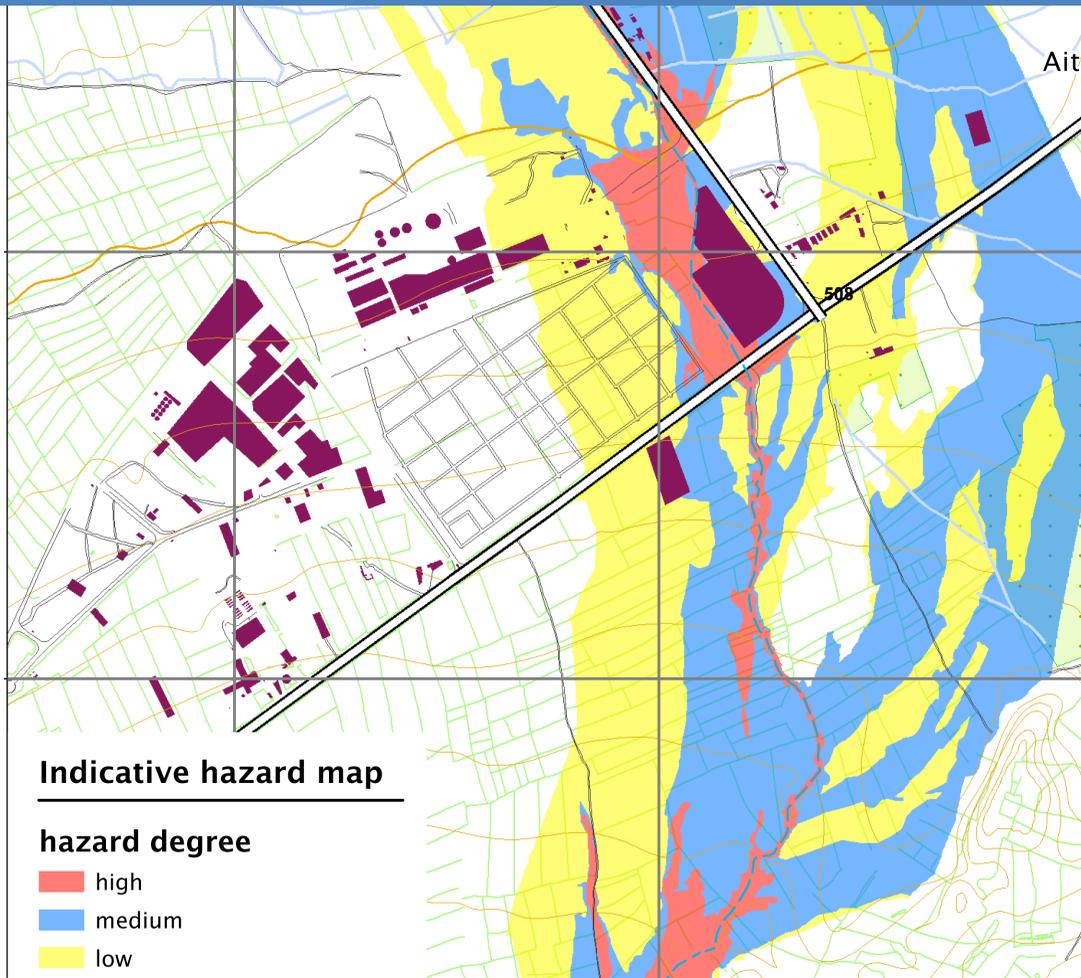


CARTOGRAPHIE DU DANGER D'INONDATION

GUIDE PRATIQUE POUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE SUISSE AU MAROC

Gabriela Werren, Mohamed Lasri



Unil

UNIL | Université de Lausanne

Institut de géographie
et durabilité



Université
Sidi Mohamed ben Abdellah
LAGEA

SOMMAIRE

1. Motivation..... 1

2. Les cas d'étude..... 1

3. L'approche..... 3

4. Cartographie des phénomènes et monitoring des crues..... 4

4.1. La carte des phénomènes..... 4

4.2. Monitoring de crues connues..... 6

5. Modélisation hydrologique..... 9

5.1 Approche empirique et transformation pluie-débit : le cas de Fès..... 9

5.2. Approche « naturaliste » : le cas de Beni Mellal..... 11

6. Modélisation hydraulique..... 14

6.1. Modélisation 1D pour le domaine « vallées » à Fès..... 14

6.2. Modélisation 2D pour le domaine « cônes de piémont » de Beni Mellal..... 16

7. Carte indicative de danger d'inondation..... 18

7.1. La matrice du danger..... 18

7.2. La carte indicative du danger d'inondation..... 18

8. Conclusion..... 21

1. Motivation

Au Maroc, l'exposition des personnes et des biens aux inondations a augmenté en raison du développement urbain mal maîtrisé et des tendances climatiques. La cartographie de l'aléa inondation et la prise en compte des cartes dans les documents de l'aménagement urbain visent la réduction de l'exposition à l'aléa et par conséquent la réduction du risque lié aux inondations. Le Maroc a besoin de développer une pratique dans ce sens.

La Suisse détient une longue expérience, ainsi qu'une des législations les plus développées dans le domaine. Ce guide présente les conclusions d'une

étude mandatée par la Direction suisse du Développement et de la Coopération (DDC) et menée conjointement par les universités de Lausanne et de Fès, visant l'adaptation de la méthode suisse de cartographie des dangers à des cas d'étude marocains.

Pourquoi ce guide ?

Le présent guide propose aux praticiens (gestionnaires de l'eau, bureaux d'étude, urbanistes) une méthodologie de cartographie des dangers issue de l'expérience accumulée dans un travail de recherche mené sur deux sites d'étude marocains (Fès et Beni Mellal).

2. Les cas d'étude

Cette étude a été menée sur deux sites différents du point de vue hydrogéomorphologique : le bassin versant de l'oued Fès dans l'agglomération homonyme et les bassins versants drainant

la zone urbaine de Beni Mellal (Figure 2-1). Ainsi, les conclusions de l'étude sont-elles applicables à des environnements variés au Maroc (Tableau 2-1).

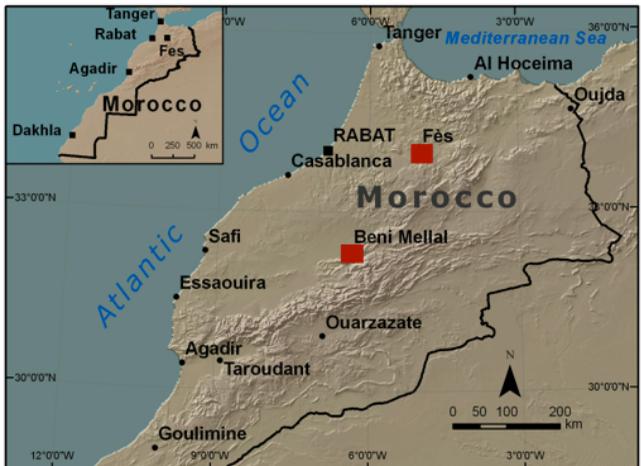


Figure 2-1. Carte de situation des deux cas d'étude.

Tableau 2-1. Quelques caractéristiques des deux sites d'étude

| | FES | BENI MELLAL |
|---------------------------|---|---|
| Echelle | 800 km ² | 100 km ² |
| Domaine | Causses du Moyen Atlas, Plateau du Saïs, rides Pré-Rif | Atlas de Beni Mellal, son piémont, vallée du Tadla |
| Morphologie | Vallées | Cônes alluviaux |
| Caractères BV | Allongés, énergie de relief moyenne, temps de concentration T_c court à moyen (1 – 5 h) | Ramassés, grande énergie de relief, T_c court (0.5 – 2 h) |
| Régime | Pluvial, intermittent | Pluvio-nival, intermittent |
| Types de crue | Rapides | Crues éclair |
| Types d'inondation | Débordement, dépassement de la capacité des barrages, affleurement des nappes phréatiques | Débordement, inondations en nappe |
| Instrumentation BV | Pluviomètres | ---- |
| Historique crues | Crue en 1950, 1989 | Récentes (à partir de 2000) |

3. L'approche

La méthodologie pour la réduction des risques liés aux phénomènes naturels se décline en plusieurs étapes successives : premièrement, les dangers sont **identifiés**, dans l'espace et dans le temps, ensuite leur ampleur est **estimée** à l'aide de méthodes

naturalistes ou mathématiques, pour enfin pouvoir prendre des **mesures** adaptées. Les recommandations sont illustrées par des exemples tirés des deux cas d'étude.

ETAPES DE LA CARTOGRAPHIE DES DANGERS

| | |
|--|---|
| 1. Collecte de données | A la base de la démarche, une collecte de données cartographiques et bibliographiques et de mesures disponibles pour la zone étudiée est nécessaire. En même temps, un travail méthodologique est réalisé pour inventorier les méthodes les plus adaptées au milieu et aux données disponibles. |
| 2. Cartographie et mesures de terrain | La cartographie des phénomènes englobe tous les éléments hydrogéomorphologiques et anthropiques jouant un rôle dans le développement ou l'aggravation des inondations. En plus de la carte des phénomènes, un monitoring de crues récentes et connues peut être effectué, dans le but de mieux connaître le développement de tels phénomènes et de disposer de moyens de vérification pour des méthodes indirectes, telles que la modélisation. |
| 3. Modélisation | L'étape de modélisation hydrologique et / ou hydraulique permet de disposer de données chiffrées sur l'ampleur des crues considérées et sur leurs conséquences spatiales. La modélisation doit répondre à un critère de parcimonie , c'est-à-dire que la complexité des modèles utilisés doit s'adapter aux données disponibles et aux besoins. |
| 4. Carte de danger | Les résultats de la modélisation, en termes d'intensité et d'extension spatiale des inondations, confrontés aux données de vérification, forment la base pour la carte de danger . Selon la méthodologie suisse, cette carte est produite sur la base d'une matrice intensité / probabilité d'occurrence. |

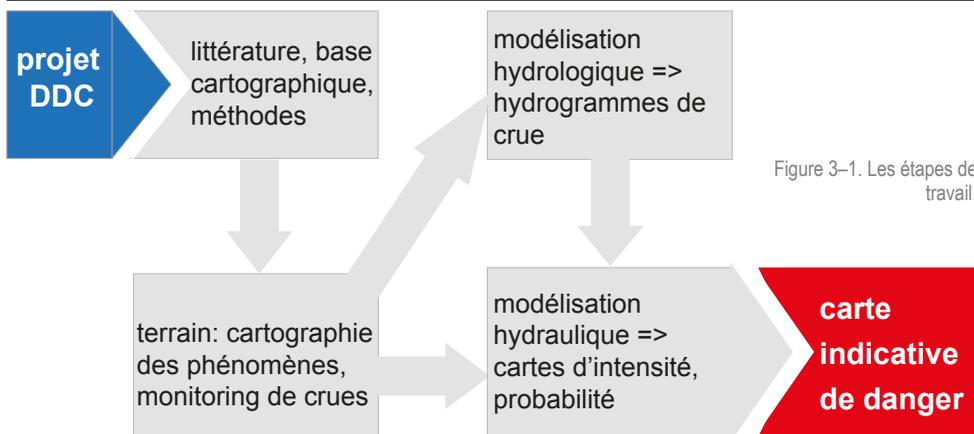


Figure 3-1. Les étapes de travail.

4. Cartographie des phénomènes et monitoring des crues

4.1 La carte des phénomènes

La carte des phénomènes est le résultat d'une « analyse méticuleuse du terrain » par laquelle on désigne les témoins géomorphologiques d'événements passés et les « sites critiques » (Loat & Petrascheck 1995) ou particulièrement dangereux. Elle sert à identifier les aléas et à vérifier les modèles mathématiques.

La **légende modulable pour la cartographie des phénomènes** (Kienholz & Krummenacher 1995) forme une base homogène pour la cartographie géomorphologique de différents aléas. En annexe 1 et 2 nous reproduisons la légende pour la cartographie des aléas liés à l'eau.

Tableau 4–1. Approches de cartographie géomorphologique.

| METHODE | CADRE:ACTEURS, CONTEXTE | DESCRIPTION |
|---------------------------------------|--|--|
| Phénomènes (Suisse) | PLANAT (recherche, professionnels, gouvernement) Contexte: national | Cartographie de détail le long des cours d'eau |
| Hydrogéomorphologique (France) | Gouvernement, recherche, professionnels Contexte: national | Délimite les composantes de la plaine alluviale et leur attribue un degré d'aléa |
| NRC (Etats-Unis) | Recherche, professionnels, gouvernement Contexte: national | Détermine les parties actives (inondables) d'un cône alluvial |

Tableau 4–2. Les éléments de la carte des phénomènes de Fès et Beni Mellal.

| ELÉMENT DE CARTE | DESCRIPTION | SIGNIFICATION POUR LA CARTE DE DANGER |
|---|--|---|
| Hydrographie | Type d'écoulement, plans d'eau | Spatialisation des dangers |
| Formes et processus des espaces fluviaux | Vallées, plaines alluviales, cônes alluviaux | Formes d'érosion / accumulation témoignant de la dynamique fluviale, l'intensité et la localisation des aléas |
| Éléments anthropiques | Obstacles à l'écoulement, points de débordement | Désignent des « sites critiques » où la dynamique fluviale est accentuée par l'influence anthropique |
| Zones inondables | Par affleurement de la nappe ; inondation des plaines alluviales ; par débordement de barrages et d'autres ouvrages sous-dimensionnés ; inondation torrentielle, sur cône alluvial | Identification de l'empreinte spatiale des crues passées, moyen de vérification des modèles mathématiques |

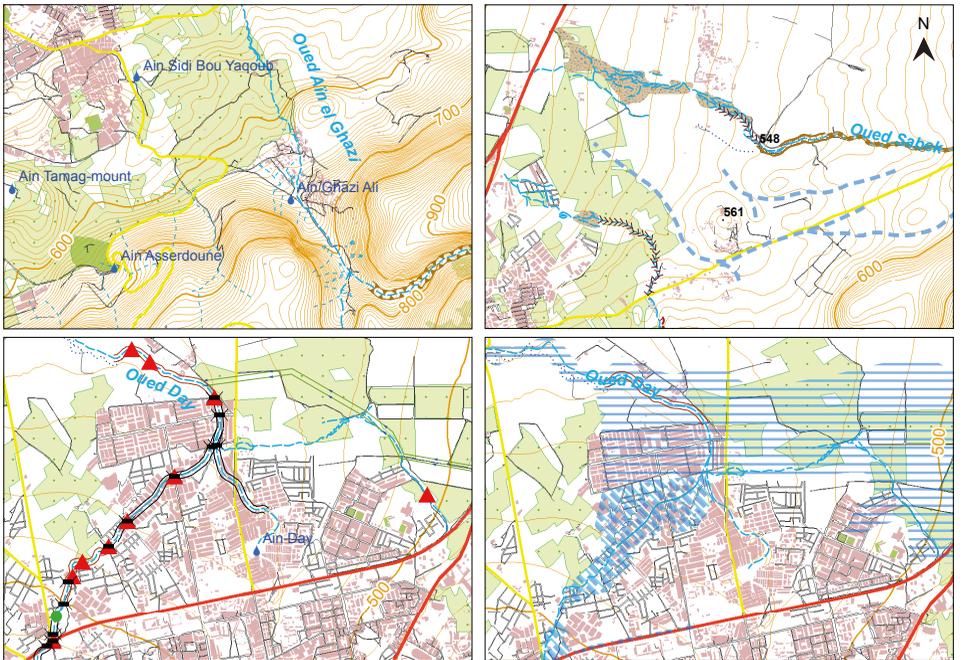
En complément de l'approche suisse, des méthodes adaptées aux environnements semi-arides et aux spécificités morphologiques des zones étudiées peuvent s'avérer nécessaires (Tableau 4–1, Reynard et al. 2011). Par exemple, dans le cas des deux sites de Fès et Beni Mellal, la cartographie géomorphologique selon les directives suisses a été complétée par :

- le monitoring de crues de référence (à Fès et Beni Mellal) ;
- l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique de délimitation des plaines alluviales (Ballais et al.

2011) à Fès ;

- l'utilisation de la méthode NRC de cartographie des cônes alluviaux (NRC 1996) à Beni Mellal.

Sur les deux sites d'étude, la cartographie a visé la mise en évidence de quelques éléments essentiels pour la compréhension des inondations (Tableau 4–2, Figure 4-2), à la différence de la méthode de base qui classe les éléments à cartographier selon leur pertinence géomorphologique. Cet exemple montre que la cartographie doit s'adapter au contexte, tout en suivant des directives homogènes telles que les directives adoptées en Suisse.



Éléments d'hydrographie

- Ecoulement intermittent
- Ecoulement torrentiel (Chaaba)
- Source

Types d'inondation

- Inondation par débordement
- Inondation en nappe

Formes et processus

- Domaine de plaine alluviale**
 - Lit sans berges
- Domaine de cône alluvial**
 - Dépôts récents sur cône actif
 - Chenal en tresse
 - Paléochenal

Domaine de vallée

- Erosion des berges
- Erosion verticale
- Gorge / Rétrécissement
- Berge / Niche
- Barre alluviale

Éléments anthropiques

- Pont
- Point de débordement
- Végétation dans le lit (ponctuel)
- Chenal de déviation
- Chenal à ciel ouvert

Figure 4–2. Extraits de la carte des phénomènes de Beni Mellal : éléments de cartographie (tiré de Werren 2013)

4.2. Monitoring des crues connues

Souvent les régions de montagne touchées par la problématique des crues manquent d'instrumentation suffisante. De ce fait, l'estimation de l'aléa lié aux crues doit souvent se fier à des modèles plus ou moins empiriques sans moyen de vérification des résultats. Dans le cas des crues éclair, les mesures, même existantes, couvrent souvent des pas de temps trop élevés pour appréhender la soudaineté de tels phénomènes (Gaume & Borga 2008). Le monitoring de crues par le biais de méthodes de terrain peut compenser partiellement le manque de mesures hydrologiques dans les bassins versants.

Les mesures de terrain effectuées après un événement de crue donné peuvent être utilisées pour la vérification des modèles hydrologiques et hydrauliques utilisés. Ces mesures nécessitent

autant des connaissances géomorphologiques que des connaissances de base en hydraulique.

Ainsi, la hauteur maximale d'eau dans un profil en travers est utilisée pour calculer la section et le périmètre mouillés (Photo 4-1). En estimant la rugosité du fond et la pente moyenne sur le terrain, on peut calculer le débit correspondant à la hauteur maximale mesurée à l'aide de la formule de Manning :

$$Q = K * S * R_h^{2/3} * i^{1/2}$$

où :

Q = débit (m³/s);

K = coefficient de rugosité;

S = section mouillée (m²);

R_h = rayon hydraulique (m);

i = pente moyenne (m/m).

Tableau 4–3. Mesures de terrain pour la vérification des modèles

| TYPE DE MESURE | DONNEES OBTENUES | APPLICATION |
|--|---|--|
| Profils en travers : hauteur maximale de l'eau | Débit maximal de crue | Modèle hydrologique : vérification de l'hydrogramme de crue ; modèle hydraulique : vérification du niveau d'eau modélisé |
| « Splash marks » sur les ponts ou autres obstacles | Vitesse maximale de l'eau | Modèle hydrologique : vérification du débit maximal dans les profils limitrophes |
| Cartographie de la zone inondée | Extension maximale de l'inondation | Modèle hydraulique : vérification de l'acuité spatiale du modèle |
| Hauteurs d'eau ponctuelles à l'aide de témoins géomorphologiques | Hauteur maximale de l'inondation | Modèle hydraulique : vérification de l'acuité du modèle en termes d'écoulement. |
| Développement temporel de la crue (témoignages de riverains) | Hauteur d'eau / extension de l'inondation dans le temps | Modèles hydrologique et hydraulique : validation de l'hydrogramme de crue |

Les résultats ainsi obtenus peuvent être corroborés pour une même section avec des valeurs de débit obtenues à l'aide de « splash marks » sur des obstacles situés à proximité, sachant que la hauteur des marques est proportionnelle à la vitesse du

courant (Gaume & Borga 2008, Tableau 4–4). Ainsi, en connaissant la section mouillée et la vitesse, on peut calculer le débit maximal :

$$Q = S * V$$

| VITESSE | EN M/S | HAUTEUR DES MARQUES |
|---------|-----------|---------------------|
| modérée | < 2 m/s | < 20 cm |
| haute | 2 – 4 m/s | 40 – 80 cm |
| extrême | > 4 m/s | > 100 cm |

La réalisation de la carte des phénomènes et les mesures de vérification posent plusieurs défis au praticien : la question du temps à allouer à ces travaux, ainsi que des connaissances, du matériel et des données de base nécessaires pour mener à bien un tel projet.

Tableau 4–4. Correspondance entre la hauteur des marques et la vitesse du courant (Gaume & Borga 2008).

RECOMMANDATIONS POUR LA CARTE DES PHENOMENES ET LE MONITORING DES CRUES

Le temps La cartographie détaillée des cours d'eau peut s'avérer fastidieuse. Il est recommandé de **cibler** le travail de terrain par l'analyse préalable des sources à disposition (tels des inventaires des crues passées, des photos aériennes et images satellitaires). Les campagnes de terrain devraient coïncider avec la période humide de l'année, quand des crues peuvent être soumises à un **monitoring** par des mesures dans la section transversale des cours d'eau et par l'analyse de la **situation météorologique** durant ces événements.

L'expertise nécessaire La démarche nécessite une approche interdisciplinaire. Des connaissances approfondies en **géomorphologie fluviale** et des bases d'**hydraulique** sont nécessaires. Le traitement des données et la mise en carte requièrent des compétences dans les **SIG**. De plus, une étroite **collaboration entre gestionnaires et praticiens** est nécessaire pour garantir l'accès aux données disponibles localement.

La légende Pour une cartographie homogène entre terrains distincts, une légende unitaire serait préférable. La légende modulable pour la cartographie des phénomènes (Figure 4–1) est disponible en format PDF au lien suivant : <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00781/index.html?lang=fr>
En fonction des besoins d'un projet, cette légende peut être adaptée. Notre travail sur les terrains de Fès et Beni Mellal en est un exemple.

Le côté technique Un appareil de **cartographie mobile** offre la possibilité de collecter des données d'une grande précision spatiale. Pour ce projet, l'appareil MobileMapper ER équipé du logiciel ESRI ArcPad a été utilisé. Des technologies mobiles actuelles telles ArcGis Online peuvent offrir des alternatives peu coûteuses pour la cartographie mobile. Pour le levé des sections transversales, un **appareil GPS** peut s'avérer nécessaire, surtout si la section subit des modifications (érosion / accumulation) pendant la crue.

La carte Les données collectées sur le terrain peuvent être plus précises que les fonds de carte disponibles pour un site donné. Dans ce cas, un compromis s'impose entre la précision et l'habillage de la carte (exemple en Figure 4–3).



Photo 4–1. Exemple de section de référence pour la vérification du modèle hydrologique. Exemple de l'oued Aïn el Ghazi à Beni Mellal.

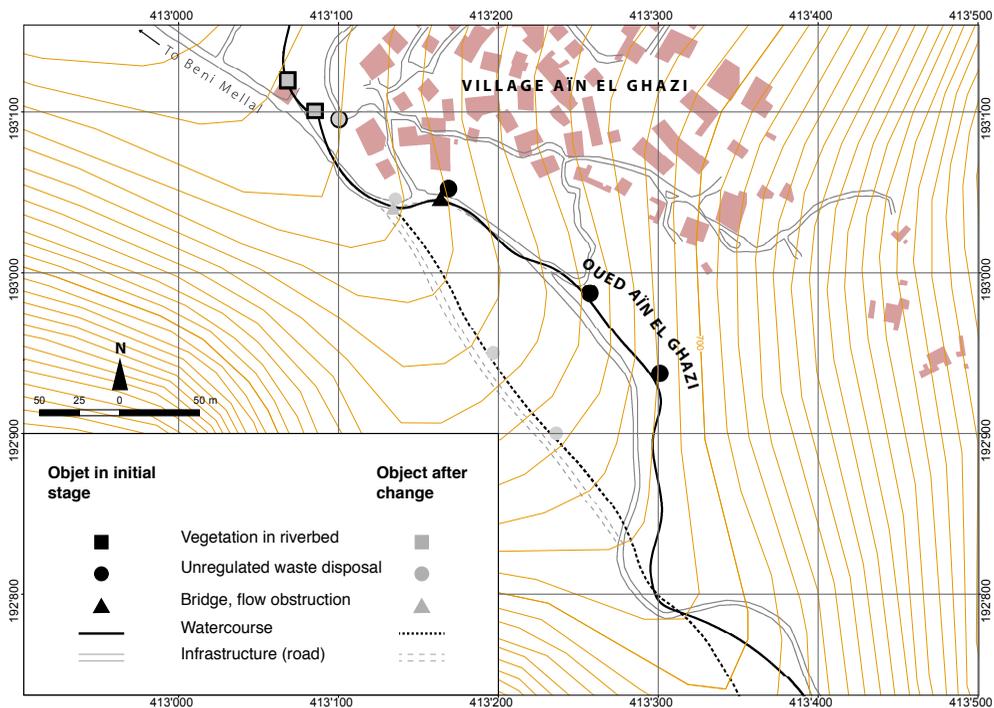


Figure 4–3. Modifications nécessaires pour un compromis cartographique. Cas de l'oued Aïn el Ghazi à Beni Mellal. Tiré de Reynard et al. (2013).

5. Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique représente une étape essentielle pour l'estimation des dangers d'inondation, car elle permet d'appréhender le comportement hydrologique d'un bassin versant lors de crues de référence. La modélisation doit respecter le principe de parcimonie qui statue que la complexité du modèle doit s'adapter aux données disponibles et aux besoins du projet (Figure 5-1). En milieu de montagne et semi-aride, la modélisation hydrologique se heurte à des défis liés à :

- la rareté et la qualité des données mesurées ;
- la grande variabilité spatio-temporelle des précipitations ;
- la complexité des bassins versants (différentes lithologies, présence de karst, etc.).

Dans ce contexte, dans la pratique au Maroc, des modèles empiriques régionaux sont souvent utilisés pour estimer le débit maximal à l'exutoire d'un bassin versant. Pourtant, ces modèles nécessitent une validation pour être utilisables dans la gestion des dangers d'inondation.

Nous proposons deux approches de modélisation qui offrent des alternatives aux seules formules

empiriques. L'approche utilisée sur le bassin versants de Fès comprend une estimation empirique des débits maximaux pour des périodes de retour données et une comparaison de ces résultats avec la modélisation par transformation pluie-débit. L'approche utilisée dans le cas de Beni Mellal utilise des crues connues pour modéliser le comportement des bassins versants pour ensuite extrapoler le modèle à des événements de période de retour de référence.

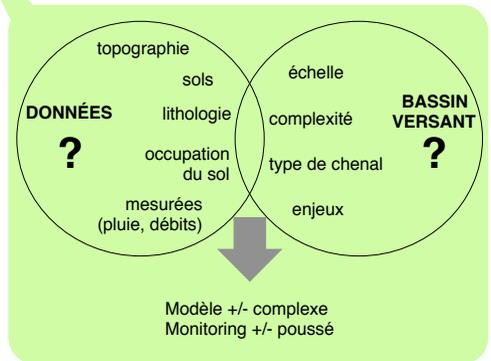


Figure 5-1. La modélisation doit respecter le principe de parcimonie.

5.1. Approche empirique et transformation pluie-débit : le cas de Fès

L'estimation des débits de pointe pour différents temps de retour a été réalisée à l'aide de plusieurs formules empiriques régionales (Tableau 5-1).

Tableau 5-1. Méthodes empiriques. Maillet-Gauthier: Q(T) = débit de pointe pour temps de retour T [m³/s] ; S = surface

bassin versant [km²] ; L = longueur du talweg [km] ; H = hauteur moyenne annuelle de pluie [mm] ; a = coefficient 20 < a < 30 ; K = coefficient 0.5 < K < 5; Fuller II: a = coefficient 0.7 < a < 0.8 ; N = coefficient régional N=80 plaine N =100 montagne; Hazan-Lazarevic: K₁, K₂ = paramètres régionaux établis pour le Maroc; a = coefficient 0.8 < a < 1.2

| MODELE | FORMULE | CARACTERISTIQUES |
|-----------------|--|--|
| Mallet-Gauthier | $Q(T) = (1 + a + \text{Log}(T)) * (S^{0.8} + 8/3 * S^{0.5}) * 4/3 * N/10$ | - souvent utilisée au Maghreb ; - le choix des coefficients peut être délicat |
| Fuller II | $Q(T) = 2 * K * \text{Log}_{10}(1 + aH) \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1 + 4\text{Log}(T) - \text{Log}_{10}(S)}$ | - adaptée aux bassins versants de taille moyenne - coefficients peu sensibles |
| Hazan-Lazarevic | $Q_T(1000) = K_1 * S^{K_2}$ $Q_T(10) = Q(1000) * \frac{(1 + a * \text{Log}10)}{(1 + a * \text{Log}1000)}$ | - adaptée aux bassins versants marocains - formule adaptée aux conditions physiogéographiques homogènes |

Aucune de ces méthodes n'est pourtant à même de rendre compte de l'hétérogénéité des conditions dans les bassins versants étudiés. La disponibilité de données pluviométriques journalières sur le terrain d'étude a rendu possible la modélisation du

comportement hydrologique des bassins versants affluents de l'oued Fès pour des événements de temps de retour T_n ($n = 10, 20, 50, 100$). La démarche s'est déclinée en plusieurs étapes (Figure 5–2 Tableau 5–2).

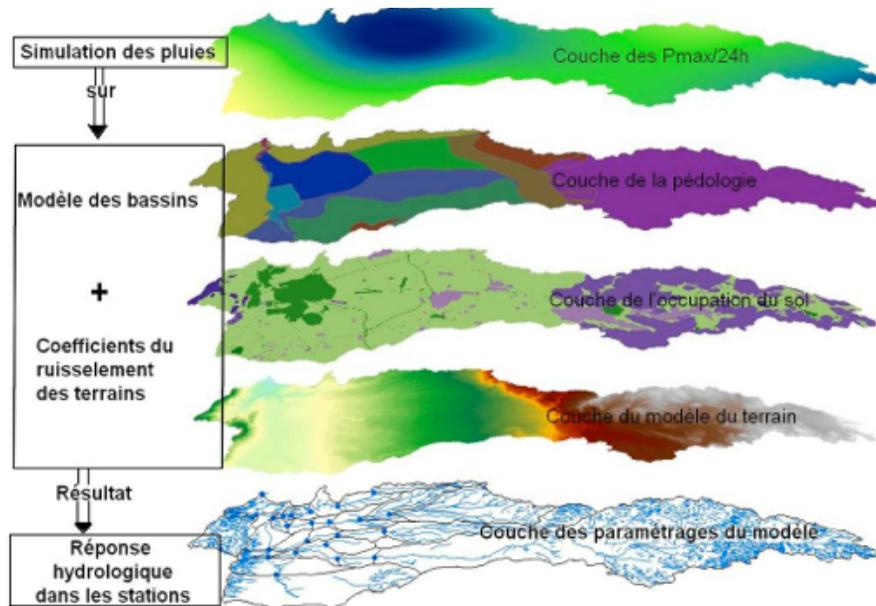
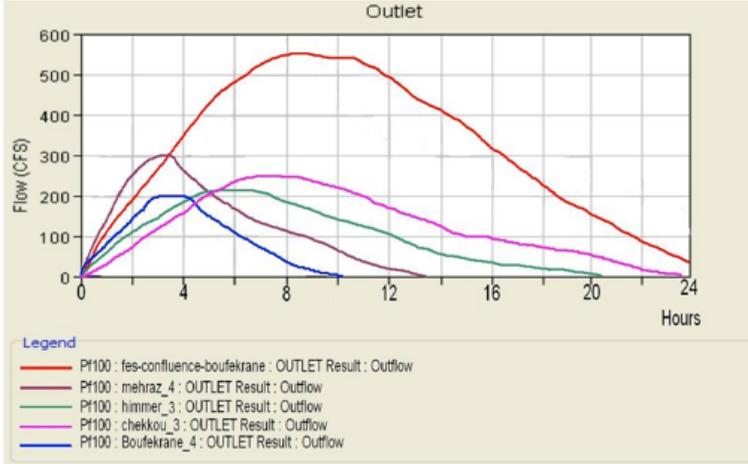


Figure 5–2. La modélisation hydrologique : cas de Fès. Tiré de Reynard et al. (2012)

Tableau 5–2. Démarche pour la modélisation hydrologique : Fès.

| ETAPE | DEMARCHE | LOGICIELS UTILISES |
|-----------------------------|---|--|
| 1. Fonction de production | <ul style="list-style-type: none"> - ajustement statistique des données journalières de pluie (loi de Gumbel); - distribution spatiale de la pluie (polygones de Thiessen) | Excel, logiciels de statistique ArcMAP (ESRI) |
| 2. Fonction de transfert | <ul style="list-style-type: none"> - modèle de bassin versant (modèle d'altitude, occupation du sol, pédologie); calcul du coefficient de ruissellement - modélisation de la pluie nette; obtention de l'hydrogramme de crue pour T_n par la méthode du <i>Curve Number</i> CN | HEC-GeoHMS (USACE) HEC-HMS (USACE) |
| 3. Validation des résultats | <ul style="list-style-type: none"> - validation du débit maximum pour T_n par comparaison avec les résultats des calculs empiriques et les débits estimés lors de crues historiques (1989, 1950) | comparaison visuelle, décision |



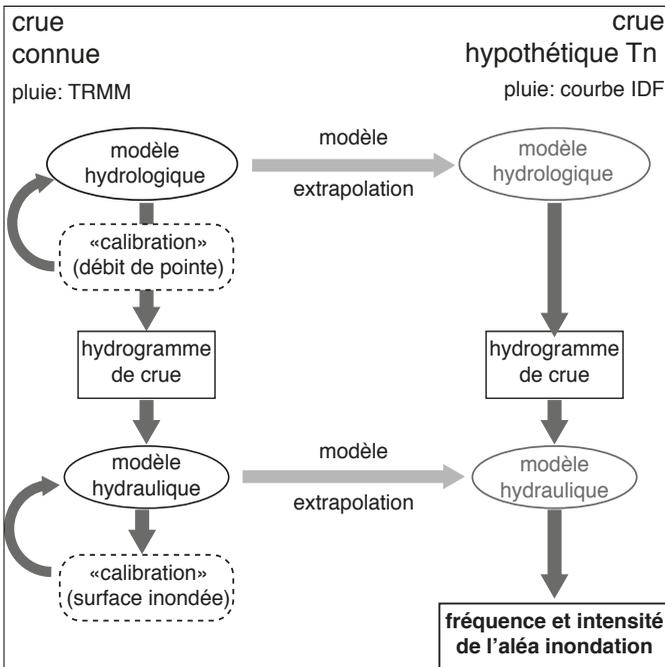
Des hydrogrammes de crue pour des événements à temps de retour de 20, 50 et 100 ans ont été obtenus (Figure 5-3).

Figure 5-3. Simulation de la crue correspondant à un événement pluvieux de T_{100} . Pour l'oued Fès et ses affluents. Tiré de Reynard et al. 2012).

5.2. Approche « naturaliste » : le cas de Beni Mellal

En l'absence de données mesurées, l'approche utilisée à Beni Mellal envisage de maximiser la compréhension du comportement hydrologique des bassins versants en étudiant des crues connues et d'ensuite appliquer les connaissances accumulées

pour des événements hypothétiques de temps de retour T_n donnés (Figure 5-4). Cette approche s'applique à la modélisation hydrologique et hydraulique.



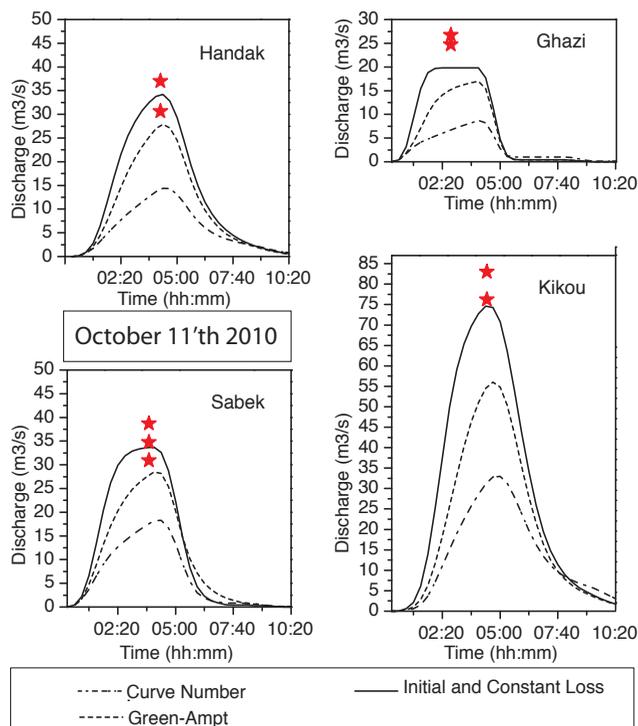
Deux crues ont été choisies pour calibrer le modèle : les crues du 15.02.2010 et du 11.10.2010. Elles coïncident avec des campagnes de terrain menées pour ce projet. La démarche est présentée dans le Tableau 5-3.

Le modèle ainsi calé a été appliqué à des pluies de projet de référence pour l'estimation de l'aléa inondation, pour ce projet $T_n = 20, 50, 100$ ans (Tableau 5-4, Figure 5-6).

Figure 5-4. Approche « naturaliste » à la modélisation. TRMM = Tropical Rainfall Monitoring Mission; IDF = courbe Intensité-Durée-Fréquence; T_n = temps de retour de la crue de référence. Tiré et traduit de Werren et al. (2014).

Tableau 5–3. Démarche pour la modélisation hydrologique (1) : Beni Mellal.

| ETAPE | DEMARCHE | LOGICIELS |
|----------------------------------|--|---|
| 1. Fonction de production | - crues connues : estimations satellite de précipitation TRMM à résolution temporelle = 3 h et résolution spatiale = env. 25x25 km; | HEC-HMS (USACE) |
| 2. Fonction de transfert | - modèle de bassin versant (MNT, occupation du sol, pédologie et des coefficients qui en découlent) - modélisation de la pluie nette pour les crues connues; comparaison de trois méthodes (Curve Number, Green-Ampt, Initial & Constant Loss) - Figure 5–5 - transformation pluie-débit à l'aide d'un hydrogramme unitaire Snyder | HEC-GeoHMS (USACE) HEC-HMS (USACE) |
| 3. Validation du modèle | - analyse de sensibilité sur les paramètres des trois méthodes decalcul de l'infiltration et de la méthode de transformation pluie.débit : choix de la méthode la plus adaptée aux bassins versants - « calibration » du modèle sur les valeurs de débit maximum estimées sur le terrain (voir section 4.2) | Excel |



Les estimations de débit maximal obtenues sur le terrain offrent un moyen de choisir le modèle le plus adapté pour un bassin versant et de le calibrer partiellement.

Figure 5–5. Comparaison de trois méthodes d'infiltration et leur capacité de prédire les débits de pointe relevés sur le terrain. Tiré de Werren (2013).

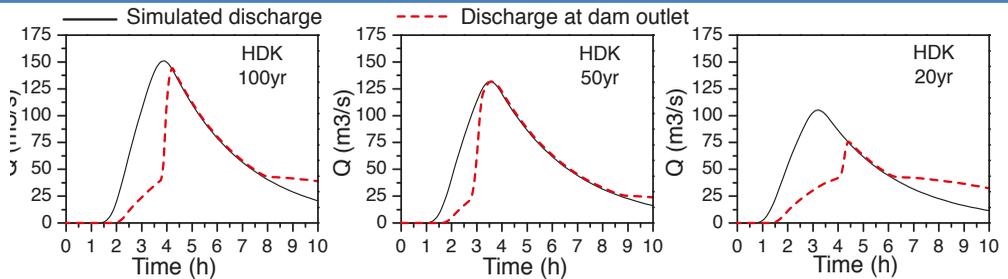


Figure 5-6. Simulation des crues correspondant aux événements pluvieux de $T_n = 20, 50, 100$ ans. Oued el Handak (HDK) à Beni Mellal. Tiré de Werren (2013).

Tableau 5-4. Démarche pour la modélisation hydrologique (2) : Beni Mellal.

| ETAPE | DEMARCHE | LOGICIELS UTILISES |
|---------------------------|---|--------------------|
| 1. Fonction de production | - pluies de projet pour $T_n = 20, 50, 100$ ans issues de la courbe IDF de la station météorologique de Beni Mellal | HEC-HMS (USACE) |
| 2. Fonction de transfert | - utilisation du modèle de bassin versant auparavant créé - modélisation de la pluie nette pour les crues $T_n = 20, 50, 100$ ans (méthode Initial & Constant loss) - transformation pluie-débit : hydrogramme unitaire Snyder | HEC-HMS (USACE) |
| 3. Validation du modèle | - aucune calibration possible | |

RECOMMANDATIONS POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

| | |
|---|---|
| Le temps | Les analyses hydrologiques peuvent s'avérer fastidieuses, surtout dans la phase de calage d'un modèle. Coordonnez-les avec des mesures de terrain, là où les mesures hydrométriques sont inexistantes. |
| L'expertise nécessaire | Dans cette approche multidisciplinaire, des connaissances hydrologiques sont essentielles mais elles doivent être complétées par de bonnes connaissances de terrain (pédologie, occupation du sol, dynamique hydro-géomorphologique). |
| Traitement de l'incertitude | Le traitement de l'incertitude du modèle devrait s'adapter à sa complexité (p. ex. nombre de paramètres) et aux données de calage existantes. Dans ce travail, seule une analyse de sensibilité des paramètres a été effectuée. |
| Le côté technique | Pour que cette approche soit accessible à de larges catégories de praticiens, l'utilisation de logiciels et de données en libre accès devrait être prioritaire. Une liste de logiciels et données en libre accès peut être consultée à la fin du guide. |
| Modélisation et estimation de l'aléa | En l'absence de séries de mesures hydrométriques, il est impossible d'estimer des temps de retour de crue . Ainsi, souvent les temps de retour utilisés se réfèrent aux événements pluvieux. Cet aspect doit être pris en considération et communiqué aux intéressés (gestionnaires, urbanistes, etc). |

5. Modélisation hydraulique

Afin d'estimer l'ampleur spatiale des crues étudiées, les hydrogrammes de crue obtenus lors de la phase de modélisation hydrologique sont utilisés comme

entrée pour des modèles hydrauliques. Selon les besoins du projet et les caractéristiques des crues, on peut utiliser (Tableau 6-1) :

Tableau 6-1. Utilisation des données hydrologiques en fonction des besoins du projet

| ELEMENT UTILISE | CARACTERISTIQUES DES CRUES | OBJECTIFS DU PROJET |
|----------------------------|------------------------------------|--|
| Hydrogramme de crue | Crues lentes, inondations en nappe | Cartographie des aléas, systèmes d'alerte, cartes d'évacuation |
| Pic de crue | Crues éclair et rapides | Cartographie des aléas |

Encore, en fonction du type de terrain et de sa complexité, un traitement des écoulements en une ou deux dimensions peut s'avérer nécessaire. Ce

travail présente deux exemples de modélisation hydraulique selon ces critères (Tableau 6-2).

Tableau 6-2. Les modèles hydrauliques utilisés en fonction des besoins du terrain et du projet.

| CAS D'ETUDE | TYPE DE TERRAIN | TYPE DE MODELE |
|--------------------|--|---|
| Fès | Domaine de vallées et plaines alluviales, crues rapides | A débit constant, utilise le pic de crue, 1 dimension (Logiciel : USACE HEC-RAS) |
| Beni Mellal | Domaine de piémont, crues éclair et inondations en nappe | A débit variable, utilise l'hydrogramme de crue, 2 dimensions (Logiciel : TUFLOW) |

Modélisation 1D pour le domaine « vallées » à Fès

Les caractéristiques morphologiques et la typologie des crues sur le terrain de Fès se prêtent à une modélisation unidimensionnelle des écoulements.

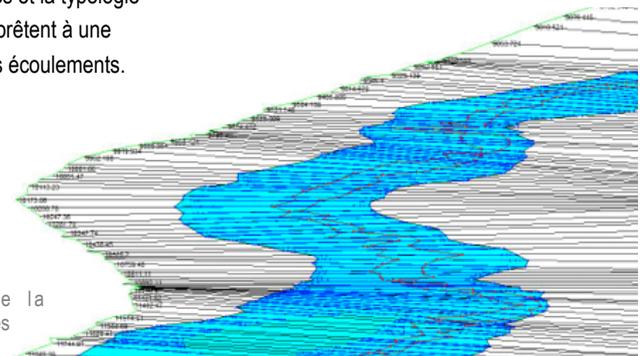


Figure 6-1. Approche 1D de la modélisation : détail sur le terrain de Fès

Tableau 6–3 La démarche de modélisation hydraulique : Fès.

| ETAPE | DEMARCHE | LOGICIELS UTILISES |
|---------------------------|--|---|
| 1. Préparation du modèle | <ul style="list-style-type: none"> - création des données de topographie de base (modèle numérique de surface de l'agglomération de Fès complété par des levés topographiques ponctuels) - exportation du fichier de géométrie (chenaux, berges, lit majeur sections transversales) - prise en compte des ouvrages d'art influençant le développement des inondations | HEC-GeoRAS (USACE) HEC-RAS (USACE) |
| 2. Simulation hydraulique | <ul style="list-style-type: none"> - paramétrage du modèle (conditions limite) - simulation des écoulements et obtention de l'extension, hauteur d'eau et vitesse maximales | HEC-RAS (USACE) |
| 3. Validation du modèle | <ul style="list-style-type: none"> - comparaison avec la carte des phénomènes et des estimations par la méthode hydrogéomorphologique | |

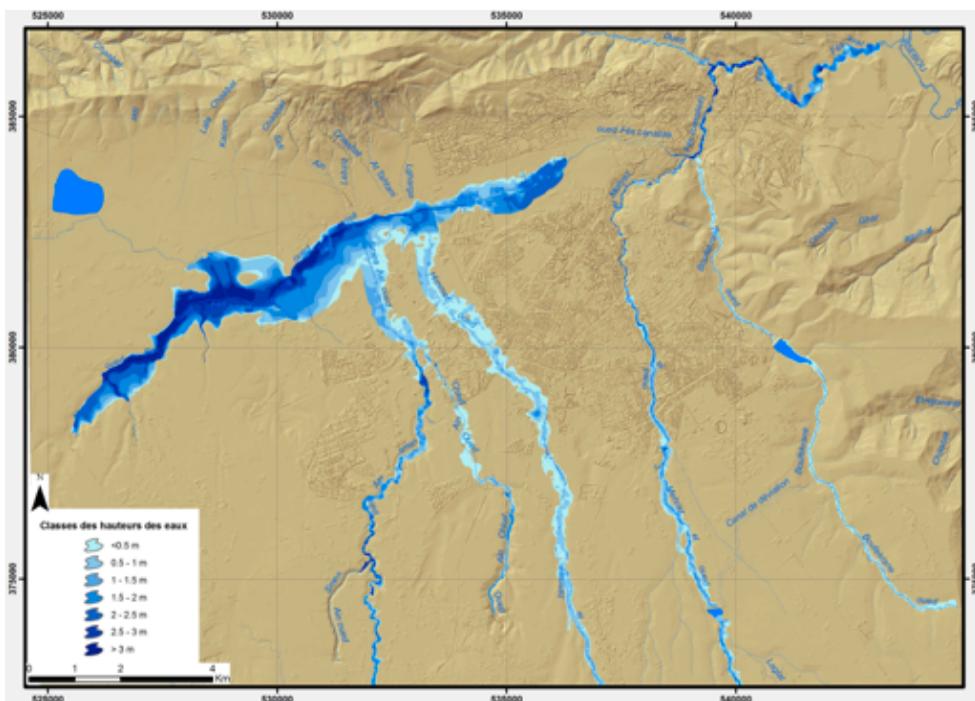


Figure 6–2. Résultats de la modélisation hydraulique 1D à Fès : hauteur maximale d'eau.

6.2. Modélisation 2D pour le domaine « cônes de piémont » de Beni Mellal

Tableau 6–4. La démarche de modélisation hydraulique : Beni Mellal.

| ETAPE | DEMARCHE | LOGICIELS UTILISES |
|----------------------------------|---|--|
| 1. Modèle topographique | <ul style="list-style-type: none"> - création des données de topographie de base (MNT issu du plan de restitution de Beni Mellal) - amélioration du MNT le long des chenaux par ajout de sections | ArcMap (ESRI) HEC-GeoRAS HEC-RAS (USACE) |
| 2. Modèle hydraulique | <ul style="list-style-type: none"> - génération d'une grille topographique à résolution = 3m - paramétrage du modèle (conditions limites) | SMS (Aquaveo) |
| 3. Simulation hydraulique | <ul style="list-style-type: none"> - simulation des écoulements et obtention de l'extension, hauteur d'eau et vitesse maximales | TUFLOW |
| 4. Calibration du modèle | <ul style="list-style-type: none"> - analyse de sensibilité sur les paramètres internes au modèle - vérification utilisant la carte des phénomènes - mesure de l'acuité du modèle par différents indicateurs (acuité générale, F, Kappa) | TUFLOW Excel, ArcMap (ESRI) |

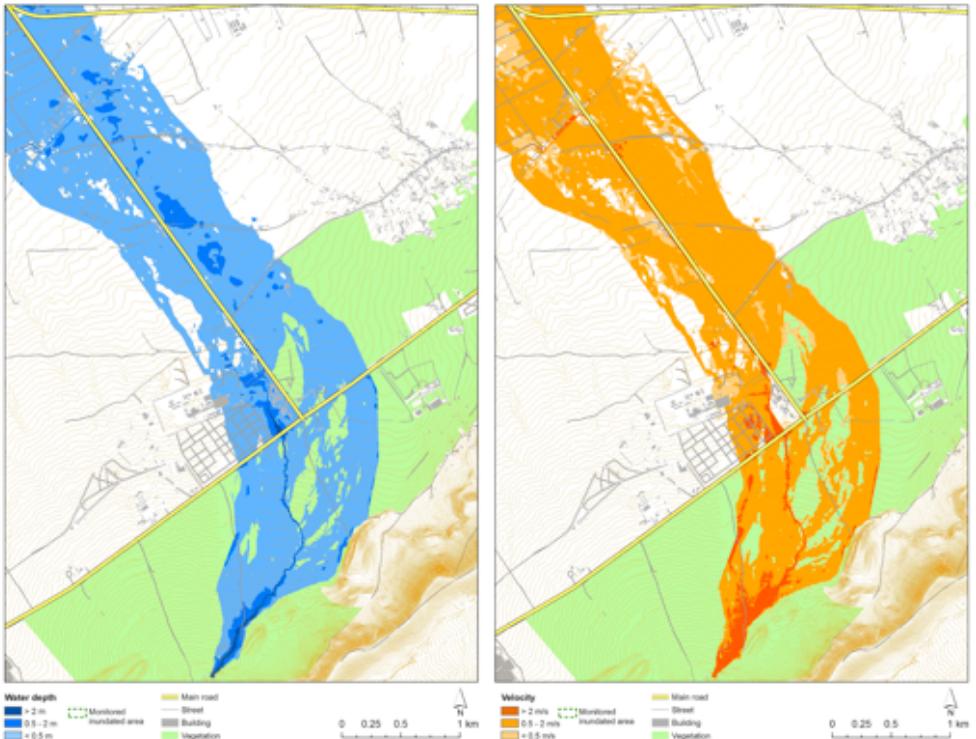


Figure 6–3. Modélisation hydraulique 2D. Résultats (Beni Mellal): hauteur d'eau et vitesse maximale. Tiré de Werren

RECOMMANDATIONS POUR LA CARTE DES PHENOMENES ET LE MONITORING DES CRUES

| | |
|-----------------------------------|---|
| Le temps | La modélisation hydraulique des écoulements peut s'avérer fastidieuse. Dans les modèles 1D, des centaines de profils transversaux peuvent être nécessaires pour obtenir un modèle réaliste et de bons résultats de simulation. Les modèles 2D dépendent aussi de la qualité du MNT ; de plus, les simulations nécessitent du temps et une grande capacité de calcul. |
| L'expertise | Cette approche interdisciplinaire exige des connaissances d'hydraulique qui doivent être complétées par de bonnes connaissances des SIG et du terrain. |
| Le terrain | Pour vérifier le modèle lorsque les mesures hydrométriques manquent, les approches de terrain décrites en section 4.2 sont recommandées : estimations de débit dans des sections transversales et la carte des zones inondées. Dans un environnement complexe tel que les cônes de piémont, les mesures de terrain devraient être complétées par des méthodes indirectes de télédétection, si de telles données sont disponibles. |
| Sensibilité des paramètres | L'analyse de sensibilité peut guider le choix des paramètres internes au modèle, mais l'influence des variables sur le résultat final dépend de la plage de valeurs choisies. Ainsi, des valeurs exagérées de certains paramètres tels la rugosité peuvent donner de bons résultats mais ne se justifient pas physiquement. Le choix des valeurs reste donc amplement à l'appréciation du praticien. |
| Le côté technique | Pour que cette approche soit accessible à de larges catégories de praticiens, l'utilisation de logiciels et de données en libre accès devrait être prioritaire. Les données localement disponibles comme les plans de restitution des villes doivent être mis gratuitement à disposition des praticiens. Les logiciels fournis par l'USACE (HEC-HMS, HEC-RAS et leurs extensions pour ArcMap) respectent ce critère. Dans les environnements complexes (cônes de piémont), l'utilisation d'un logiciel payant (TUFLOW) permettant la modélisation 2D est nécessaire. |

7. Carte indicative de danger d'inondation

7.1. La matrice du danger

Les cartes de dangers suisses se basent sur une matrice qui croise l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence. En termes d'aménagement urbain, cette approche permet de mettre en place des mesures de réduction des risques adaptées et ciblées pour chaque portion du terrain analysé. Des matrices similaires sont utilisées au Royaume-Uni et dans certains Lands allemands. Dans la méthodologie suisse, des seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence ont été établis pour chaque aléa considéré (Tableau 7-1).

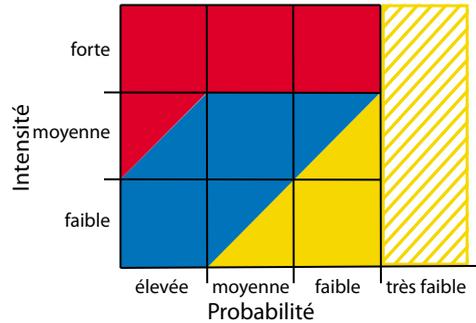


Figure 7-1. La matrice de danger suisse.

Tableau 7-1. Seuils d'intensité et probabilité d'occurrence selon la méthode suisse.

| MESURE | CRITERE | FAIBLE | MOYENNE | FORTE |
|--------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| Intensité | $H[m]$ | $H < 0.5$ | $0.5 < H < 2$ | $H > 2$ |
| | $v * H [m^2/s]$ | $v * H < 0.5$ | $0.5 < v * H < 2$ | $v * H > 2$ |
| Probabilité | Temps de retour T_n | $T_n = 300$ ans | $T_n = 100$ ans | $T_n = 30$ ans |

Tableau 7-2. Code de couleur de la matrice suisse et sa signification.

| ZONE | NIVEAU DE DANGER | SIGNIFICATION POUR L'AMENAGEMENT |
|--------------------|------------------|---|
| Rouge | Danger élevé | Interdiction de construire, dézonage des zones constructibles non utilisées |
| Bleu | Danger moyen | Construction possible à condition de prendre des mesures préventives |
| Jaune | Danger faible | Construction agréée, zone de sensibilisation au danger. |
| Jaune-blanc | Danger faible | Construction agréée, zone de sensibilisation au danger. |

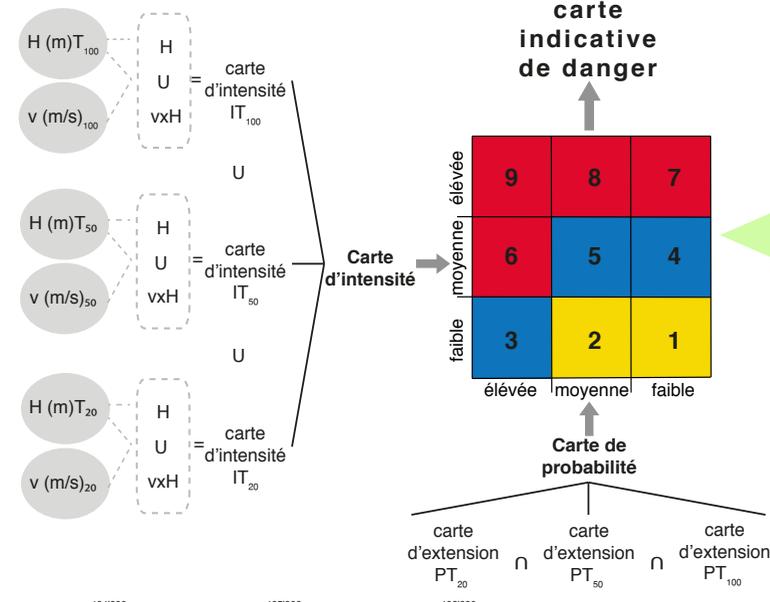
7.2. La carte indicative du danger d'inondation

Des cartes d'intensité maximale pour des événements de fréquence élevée, moyenne et faible, issues de la modélisation et vérifiées sur le terrain, sont combinées en une seule carte d'intensité. Le processus d'inclusion est utilisé pour combiner ces cartes (outil Union en ArcMap).

L'extension maximale des inondations pour trois temps de retour de référence est introduite pour

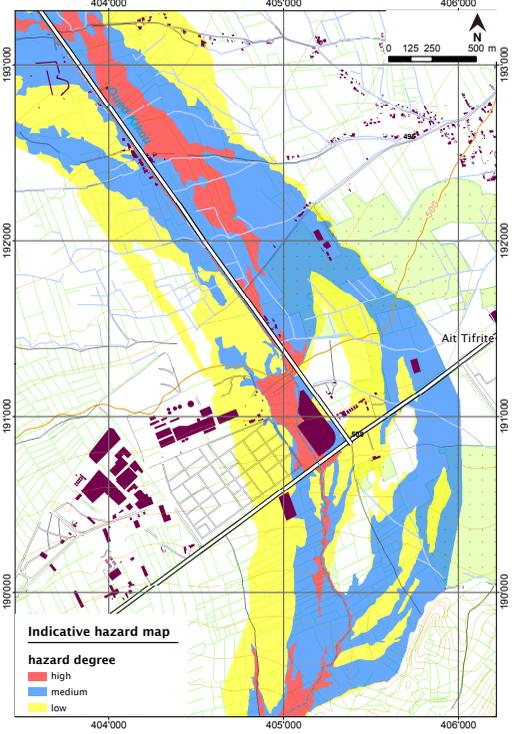
obtenir la carte de probabilité. Cette carte est le résultat d'un processus d'exclusion (outil Erase en ArcMap).

Par le croisement des cartes d'intensité et probabilité ainsi obtenues, une nouvelle carte à 9 attributs a été obtenue. Ensuite, cette carte a été classifiée en trois zones de danger, rouge, bleue et jaune, à l'aide de la matrice suisse de danger (Figure 7-1).



Les cartes de danger sont obtenues à partir de modélisations et des observations de terrain. Le praticien a une relative liberté dans la classification des zones de danger: ici, un choix «prudent» a été fait (minimisant les zones jaunes)

Figure 7–2. Marche à suivre pour la réalisation de la carte de danger. H = hauteur maximale d'eau ; v = vitesse maximale d'eau ; T_n = temps de retour de référence ; I = intensité ; P = probabilité.



L'application de la méthodologie suisse est exemplifiée par les cartes indicatives du danger d'inondation produites pour les terrains d'étude de Fès et Beni Mellal. La production des cartes passe nécessairement par des adaptations au contexte d'étude.

A la différence des cartes suisses, les cartes réalisées dans le contexte marocain sont considérées comme des **cartes indicatives**, pour deux raisons :

- la carte est un outil d'aide à la décision et non un instrument de l'aménagement faute de législation spécifique au Maroc ;
- la carte représente la somme des incertitudes accumulées durant les différentes phases de sa réalisation.

Une autre différence est liée aux choix des **seuils de probabilité**, qui ont été fixés aux temps de retour de 20, 50 et 100 ans pour adapter la carte à la pratique marocaine.

Figure 7–3. Exemple de carte de danger. Cas de Beni Mellal. Tiré de Werren (2013).

RECOMMANDATIONS POUR LA REALISATION DE LA CARTE DE DANGER

| | |
|---|--|
| Mise en carte | La carte de danger sera réalisée à partir de cartes d'inondation issues de la modélisation hydraulique validées par des mesures et / ou des données de terrain |
| Carte d'intensité | La carte d'intensité est obtenue en combinant deux critères d'évaluation : la hauteur maximale d'eau et le produit de la hauteur d'eau et vitesse maximale pour rendre compte des inondations statiques et dynamiques . La carte d'intensité englobe les données d'intensité obtenues pour les trois temps de retour retenus (ici 20, 50, 100 ans) |
| Carte de probabilité | La carte de probabilité est obtenue par l'intersection des cartes d'extension maximale pour les temps de retour de référence. Elle représente les conséquences spatiales probables d'un événement de référence donné. |
| Intersection Intensité - probabilité | Le croisement des cartes d'intensité et de probabilité selon la matrice du danger résulte en une carte contenant 9 classes . La reclassification de cette carte en trois zones de danger est en partie guidée par la matrice , mais elle laisse aussi la place pour la prise de décision . |
| Code de couleur | L'adaptation des cartes de danger suisses à l'étranger a montré que le code de couleurs est souvent mal compris, surtout pour la zone de danger moyen, représentée en bleu. En effet, la couleur bleue est souvent associée à l'eau, et l'interprétation de la carte peut être biaisée dans un contexte multi-aléas. En Suisse, ce choix est justifié car les zones de danger des cartes suisses sont associées à des mesures d'aménagement précises. Dans le cas où la carte est premièrement un outil d'aide à la décision , un autre choix de couleurs peut être pertinent. Un code rouge – orange – jaune peut ainsi être utilisé. |
| Seuils | Probabilité : le choix doit s'adapter à la pratique et aux besoins de l'aménagement. Par exemple, au Maroc, les temps de retour de 10, 20, 50 et 100 ans sont souvent utilisés pour la calibration des ouvrages de protection. La définition des crues « fréquentes » est liée à la perception du risque dans un contexte donné. Intensité : de ce fait, les seuils doivent être adaptés aux caractéristiques marocaines : style de construction, qualité des matériaux, etc. |

8. Conclusion

Des cartes d'intensité maximale pour des événements de fréquence élevée, moyenne et faible, issues de la modélisation et vérifiées sur le terrain, sont combinées en une seule carte d'intensité. Le processus d'inclusion est utilisé pour combiner ces cartes (outil Union en ArcMap).

L'extension maximale des inondations pour trois temps de retour de référence est introduite pour obtenir la carte de probabilité. Cette carte est le

résultat d'un processus d'exclusion (outil Erase en ArcMap).

Par le croisement des cartes d'intensité et de probabilité ainsi obtenues, une nouvelle carte à 9 attributs est obtenue. Ensuite, cette carte est classifiée en trois zones de danger, rouge, bleue et jaune, à l'aide de la matrice suisse de danger (Figure 7-3).

Liste de logiciels et données utiles

| | |
|--|--|
| Suite ESRI (desktop et mobile : ArcMap, ArcPad, ArcGIS Online) | http://www.esri.com |
| HEC-HMS : modélisation hydrologique | http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/ |
| HEC-GeoHMS : extension ArcMap pour la mise en place du modèle hydrologique | http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/ |
| HEC-RAS : modélisation hydraulique 1D | http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/ |
| HEC-GeoRAS : extension ArcMap pour la mise en place du modèle hydraulique | http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/ |
| SMS – Surface water Modelling System : interface SIG pour la mise en place de modèles hydrauliques | http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction |
| TUFLOW : modèle hydraulique 2D accessible à l'aide de l'interface SMS | http://www.tuflow.com/Tuflow%20Latest%20Release.asp |
| ASTER : données d'altitude à couverture globale, résolution spatiale = 20m | http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/ http://earthexplorer.usgs.gov |
| SRTM : données d'altitude, couverture globale, résolution = 90m | http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM30/ http://earthexplorer.usgs.gov |
| Landsat : images satellite multicanal, résolution = 30m, peut être affinée à 15m | http://www.landsat.org http://earthexplorer.usgs.gov |
| TRMM : estimations satellite de précipitations : set de données 3B42 à résolution spatiale = 0.25°x0.25° et résolution temporelle = 3h | http://trmm.gsfc.nasa.gov/data_dir/data.html : accès aux données via ftp http://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html : description de 3B42 |

Bibliographie

- Ballais J. - L., Chave S., Dupont N., Masson E., Penven M. - J. (2011). *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*, Physio-Géo, collection "Ouvrages", téléchargé 2.12.2010, www.physio-geo.fr.
- Furdada G., Calderon E. L., Marqués M. A. (2008). Flood hazard map in La Trinidad (Nicaragua). Method and results, *Natural Hazards* 45(2), 183-195.
- Gaume E., Borga M. (2008). Post-flood field investigations in upland catchments after major flash-floods: proposal of a methodology and illustrations. *Journal of Flood Risk Management* 1, 175-189.
- 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. (2014). *L'agglomération de Fès face aux risques d'inondation. De l'étude hydrologique à la carte de danger*, Thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed ben Abdellah, Fès (en préparation).
- Loat R., Petrascheck A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*, Recommandations, 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), Berne.
- NRC (1996). *Alluvial Fan Flooding*, National Research Council, Committee on 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 versants de Fès et Beni Mellal*, Rapport rédigé dans le cadre du projet "Gestion du risqué 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. URL: http://my.unil.ch/serval/document/BIB_EE50ABC4D683.pdf
- Reynard E., Lasri M., Werren G., Obda K., Amyay M., Taous A., Balin D., Lane S. N. (2012) *Etude des dangers d'inondation dans les bassins de Fès et Beni Mellal. Analyse hydrologique, carte indicative des dangers, étude de la vulnérabilité et recommandations*, Rapport rédigé dans le cadre du projet "Gestion du risqué d'inondation dans deux bassins versants marocains: Fès et Beni Mellal", financé par la Direction du développement et de la coopération suisse, Lausanne, Fès, Novembre 2012.
- Reynard E., Werren G., Lasri M., Obda K., El Khalki Y. (2013). Cartes des phénomènes d'inondation dans deux bassins versants marocains : problèmes méthodologiques, *Mémoires de la Société vaudoise de sciences naturelles* 25, 61-71.
- Yu D., Lane S. N. (2006). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. *Hydrological Processes* 20, 1541-1565.
- Werren G. (2013). Maps as risk mitigation tools. Adaptation of the Swiss hazard assessment and mapping methodology to a Moroccan site, *Géovisions* 44, Université de Lausanne. URL: http://issuu.com/cedocigul/docs/geovisions_44; http://my.unil.ch/serval/document/BIB_28316A5BCD24.pdf

Annexe 1

Dangers naturels

Légende modulable pour la cartographie des phénomènes

Crues, laves torrentielles

LEGENDE MINIMALE

p.ex. à l'usage des plans d'ensemble
(p.ex. 1:25'000 / 1:10'000)

LEGENDE ELARGIE

p.ex. à l'usage des cartes de détail
(p.ex. 1:5'000)

| | <p>LEGENDE MINIMALE</p> <p>p.ex. à l'usage des plans d'ensemble (p.ex. 1:25'000 / 1:10'000)</p> | <p>LEGENDE ELARGIE</p> <p>p.ex. à l'usage des cartes de détail (p.ex. 1:5'000)</p> |
|--|--|--|
| <p>Zone d'arrachement</p> | <p>Lit sans laves torrentielles</p> <p>Lit avec laves torrentielles</p> | <p>Lit sans laves torrentielles</p> <p>Lit avec laves torrentielles</p> |
| | <p></p> <p>Zone d'arrachement source de laves torrentielles en matériaux meubles (par exemple P: Zone d'arrachement en permafrost)</p> | <p></p> <p>Zone d'arrachement source de laves torrentielles en matériaux meubles (par exemple P: Zone d'arrachement en permafrost)</p> |
| <p>Zone de transit avec mobilisation et remobilisation de matériaux</p> | <p></p> <p>Forte érosion de fond</p> | <p></p> <p>Forte érosion de fond en matériaux meubles</p> |
| | <p></p> <p>Erosion de fond</p> | <p></p> <p>Erosion de fond en matériaux meubles / en rocher</p> |
| | <p></p> <p>Pas d'érosion, resp. érosion latente seulement aussi en cas de crue, resp. de lave torrentielle (lit rocheux en règle générale)</p> | <p></p> <p>Pas d'érosion, resp. érosion latente seulement aussi en cas de crue, resp. de lave torrentielle (lit rocheux en règle générale)</p> |
| | <p></p> <p>Erosion latérale/érosion des berges active, fraîche</p> | <p></p> <p>Erosion latérale en matériaux meubles active, en général manifeste</p> |
| | <p></p> <p>Erosion latérale/érosion des berges peu active</p> | <p></p> <p>Erosion latérale en rocher active, en général manifeste</p> |
| | <p></p> <p>Erosion latérale en matériaux meubles peu active</p> | <p></p> <p>Erosion latérale en rocher peu active</p> |
| | <p></p> <p>Talus de berge instable / en glissement (matériaux meubles) actif</p> | <p></p> <p>Talus de berge instable en glissement (matériaux meubles) actif</p> |
| | <p></p> <p>Talus de berge instable / en glissement (matériaux meubles) peu actif</p> | <p></p> <p>Talus de berge instable en glissement (matériaux meubles) peu actif</p> |
| | <p></p> <p>Talus de berge en rocher</p> | <p></p> <p>Talus de berge en rocher</p> |
| | <p></p> <p>Talus de berge instable / en glissement (matériaux meubles) actif</p> | <p></p> <p>Talus de berge instable en glissement (matériaux meubles) actif</p> |
| <p></p> <p>Talus de berge instable / en glissement (matériaux meubles) peu actif</p> | <p></p> <p>Talus de berge instable en glissement (matériaux meubles) peu actif</p> | |
| <p></p> <p>Tronçon avec alluvionnement tronçon de ruisseau / de rivière avec dépôts alluviaux remobilisables</p> | <p></p> <p>Tronçon avec alluvionnement tronçon de ruisseau / de rivière avec dépôts alluviaux remobilisables</p> | |
| | <p>Exemples pour la représentation détaillée des caractéristiques des dépôts alluviaux intermédiaires</p> <p>Représentation de la taille des blocs (composants isolés) :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ gros blocs >2 m ▲ blocs 0.5m - 2 m ● pierres et petits blocs < 0.5 m <p>Représentation de la formation alluviale :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■▲ alluvions récentes □○ alluvions plus anciennes | <p>Sommet du talus de berge, respect. limite supérieure du talus d'érosion active de berge</p> |

Annexe 2

Dangers naturels

Légende modulable pour la cartographie des phénomènes

Crues, laves torrentielles (suite)

LEGENDE MINIMALE

p.ex. à l'usage des plans d'ensemble
(p.ex. 1:25'000 / 1:10'000)

LEGENDE ELARGIE

p.ex. à l'usage des cartes de détail
(p.ex. 1:5'000)

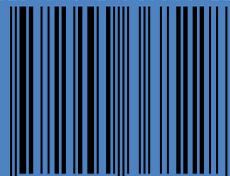
| | | |
|-----------------------|--|---|
| Dépôts et inondations | <p>Depôts fluviatiles</p>  <p>Depôts par laves torrentielles</p>  <p>Depôts récents Débordement avec dépôts (alluvions / laves torrentielles)</p>  <p>Depôts plus anciens (évit. recolonisés par la végétation) Débordement avec dépôts (alluvions / laves torrentielles)</p>  <p>Zone de dépôts potentiels d'alluvions / de laves torrentielles potentielle</p>  <p>Cheminement de débordement eau / lave torrentielle, prouvé</p>  <p>Cheminement de débordement eau / lave torrentielle potentiel</p>  <p>Zone inondable (essent. eau et boue) prouvé</p>  <p>Zone inondable (essent. eau et boue) potentielle</p>  | <p>Depôts fluviatiles</p>  <p>Depôts par laves torrentielles</p>  <p>Depôts récents. Gros blocs > 2m</p>  <p>Depôts plus anciens (évit. recolonisés par la végétation) Gros blocs > 2m</p>  <p>Depôts récents Blocs 0.5 - 2m et bois</p>  <p>Depôts plus anciens (évit. recolonisés par la végétation) Blocs 0.5 - 2m et bois</p>  <p>Zone potentielle de dépôt Blocs 0.5 - 2m</p>  <p>Depôts récents Pierres - petits blocs < 0,5 m</p>  <p>Depôts plus anciens (évit. recolonisés par la végétation) Pierre - petits blocs < 0,5 m</p>  <p>Front de dépôt de lave torrentielle</p>  <p>Exemple: fronts individualisés sur un cône de déjection</p>  <p>Zone de dépôts potentiels d'alluvions / de laves torrentielles potentielle</p>  <p>Cheminement de débordement eau / lave torrentielle, prouvé</p>  <p>Cheminement de débordement eau / lave torrentielle potentiel</p>  <p>Zone inondable (essent. eau et boue) prouvé</p>  <p>Zone inondable (essent. eau et boue) potentielle</p>  <p>Ancien lit</p>  |
| | Aménagements / signes caractéristiques du terrain | <p>Cascade (chute > 5 m)</p>  <p>Rétrécissement</p>  <p>Pont (section libre: largeur 5m, hauteur 3m, pente 5%)</p>  <p>Voûtage (diam. 2m, pente 12%, et largeur 3m, hauteur 2m, pente 7%)</p>  <p>Digue en dur</p>  <p>Seuil</p>  <p>Point d'obstruction (naturel) du cours</p>  <p>Endiguement combiné</p>  <p>Canal revêtu</p>  <p>Seuils coupe-courant</p>  <p>Digue végétalisée</p>  <p>Epis de protection</p>  <p>Dépotoir</p>  <p>Barrages coupe-courant</p>  |

© Lausanne, Fès; Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne (IGD), Laboratoire d'analyses géo-environnementales et aménagement de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès(LAGEA). Juillet 2014

No ISBN: 978-2-94368-22-8

Publié avec le financement de la Direction du développement et de la coopération suisse (DDC)

ISBN 978-2-940368-22-8



9 782940 368228 >