'intervention pour pallier à l'aléa est restreint à cause d'une vulnérabilité déjà alarmante.

Les ouvrages de protection contre les crues ont été mis en place au fur et à mesure avec le développement du tissu urbain. Cette politique préventive a été la principale démarche de gestion mise en œuvre jusqu'ici. En effet, dès la colonisation française, la mise en œuvre de la digue de Dhar el Mehraz a préservé la médina des crues de l'*oued* El Mehraz à plusieurs occasions. Les constructions des barrages El Gaada (en 1992 sur l'*oued* Boufekrane avec une retenue de 2,8 millions de m³), et Moulay Arafâ (sur l'*oued* El Mehraz en 1993 avec une retenue de 0,6 millions de m³ accompagné d'un canal de déviation vers l'*oued* Boufekrane) ont bien joué leur rôle de protection pendant 15 ans.

De nos jours, avec la nouvelle tendance climatique au Maroc, les travaux de protection de Fès ne sont plus suffisants. En octobre 2008, les crues ont ainsi débordé au niveau des barrages El Gaada et Moulay Arafâ. Après ces événements, qui ont inondé plusieurs secteurs de l'agglomération de Fès, des travaux de canalisation ont été lancés pour évacuer les crues des *oueds* en question. Si ces canaux seront suffisamment calibrés pour évacuer les crues, ils risquent de poser des problèmes en aval. Pour minimiser ce risque, d'autres ouvrages de protection sont projetés à l'amont de l'agglomération (barrages et canaux de déviation).

Face à cette difficulté à maîtriser l'aléa d'inondation, la DDC suisse finance actuellement une étude de mise en place d'un dispositif de prévention et d'alerte face aux crues. Cette étude est menée par l'agence hydraulique de Sebou et a pour principal objectif d'avertir les riverains et minimiser les dégâts.

5. Carte des phénomènes du bassin versant de Beni Mellal

5.1 Bassins versants et contexte urbain

La ville de Beni Mellal, dans la région de Tadla Azilal, est située sur le piémont nord-atlasique, à l'exutoire de quatre bassins versants de petite taille mais à forte énergie du relief : les bassins versants des *oueds* Sabek (26.1 km²), Aïn El Ghazi (14 km²), El Handak (31.1 km²) et Kikou (63.7 km²) (Figure 16).

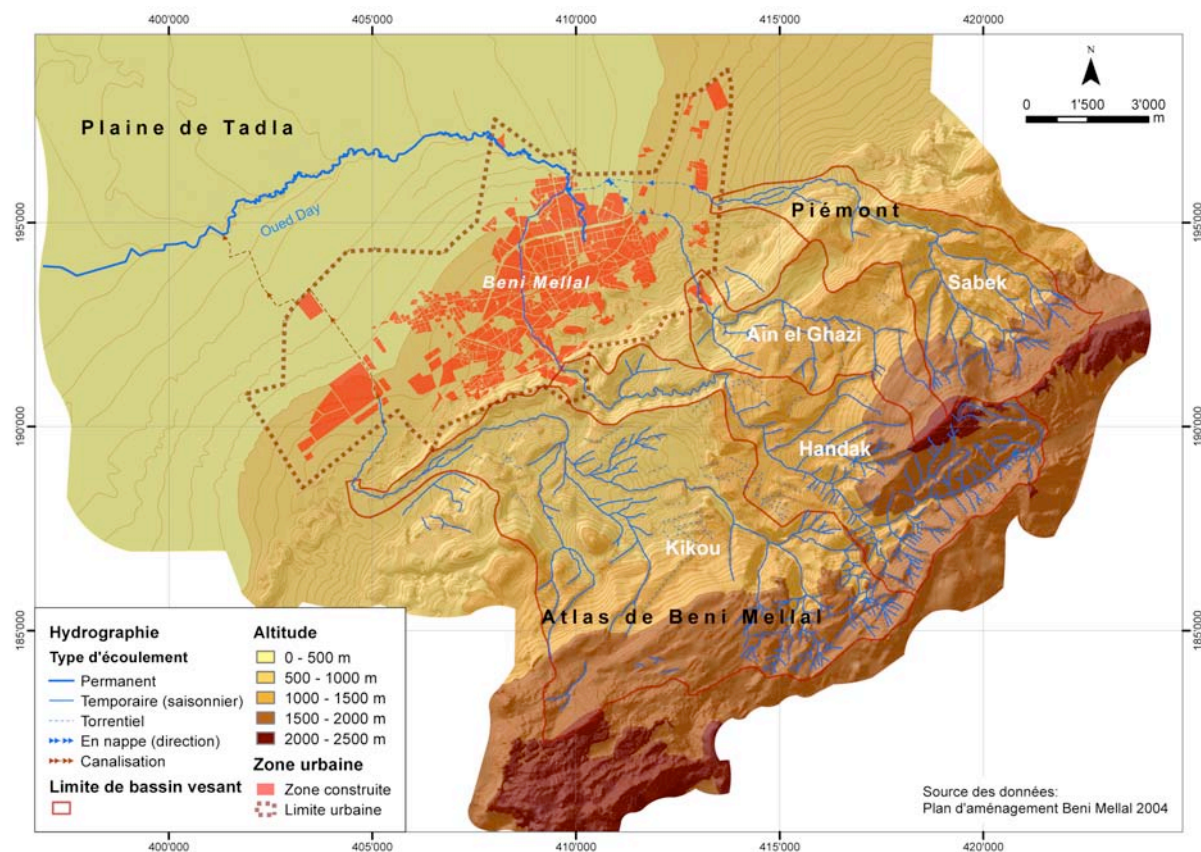


Figure 16. Carte du terrain d'étude

Cette zone appartient à l'Atlas de Beni Mellal, zone de jonction tectonique entre le Moyen et le Haut Atlas (Monbaron, 1981). Constituée en grande partie de roches calcaires, certaines zones sont occupées par des marnes et marno-calcaires qui facilitent le déclenchement de crues rapides et de grande intensité. Le relief est important, avec un étagement altitudinal de 1500 – 1800 m entre les points les plus élevés et l'exutoire. Les vallées sont marquées par des canyons sculptés dans la roche calcaire alternant avec des zones de relatif élargissement (Werren et al., 2011). Les cours d'eau ont un régime à caractère saisonnier, avec des écoulements seulement en période de crue ou de fonte des neiges. Un charriage solide important a été observé, notamment sur le bassin versant de l'*oued* Sabek.

Le *dir*, bande collinaire de piémont, marque le point de sortie de la zone encaissée montagneuse et le début (l'apex) des grands cônes alluviaux de piémont. Cette zone de transition garde sur certains cours d'eau (Handak, Kikou) les marques d'au moins deux cycles d'incision sous la forme de talus et de terrasses.

L'ajustement géomorphologique entre les deux domaines a été réalisé par la mise en place de larges cônes alluviaux datant du Quaternaire ancien (Carte géologique au 1 :100'000, Feuille Beni Mellal). Sur les cônes, actuellement fossiles et en partie encroûtés, d'anciens chenaux peuvent encore être observés. Les zones d'alluvionnement actuelles, assez restreintes en surface, sont alimentées par les quatre cours d'eau. Un écoulement en nappe des eaux de crue et la création de chenaux éphémères en

sont les principales caractéristiques. Les cônes sont actuellement occupés par des plantations d'oliviers relativement étendues qui laissent place peu à peu à un développement urbain soutenu.

La zone distale des cônes et le contact avec la plaine de Tadla sont marqués par le stationnement des eaux de crue et une nappe phréatique rapprochée donnant naissance à des terrains relativement humides. Il s'agit d'une zone de confluence des eaux provenant des bassins versants des *oueds* Sabek, Aïn el Ghazi et Handak qui sont acheminés vers l'aval par l'*oued* Day.

A partir des années 1970, la ville de Beni Mellal a connu un fort développement spatial et démographique qui coïncide avec l'exode rural provoqué d'un côté par la sécheresse en montagne et de l'autre par la mise en valeur de la grande zone agricole irriguée de la plaine de Tadla (El Khalki et al., 2005). Le développement de la ville continue à un rythme important. Peu maîtrisée, cette extension urbaine pose de nouveaux problèmes d'aménagement et de gestion des dangers.

5.2 Caractéristiques hydro-géomorphologiques des bassins versants

Les paramètres morphométriques calculés pour les quatre bassins versants témoignent d'une variabilité spatiale qui peut engendrer des réactions bien différentes pour des bassins versants pourtant contigus. Quelques attributs en ressortent (Tableau 5) : une forme plutôt allongée (coefficient de Gravelius supérieur à 1,6), un fort dénivelé et des pentes hétérogènes.

Bassin versant	Surface (km ²)	Périmètre (km)	Coeff. de Gravelius	Dénivelé (m)	Pente moyenne (degrés)	Longueur du talweg (km)	Temps de concentration (Tc)
Sabek	21.9	27.1	1.64	1667	21	11	1h
Aïn el Ghazi	15.0	22.3	1.62	1618	15	7	<1h
Handak	29.3	35.3	1.84	1594	19	20	2h
Kikou	54.7	42.8	1.63	1565	14	20	2h

Tableau 5. Principales caractéristiques morphométriques des quatre bassins versants de Beni Mellal

Cette section présente une description des principales caractéristiques hydrogéomorphologiques et des enjeux liés aux crues pour chaque bassin versant.

5.2.1 Sabek

Le bassin versant de l'*oued* Sabek est limité vers le SSE par la crête sommitale Tasmite – Iloughmane avec des altitudes comprises autour de 2000-2200 m. Vers l'ENE, la ligne de séparation avec l'*oued* Taghaghat perd progressivement en altitude, de même que la limite SW avec l'*Oued* Handak. Au N, le cours d'eau débouche sur la zone de cône dans le village de Hadouz, à une altitude d'environ 650 m. Le débouché marque l'apex d'un grand cône alluvial en grande partie encroûté que le cours d'eau actuel contourne en inscrivant une gorge à la limite entre ce dernier et des matériaux molassiques appartenant au *dir*.

Photo 11. Dépôts récents sur cône et chenal éphémère (*oued* Sabek).



Plus en aval, à la hauteur du quartier Mghila, le cours d'eau perd son chenal, laissant place à une surface de cône alluvial active, marquée par des alternances de bancs de graviers et d'accumulations plus fines, tandis qu'un système de chenaux éphémères s'est mis en place (Photo 11).

Du point de vue lithologique, le bassin versant est en grande partie formé de roches calcaire liasiques, à l'exception de la crête sommitale du Tasmit qui culmine à 2213 m, où des roches friables (marnes, marno-calcaires) affleurent. Cette zone est dénuée de végétation, ce qui entraîne une forte érosion des versants. La végétation dans le bassin versant est surtout formée de matorral à divers degrés de dégradation, de quelques taches de forêt et de terrains agricoles en *bour*² qui restent dénudés en dehors des périodes de croissance.

Tous ces aspects pourraient expliquer la forte torrencialité du cours d'eau qui transporte une importante charge solide pour la déposer en aval sur le cône alluvial. Les observations sur le terrain ont montré que la zone de dépôt du matériel solide avance vers la zone distale du cône à chaque crue, de manière que actuellement la route nationale Fès – Marrakech est menacée non seulement par les écoulements en nappe provenant du cône mais aussi par des dépôts de gravier. Les eaux de crue, qui s'écoulent en nappe, convergent avec les eaux provenant de l'*oued* Aïn el Ghazi en se dirigeant vers la zone de confluence avec l'*oued* Day et Handak située au Nord de la ville, pour créer une grande zone d'inondation.



Entre Hadouz et Mghila, l'*oued* Sabek longe, sur une distance d'environ 1 km, la décharge municipale de la ville de Beni Mellal (Photo 12). Cette dernière n'est pas construite selon des normes de sécurité et d'hygiène acceptables et représente un foyer de pollution important. Lors des crues, tel l'événement du 29 septembre 2009, l'*oued* déborde en inondant la décharge et emporte des déchets pour les déposer en aval sur le cône alluvial.

Photo 12. Effet des débordements de l'*oued* Sabek sur la décharge de la ville.

Un projet de déviation du trajet du cours d'eau, avec la construction d'un lit artificiel, est actuellement en route. Ce dernier partirait du quartier Mghila pour ramener les eaux jusqu'à la zone de confluence située au Nord de la ville.

5.2.2 Aïn el Ghazi

Le bassin versant le plus restreint du terrain d'étude est limité vers le N par la crête sommitale du Tasmit (alt. 2200 m) tandis que les limites ENE et SW le démarquent des bassins versants voisins du Sabek et du Handak. La lithologie est homogène, avec des calcaires liasiques sur la plus grande partie du terrain. Vers le N, l'*oued* Aïn el Ghazi débouche sur la zone de cône alluvial en aval du village homonyme au niveau de la route menant de Beni Mellal à Taghzirt. A la sortie de la zone encaissée montagneuse, une digue d'écrêtage des crues a été réalisée au cours de l'année 2010. Une carrière exploitant le calcaire se trouve aussi dans la même région.

Il est à remarquer que la construction de routes pour atteindre la carrière et la digue nouvellement créée a eu un fort impact sur la stabilité des versants dans cette zone, l'érosion régressive étant très active (Photo 13). Le matériel mobilisé sur les versants alimente le cours d'eau en charge solide, augmentant le danger lié aux inondations.

A l'aval du village Aïn el Ghazi, le cours d'eau forme des gorges d'environ 20 m de profondeur dans des formations conglomératiques appartenant au *dir*. A la sortie de la zone collinaire, un premier point

² Terrain agricole non irrigué.

de débordement se forme à la traversée de la route de Taghzirt. Le passage est sous-dimensionné et une forte érosion des bords de la route a été entamée. Cet endroit marque le passage à la zone de cône, où les dimensions du chenal d'écoulement diminuent fortement, le surplus débordant à la surface du cône. Une forte incision verticale est à remarquer dans ce secteur.

Au niveau de la *segua* Harboulia, le chenal disparaît en laissant la place à une surface de dépôt de la charge solide sous forme de petit cône alluvial actif (Photo 14). Les dépôts dans cette zone sont assez grossiers (gravier) tandis que les fines sont déposées plus en aval, lorsque l'énergie d'écoulement diminue. Les eaux de crue inondent la zone se situant en aval de ce cône en s'unissant avec les eaux provenant de l'*oued* Sabek. Comme pour ce dernier, un projet de déviation par canalisation est en cours de réalisation actuellement.



Photo 13. Mobilisation des matériaux sur les versants par érosion régressive le long d'une route d'accès.
Photo 14. Dépôts de cône actif en aval de la *segua* Harboulia.

5.2.3 Handak

Vers le SSE, le bassin versant est limité par la crête sommitale Idemrane qui se situe autour de 1900 m d'altitude ; au S, la limite avec le bassin versant de l'*oued* Kikou se fait le long de crêtes qui perdent en altitude en s'approchant de l'exutoire, tandis que le même étagement des altitudes se remarque sur la limite N avec le bassin de l'*oued* Ain el Ghazi. Le débouché de la zone montagneuse se fait au niveau du village Ourbi'.

L'*oued* Handak est une vallée en baïonnette typique en raison de son emplacement à l'intersection de failles orthogonales (Khalki et al., 2005). Ainsi, les différents secteurs mis en évidence par la direction des failles portent des noms différents (*Oued* Bou Tout, Akka N'Khelila, Handak), ce qui témoigne de la diversité du paysage induite par la structure. Un premier secteur, l'*oued* Bou Tout, incisé dans des roches friables et souvent à nu, est caractérisé par la présence de nombreux ravins alimentant le cours d'eau. Suit une zone d'élargissement (la plaine de Mouj), occupée par des alluvions quaternaires. Un deuxième secteur d'incision, sous forme de gorges assure un transit rapide des eaux écoulées dans le bassin versant vers l'exutoire. A la limite de ces gorges, une digue d'écêtement de crues a été construite dans le but de lamener le pic de crue pour permettre une meilleure gestion de l'écoulement en aval.

Le cours d'eau traverse le *dir* par un secteur de vallée dont l'incision atteint 30 m de profondeur et avec un niveau intermédiaire de terrasses situé à 5-15 m. Le secteur du cours d'eau qui traverse le cône alluvial est fortement urbanisé : des travaux de protection ont donc été entrepris en priorité de façon qu'actuellement, la plus grande partie de cette section est canalisée. En amont de la section canalisée, des travaux d'élargissement et de surcreusement du lit ont été réalisés en 2010 dans le but d'assurer un passage rapide des eaux de crue.

Le principal problème dans le secteur canalisé est le sous-dimensionnement des ouvrages d'art (ponts et traversées de chaussée) qui provoque des débordements. L'effet de bouchon a même amené à la destruction d'un pont à la sortie de la zone encaissée du *dir*, à Ourbi', lors des crues de mars 2010 (observation sur le terrain, Photo 15). Les nouveaux ouvrages de protection ont en partie résolu le problème des inondations par débordement.



Pourtant, avec les différents travaux de construction, le danger d'inondation a été déplacé vers l'aval ; ainsi, les quartiers situés dans la zone distale de confluence des eaux ont été fortement affectés en 2009 et 2010.

Photo 15. Pont emporté lors de la crue de mars 2010 dans le quartier Ourbi'.

5.2.4 Kikou

Le bassin versant le plus étendu du terrain étudié est délimité vers le N par la crête sommitale Idemrane (environ 1900 m), constituée de roches friables à caractère marneux, et au N et NW par un plateau karstique dépourvu d'écoulement de surface. Au NE, il avoisine le bassin de l'oued Handak, tandis qu'à l'Ouest, une crête passant par les pics Timfidine (1678 m) et Jbel Taggout (1072 m) le sépare du bassin versant voisin. Au N, le cours d'eau longe les collines du *dir* en les contournant pour déboucher sur un grand cône alluvial fossile.

Dans ce secteur, le chenal d'écoulement peut atteindre 15 m de largeur et des phénomènes actifs de sapement des berges ont été remarqués. A la hauteur de la route nationale en direction de Marrakech, le cours d'eau a été canalisé par un ouvrage sous-dimensionné qui provoque des débordements à chaque crue. Ce dernier atteignait 2 m en largeur en aval de la route et il a été détruit lors de la crue de mars 2010 qui a incisé un chenal de 15-20 m de largeur et 5-7 m de profondeur (Photo 16).



Photo 16. Ouvrage détruit par les crues en aval du pont de la route de Marrakech.

Les inondations de l'oued Kikou touchent la zone industrielle de la ville. Plusieurs fabriques dans la zone ont été touchées lors des inondations documentées dans cette recherche. En cas de débordement, les eaux de crue suivent la rue provinciale de Fkih ben Salah située le long du trajet naturel de l'oued. Au niveau du *souq* de Beni Mellal, l'ouvrage de canalisation croise un grand canal d'irrigation. A cet endroit, lors de la crue de septembre 2009, le canal a été chargé par les eaux de crue, débordant sur le quartier d'habitations informelles de Oulad Attou.

5.2.5 Oued Day

Ce cours d'eau naît à la base du promontoire travertineux sur lequel est construite la *medina* de la ville. Sa source karstique a été depuis longtemps asséchée ; pourtant, il reçoit dans la zone distale des cônes alluviaux, dans une zone plane de confluence, les eaux provenant des bassins versants Sabek, Aïn el Gahzi et Handak. Plus en aval, ce cours d'eau forme une petite plaine alluviale, il reçoit également les eaux de l'oued Kikou et se jette dans le fleuve Oum er Rhbia. L'oued Day est canalisé sur toute sa longueur et présente de graves problèmes de pollution des eaux.

5.3 Principaux enjeux de gestion

Le problème des inondations se pose sur tous les cours d'eau dès la sortie de la zone encaissée de la montagne ou du *dir*. En effet, les eaux de crue confinées jusque là dans des vallées sont brutalement libérées, provoquant des débordements. Sur les cônes alluviaux, les longues années de sécheresse connues depuis les années 1970 ont mené à la disparition graduelle des chenaux et à la mise en place d'un style d'écoulement en nappe. En même temps, le développement de la ville sur les zones auparavant occupées par des terres agricoles et des oliveraies a démultiplié les dégâts provoqués par les crues.

5.3.1 Les cours d'eau et les ouvrages de protection

Des mesures constructives de protection ont été réalisées en priorité dans les zones habitées, surtout sur l'*oued* Handak qui traverse la ville de Sud au Nord. Ainsi le danger a été déplacé vers l'aval des zones canalisées où le débordement est provoqué d'un côté par la faible capacité des cours d'eau et de l'autre par le sous-dimensionnement des ouvrages d'art.

Les principales zones touchées actuellement se trouvent au Nord de la ville, vers la zone de confluence. Ce sont surtout les quartiers Atlas, Al Massira II et le *douar*³ de Nkila qui sont les plus touchés (Photo 17). De grands travaux de canalisation sont en cours dans cette partie de la ville pour la protection contre les crues. Sur l'*oued* Kikou, la zone industrielle, la route de Fkih ben Salah et le *douar* de Oulad Attou sont concernés.



Photo 17. Zone inondable dans le quartier Al Massira II. A gauche, on remarque les dépôts de déchets provenant de la décharge située 3 km en amont.

L'impact des grands ouvrages de protection devrait être évalué du point de vue de leur interférence avec les processus naturels. Ainsi, les grands canaux de déviation sur cône alluvial accentuent la sédimentation dans le chenal, nécessitant des curages fréquents ; ils imposent également la mise en place de zones de protection (Schick et al., 1999). Cela contredit fortement la tendance

actuelle de l'aménagement urbain sur le terrain d'étude. Dans le cas de l'*oued* Sabek, qui a un fort caractère torrentiel et pose des problèmes de charge solide, cela imposera des travaux répétés de curage.

D'autres transformations liées au couple érosion – accumulation seront amorcées par ces travaux qui modifient le niveau de base local des cours d'eau. Ainsi, la déviation de l'*oued* Sabek fera descendre le niveau de base d'environ 50 m. Logiquement, cela entraînera une accentuation de l'érosion régressive à l'amont par la mise en place d'un nouveau profil d'équilibre.

Les travaux de protection peuvent également favoriser l'augmentation de l'apport solide dans les cours d'eau par la déstabilisation des versants lors de la construction de chemins d'accès. C'est le cas pour les voies menant aux deux digues d'écrêtement des crues qui ont profondément modifié le paysage. Aucune mesure de stabilisation des versants n'a été envisagée. De même, la nouvelle route qui recoupe les collines du *dir* à flanc de coteau entre Aïn Asserdoune et Ourbi³ favorise l'installation de nombreuses ravines par érosion régressive.

³ Groupement d'habitations, hameau.

5.3.2 *Les autres sources d'inondations*

Plusieurs autres causes d'inondations ont été relevées sur le terrain. Elles sont mentionnées sur la carte des phénomènes :

- Les collines du *dir* qui dominent la ville de Beni Mellal sont drainées par de petits bassins versants torrentiels, appelés *chaabats*, dont certains deviennent dangereux par temps de fortes précipitations. Lors de ces situations, les eaux des torrents investissent le réseau de rues, provoquant de véritables inondations urbaines. L'imperméabilisation du sol et les pentes douces des cônes alluviaux favorisent l'orientation des écoulements le long des rues.
- L'existence de vallées sèches dans des formations travertineuses et conglomératiques favorise aussi la concentration des eaux de pluie dans la zone urbaine.
- A plusieurs endroits de la zone urbanisée, des dépôts sauvages de déchets ou de matériaux sont déversés directement dans le chenal des *oueds*. Ces dépôts réduisent d'une part la section des chenaux et, d'autre part, ils sont emportés lors des crues, augmentant de fait la charge solide transportée.
- De même, les nombreuses *seguias* qui traversent la ville provoquent des inondations par débordement lorsque leur capacité a été dépassée par les apports.
- La plupart des ponts et des ouvrages d'art sont sous-dimensionnés. La carte des phénomènes montre que ces points ont donné lieu à des débordements lors des crues de 2009 et de 2010.

6. Conclusions et perspectives

Au Maroc, comme dans l'ensemble des pays de la rive sud de la Méditerranée, l'eau a toujours été une ressource menacée ; aujourd'hui elle est également une menace pour la population. Le climat méditerranéen est caractérisé par une forte irrégularité pluviométrique engendrant des comportements hydrologiques très violents notamment dans les *oueds* drainant des bassins versants caractérisés par des facteurs (topographiques, géologiques, biologiques et anthropiques) qui accélèrent l'irrégularité des formes extrêmes d'écoulement. Actuellement, sur le fond des changements climatiques, les phénomènes météorologiques qui touchent le Maroc ont tendance à avoir un caractère extrême, augmentant ainsi les aléas hydrologiques. Par ailleurs, l'urbanisation non maîtrisée, qui s'est développée à partir des années 1970, empiétant sur les zones inondables des oueds, a augmenté la vulnérabilité vis-à-vis des aléas d'inondation.

Fès et Beni Mellal présentent deux exemples d'agglomérations menacées par les inondations des petits bassins versants. Jusqu'ici, la solution des travaux de protection a été retenue comme méthode de gestion des crues. Ainsi, de grands travaux de barrages et de canalisations de déviation et d'évacuation sont mis en œuvre depuis quelques années, tant à Fès qu'à Beni Mellal. La grande confiance accordée à cette politique techniciste de gestion, associée à une faible maîtrise de l'expansion urbaine, a toutefois augmenté la vulnérabilité de nombreux secteurs, en raison de l'occupation des zones inondables par de nouveaux quartiers. Le caractère intermittent des écoulements en zone méditerranéenne a accentué ce phénomène. Les crues récentes dans les deux secteurs étudiés ont toutefois montré que ces ouvrages de protection ne sont pas suffisamment efficaces lors des épisodes pluviométriques intenses ou extrêmes, dont la fréquence semble avoir augmenté au cours des dernières années.

Face aux déficits de ces travaux de protection, d'autres mesures de gestion du risque d'inondation doivent être prises en compte. A Fès, un plan de prévision et d'alerte aux crues est en cours de montage. Ce processus doit intégrer les différents acteurs concernés. La cartographie du risque d'inondation dans les deux zones d'étude est également un outil primordial pour gérer et planifier cette problématique. L'élaboration des deux cartes des phénomènes décrites dans ce rapport constitue la première étape pour la réalisation des cartes de risques. Les prochaines étapes constitueront d'une part à modéliser le comportement hydrologique des cours d'eau concernés et d'autre part à préciser les contours de la vulnérabilité. Ces deux nouvelles phases du projet ont débuté il y a quelques mois. Le tout devra permettre d'élaborer des cartes indicatives du risque d'inondation et de formuler des recommandations de gestion.

L'élaboration de cette carte de risque d'inondation va présenter un réel défi, du fait à la fois, de la grande complexité de l'aléa hydrologique dans la rive sud de la Méditerranée, de l'anthropisation des espaces fluviaux et aussi du manque de données nécessaires pour la modélisation hydraulique et la simulation des crues. La carte des phénomènes constitue ainsi un instrument de premier ordre pour décrire et localiser l'aléa.

Face à cet aléa hydrologique, l'enjeu est moins de supprimer le risque que de le maîtriser par le biais d'une gestion rationnelle et durable (Scarwell et Laganier 2004).

Références

- ARE, OFEG, OFEFP (2005). *Aménagement du territoire et dangers naturels, recommandations*, Berne, Office fédéral du développement territorial (ARE), Office fédéral des eaux et de la géologie (PFEG) et Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- 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 Géoscience*, 337, 1120-1130.
- 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].
- Chave S., Ballais J.-L. (2006). From hydrogeomorphology to hydraulics computations: a multidisciplinary approach of the flood hazard diagnosis in the Mediterranean zone. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50/4, 523-540.
- Chave S. (2002). Pertinence de la Cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 297-306.
- Cherai B. (2009). *Géologie et géomorphologie du Saïs et de ses bordures du Néogène au Quaternaire*, Thèse de doctorat national en géologie.
- Direction Régionale de l'Environnement Provence – Alpes – Côte d'Azur (2007). *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables*. Document d'information, 60 pages.
- 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(1-4), 148-161.
- Fassi D. (1999). *Les formations superficielles du Saïs de Fès et de Mèknes*. Rabat, Edition du Service géologique.
- 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). *Dangers naturels, Recommandations. Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*. Berne, Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- 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. *Actes du colloque "Aménagement périurbain : processus, enjeux, risques et perspectives"*, 17-18 février 2010, sous presse.
- Loat R., Petrascheck A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*, Recommandations, Berne, Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- Masson M., Garry G. et Ballais J.-L. (1996). *Cartographie des zones inondables : approche hydrogéomorphologique*, Paris, Les Editions Villes et Territoires.

- Monbaron M. (1981). Sédimentation, tectonique synsédimentaire et magmatisme basique : l'évolution paléogéographique et structurale de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc) au cours du Mésozoïque ; ses incidences sur la tectonique tertiaire. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 74/3, 625-638.
- National Research Council (NRC) Committee on Alluvial Fan Flooding (1996) *Alluvial Fan Flooding*, National Academy Press, Washington DC.
- Penelas M., Delaloye R., November V., Reynard E., Ruegg J. (2008). *Cartes de dangers et aménagement du territoire : rapport thématique dans le cadre du projet « Impacts des inondations en Suisse. Processus d'apprentissage, gestion du risque et aménagement du territoire, Projet SBF C05.0143*. Institut de Géographie, Lausanne.
- Reynard E., Werren G., Lasri M., Obda K. (2011). Problèmes méthodologiques liés à la cartographie des phénomènes d'inondation dans deux bassins versants marocains. *Actes de la 2^e Rencontre Journée des dangers naturels (JRDN), Lausanne, 18 février 2011*, 217-222.
- Scarwell H.-J., Laganier R. (2004). *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*, Lille, Edition Septentrion.
- Schick A. P., Grodek T., Wolman M. G. (1999) Hydrologic processes and geomorphic constraints on urbanization of alluvial fan slopes. *Geomorphology* 31, 325-335
- Taltasse P. (1953). *Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de Fès-Meknes*. Rabat, Edition Félix Mancho.
- Werren G., Reynard E. & El Khalki Y. (2011). Cartographie des phénomènes en vue de la réalisation de la carte indicative des dangers hydrologiques dans la ville de Beni Mellal, Maroc. *Actes du colloque "La montagne marocaine : géomorphologie, environnement et développement"*, 5-6 mai 2010, sous presse.

Annexe – Légende de la carte des phénomènes

<p>Hydrography</p> 	<p>Flow type</p> <ul style="list-style-type: none"> ~ Intermittent flow ~ Torrential flow (Chaaba) ~ Steady flow 	<p>Water bodies</p> <ul style="list-style-type: none"> 🟦 Lake 🟦 Temporary swamp 🟦 Permanent swamp • Source
<p>Landforms and processes of fluvial areas</p> 	<p>Hydrogeomorphologic units</p> <ul style="list-style-type: none"> ~ Riverbed without banks ~ Riverbed with banks Active floodplain Abandoned floodplain 	<p>Alluvial fans morphology</p> <ul style="list-style-type: none"> Active alluvial fan and recent accumulation on fan --- Paleochannel
	<p>Hydrogeomorphologic units limit</p> <ul style="list-style-type: none"> Limit marked by a slope Limit marked by microtopography Interpolated limit 	<p>Shaped valleys and morphogenesis</p> <ul style="list-style-type: none"> ~~~~~ Lateral erosion of riverbanks <<<<< Vertical erosion along river 🏔 Gorge / Narrowing valley 🏔 Bank / Recess 🌊 Braided channel 🌿 Valley bottom colonized by vegetation 🏔 Scree / Rock fall 🏔 Alluvial bank in riverbed
<p>Impacts of human actions on flow</p>	<p>Flow obstructing objects</p>	<p>Canalization</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ✂ Bridge ▲ Very frequent overflow ▲ Frequent overflow ▲ Exceptional overflow ● Vegetation in riverbed (discrete) ●● Waste filling in riverbed ~ Flood control dike ~ Accumulation dam ~ Infrastructure with flood barrier role 	<ul style="list-style-type: none"> ~ Diversion channel ~ Open channel ~ Covered channel ~ Canalization in progress
	<p>Monitored flooded areas</p>	
<p>Flooded areas delineation</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 🟦 Flooding due to the outcrop of the aquifer 🟦 Flooding in floodplains 🟦 Flooded areas caused dam overflow 🟦 Flood caused by overflow point (bridges) 🟦 Sheetflood on alluvial fan 	
<p>Basemap</p> 	<p>Landuse</p> <ul style="list-style-type: none"> 🌲 Forest 🌲 Matorral forest 🏘 Cemetery 🏗 Construction 🗑 Public dumping 🌳 Green space / Sports field 🏠 Seasonal crops limit 🌱 Plantation 	<p>Communication ways</p> <ul style="list-style-type: none"> 🛣 Highway 🛣 National Road 🛣 Regional Road 🛣 Provincial Road 🚊 Railway 🚊 Track 🚊 Street