



HAL
open science

Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger

Wahiba Menad

► **To cite this version:**

Wahiba Menad. Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger. Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2012. Français. NNT: . tel-00787142

HAL Id: tel-00787142

<https://theses.hal.science/tel-00787142>

Submitted on 11 Feb 2013

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

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

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT - Paris 7

École doctorale : E.E.S.C.

"Économie, Espaces, Sociétés, Civilisations"

THÈSE DE DOCTORAT

en GÉOGRAPHIE

Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger

Présentée par

WAHIBA MENAD

Thèse soutenue 20 décembre 2012

Jury

Gilles ARNAUD-FASSETTA (directeur)	Professeur	Université Paris Diderot
Monique FORT (co-directrice)	Professeur	Université Paris Diderot
Jean-Pierre Larue (rapporteur)	Professeur	Université Paris-Est Créteil Val de Marne
Charles Le Cœur (rapporteur)	Professeur	Université Panthéon-Sorbonne
Gérard Beltrando (examineur)	Professeur	Université Paris Diderot
Johnny Douvinet (examineur)	Maître de conférences	Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse

A l'être le plus cher à mon cœur, Maman,
qui m'a toujours soutenu (moralelement et financièrement).

A la mémoire de mon Papa.

Sommaire

Sommaire.....	5
Remerciements	7
Résumé	9
Abstract	9
Introduction générale	11
Première partie. Le risque hydrologique généré par des épisodes météorologiques de caractère intense en métropole méditerranéenne	23
Introduction de la première partie	24
Chapitre 1. Précision terminologique concernant le risque en milieu urbain	25
Chapitre 2. Paramètres et mécanismes de genèse des crues et du ruissellement superficiel	43
Synthèse de la première partie.....	63
Deuxième partie. Les acquis sur le risque hydrométéorologique à Alger	65
Introduction de la deuxième partie.....	66
Chapitre 3. Contexte sociétal du risque hydrométéorologique à Alger	67
Chapitre 4. Contexte physique du risque hydrométéorologique à Alger : caractérisation et intérêt de l'étude ..	89
Synthèse de la deuxième partie	121
Troisième partie. Contribution de la thèse à l'étude du risque hydrométéorologique à Alger.....	123
Introduction de la troisième partie	124
Chapitre 5. Détermination et choix des événements de référence.....	125
Chapitre 6. Simulation numérique : évaluation du risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah <i>via</i> l'automate cellulaire <i>Ruicells</i>	141
Chapitre 7. Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : pourquoi un niveau de risque aussi élevé ?.....	193
Chapitre 8. Cartographie et gestion du risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche	231
Synthèse de la troisième partie.....	269
Conclusion générale	271
Références Bibliothèques	279
Sites internet	291
Annexes.....	293
Liste des figures	315
Liste des tableaux	320
Table des matières	323

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse Gilles Arnaud-Fassetta, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa disponibilité et pour la rigueur avec laquelle il a toujours relu mes travaux de recherche.

Je tiens à remercier également ma co-directrice de thèse Monique Fort, pour sa disponibilité, ses orientations et ses encouragements continus.

En plus de m'avoir formé tout au long de ces quatre années de thèse, mes deux directeurs de thèse m'ont particulièrement marqué par leur assiduité, leurs compétences et leur grande capacité de travail.

Je voudrais également remercier Johnny Douvinet de l'université d'Avignon, d'avoir accepté de me transmettre son savoir faire et me former sur l'automate cellulaire *Ruicells*. Je le remercie également d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.

Je remercie également Gérard Beltrando, de m'avoir orienté sur certains aspects météorologiques traités dans ce travail. Je tiens à le remercier aussi d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Mes sincères remerciements à Jean-Pierre Larue de l'université Paris-Est Créteil Val-de-Marne et à Charles Le Cœur de l'université Panthéon-Sorbonne (Paris 1) d'avoir acceptés de rapporter sur cette thèse.

Je remercie l'ensemble des administrations et agences (collectivités locales, SEAAL, directions de l'Hydrauliques, ...) qui m'ont ouvert leurs portes en Algérie.

Je remercie l'ensemble de l'équipe du laboratoire PRODIG, enseignants et doctorants, et je tiens à leur dire que ce fut un grand plaisir de travailler avec eux.

Une grande pensée à mes amies de la bibliothèque CIUP, si différents dans leur culture et dans leur nationalité, mais qui parlent tous la même langue, celle de l'humanité. Je vous remercie tous pour vos encouragements, votre soutien et votre amitié qui ont été très enrichissants pour moi.

Je remercie ce que j'ai de plus cher au Monde, ma petite famille : ma mère qui m'a toujours soutenu, ma sœur Lalia et mon frère Abdelkader, merci pour votre confiance, votre omniprésence et votre amour, sans vous je ne serais jamais arrivée au bout de ce travail. Je remercie également mes grands-mères Fatma et Kheira pour leurs encouragements et leur amour.

Résumé

Le Grand Alger est bâtie sur les contreforts des collines du Sahel. Par son positionnement et à l'image des autres métropoles méditerranéennes, il s'inscrit dans un contexte d'instabilité particulièrement cyclogénétique, qui se manifeste en surface terrestre avec des phénomènes d'inondation, de crue et de ruissellement superficiel. Néanmoins, le Grand Alger fait l'exception avec l'ampleur que prennent les dégâts occasionnés par le passage de ce type d'événement. L'événement des 9-10 novembre 2001, qui a affecté la partie ouest du Grand Alger, reflète parfaitement ce propos. Les crues déclenchées par cet événement ont causé des dégâts matériels et des pertes en vie humaine inégalés dans le bassin méditerranéen. Dans ce travail, en employant des outils de traitement classiques et de simulation numérique, on a essayé de comprendre au mieux le comportement de l'hydrosystème dans sa globalité (facteurs météorologiques, hydrogéomorphologiques et anthropiques). On a ensuite hiérarchisé les facteurs prédisposants-déclenchants-aggravants de crue et de ruissellement superficiel dans cette région. Les résultats de l'ensemble des analyses réalisées ont servi à quantifier et cartographier le risque. Au final, on propose de nombreuses mesures d'intervention (combinaison de mesures structurales et non structurales) dans le but de réduire le niveau important du risque actuel.

Mots clés : Grand Alger, Massif de Bouzaréah, risque, crue, ruissellement superficiel, emprise urbaine, simulations numériques, approche systémique.

Abstract

The Grand Algiers was built on the Sahel foothills. Like other Mediterranean metropolises, it fits in a context of strong cyclogenetic instability, which manifests by floods and the surface runoffs. However, the Grand Algiers makes the exception with the scale which takes the damages after the passage of one of these meteorological events. The event of November 9-10th, 2001, which affected the western part of Grand Algiers, reflects perfectly this situation. Floods activated by this event caused damage to the property and loss of life, which are unequalled in the Mediterranean Basin. In this work, by using classic tools and numerical simulation, we tried to understand the behaviour of the whole hydrosystem (meteorological, geomorphological, and anthropogenic factors). Then we have classified the predisposing, triggering, and aggravating factors of flooding and surface runoff. The results of all the analyses serve for quantifying and mapping the risk. To conclude, we made various management proposals (combination of structural and non structural measures), in order to reduce the important level of present risk.

Key words: *Grand Algiers, Massif of Bouzaréah, risk, flood, surface runoff, urban pressure, modelling, systemic approach.*

Introduction générale

Les crues et les inondations sont considérées comme les formes de risque naturel les plus répandues et les plus dévastateurs dans le Monde. Le bassin méditerranéen n'échappe pas à cette règle : les inondations représentent 35 % de l'ensemble des catastrophes naturelles qui ont frappé son pourtour ces deux dernières décennies. Selon les données publiées par l'EMDAT, on compte un total de 210 événements hydrométéorologiques intenses, qui ont provoqué plus de 4250 morts et d'immenses dégâts matériels s'élevant à 25 milliards d'euros. Le bassin Méditerranéen abrite les formes les plus dangereuses de risque hydrométéorologique. Un risque qui dérive d'une combinaison d'un haut niveau d'aléa (météorologique, hydrologique, conditions physiographiques) et une forte vulnérabilité. Selon l'orographie, les modes d'utilisation du sol (urbain, industriel, agricole) et l'endroit où on se place dans le bassin Méditerranéen (rive nord, rive sud), les impacts (pertes en vie humaine, dégâts matériels, effets socio-économiques) de cet aléa se manifestent d'une manière très différentes.

Les événements les plus catastrophiques observés dans le bassin Méditerranéen sont en grande partie déclenchés par des épisodes météorologiques d'intensité remarquable. Le climat méditerranéen s'inscrit dans un contexte particulièrement cyclogénétique, connu pour ses épisodes pluvieux de forte intensité et de courte durée. Ce sont des épisodes pluvieux qui résultent de configurations atmosphériques typiques et tout à fait prévisible à grande échelle (Chaboureau *et al.*, 2001) ; en revanche, leur comportement à micro-échelle (échelle convective) est conditionné par un complexe interactif de plusieurs processus qui, à ce jour, restent mal connus. Cette méconnaissance peut expliquer les défaillances souvent relevées au niveau des services de prévision météorologique.

Les réponses hydrologiques déclenchées par ces événements météorologiques intenses sont souvent jugées efficaces (rapidité, forts débits de pointe) et aux conséquences graves voire destructives.

Etat de l'art

Devant l'ampleur croissante du risque hydrométéorologique, les scientifiques, les politiciens et les gestionnaires en ont fait une priorité. Et le grand nombre de travaux réalisés au cours de ces dernières années dans chacune de ces disciplines en témoigne.

On compte sur les deux précédentes décennies un nombre important d'études qui se sont penchées sur l'analyse des processus atmosphériques générateurs de pluies intenses ainsi que sur leurs relations avec les facteurs environnementaux (Lasat et Rodriguez., 1997 ; Homar *et al.*, 2003 ; Lebeau-pin *et al.*, 2006 ; Ducrocq *et al.*, 2007). Sans pour autant pouvoir atteindre le but ultime de pouvoir localiser avec précision et en temps réel ces épisodes météorologiques à caractère cyclogénétique. Néanmoins, les connaissances en ce domaine ont connu de véritables avancées, en particulier après la mise en place des réseaux de radar qui permettent de suivre et fournir des informations en temps réel sur l'évolution des configurations atmosphériques. Les informations brutes fournis par ces radars sont rendues compréhensibles et lisibles par le plus grand public grâce aux développements des algorithmes d'inversion spé-

cialisés ainsi que le développement des outils de la modélisation météorologique et atmosphérique : *GFS* : *Système global de prévision*, développés par NOAA ; *GEMME* : *Modèle environnemental global de Multiscale*, développé par Service météorologique du Canada (MSC) ; *ARPEGE*, développé par *Météo France* ; *AR-WRF* ; *WRF*, développé aux États-Unis par le Centre national pour la recherche atmosphérique, etc. Dans le bassin méditerranéen, le projet *Arc Méditerranéen* (1999-2004) a donné un vrai coup de pouce en ce qui concerne la généralisation des réseaux de prévision (Delrieu, 2005). On trouve le *ClimChAlp*, programme européen mené par les sept pays de l'Arc Alpin, dans lequel la problématique du changement climatique est étudiée afin de proposer des stratégies de développement durable adaptées aux conditions de la région.

La grande majorité de ces projets de recherche ont adopté une politique favorable à la communication de l'information, et ils ont rendu publics les résultats de leur travaux. On mentionnera à ce titre les *cartes de vigilance météorologique* publiées sur le net ; il s'agit d'une base de données qui couvre un large spectre spatial du continent européen, dans laquelle des données météorologiques sont publiées à temps réel. Cette publication est le résultat d'un travail de coordination entre de nombreux centres météorologiques européens. Les bases de données météorologiques et/ou climatiques sont actuellement de plus en plus nombreuses (*wetterzentrale*, *infoclimat*, *meteoblue*, *Mundomanz...*) ; elles couvrent des échelles spatio-temporelles différentes et fournissent toutes sortes de données : les températures, la pluviométrie, la nébulosité, les cartes de réanalyse, les cartes de pression, les images satellitaires ainsi que de nombreuses autres données à caractère climatique.

La maîtrise de l'aléa hydrologique a également connu de grandes avancées. Un aléa classiquement caractérisé par : la hauteur d'eau, la durée de submersion, le débit ; on se contente souvent de jauger un ou deux d'entre eux. Les paramètres sont considérés indépendamment l'un de l'autre, donc rarement simultanément. Selon Torterotot (1993), la hauteur de submersion est largement suffisante pour caractériser l'aléa hydrologique et il considère que les autres paramètres évoluent en fonction de celle-ci et que les effets de ces derniers sur le milieu sont négligeables. Au contraire, Riccardi (1997) et Barozet *et al.* (1994) pensent que la caractérisation de l'aléa hydraulique nécessite à la fois le calcul de la vitesse des écoulements et de la hauteur de submersion. D'ailleurs, c'est bien ces deux derniers paramètres qu'ont été retenus au niveau du Ministère de l'Environnement. A ce niveau, le choix des paramètres est fortement influencé par la nature de la vulnérabilité présente sur le terrain.

La modélisation hydrologique (modèles empiriques globaux, modèles conceptuels, modèles à base physique) et, en particulier, la modélisation numérique dont les bases ont été jetées par M.B Abbott (1991), représente une entreprise moderne qui a et qui continue à révolutionner le domaine de l'hydrologie ; grâce à elle, de nombreuses limites classiques ont pu être surmontées (Ghidaglia et Rittaud, 2004). Les modèles numériques qui existent actuellement sont dotés d'une performance jugée acceptable et d'une utilisation conviviale (Abbott *et al.*, 1991b) mais sans pour autant arriver à l'objectif espéré, qui consiste à remplacer les experts par un modèle numérique facilement manipulable, dans lequel toutes les connaissances d'un expert physique sont incorporés (Harvey, 2002).

On distingue dans le domaine de la modélisation hydrologique trois principales catégories de modèles : 1) *Les modèles empiriques* : ce sont des modèles fondés sur de nombreuses observations de terrain, sans aucune démonstration théorique ou interprétation physique. Ces modèles sont principalement utilisés dans le but de caler et de valider des théories développées ou pour valider des modèles de simulation numérique. L'extrapolation des modèles empiriques, en dehors du domaine d'observation, est fortement critiquée ; 2) *Les modèles conceptuels* : il s'agit d'une schématisation des phénomènes du Monde réel. Selon le degré de précision recherché et la nature des *out-puts* à en tirer, les modélisateurs déterminent les simplifications à faire et à quel niveau elles auront lieu (Desbordes, 1984) ; 3) *Les modèles à base physique ou mécanistes* : il s'agit d'une représentation matérielle basée uniquement sur des équations physiques. Ils sont réalisés dans le but de simuler des phénomènes hydrologiques au laboratoire puis de soumettre des scénarios supposés pour pouvoir par la suite prédire leurs comportements face à différentes contraintes rencontrées en situation réelle. Ces modèles ne comportent aucun paramètre de calage.

Les modèles de simulation ou de modélisation numériques sont devenus des outils incontournables, dont leur conceptualisation, adaptation et performance sont en permanente évolution. Selon les caractéristiques du territoire, du phénomène hydrologique et du type d'information recherchés, les outils numériques vont varier entre modèles de simulation globaux et modèles spécialisés voire très spécialisés. Ces derniers permettent d'effectuer des analyses très poussées et raffinées afin de traiter une problématique localisée dans l'espace et dans le temps et viennent souvent compléter des *outputs* fournis au préalable par des modèles globaux. Il existe actuellement un nombre important de modèles numériques de simulation et/ou de modélisation hydrologique que l'on peut classer en deux catégories :

1) *Les modèles unidimensionnels (1D) et unidimensionnels dégradés*¹. Plusieurs logiciels ont été développés en fonction de ce principe, dont on peut citer : *ISIS Flow* qui est distribué en France par la société Géomod ; *EPANET 2.0* développé par l'US Environmental Protection Agency, les codes *MAGE*, etc.;

2) *Les modèles bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D)* : il existe un nombre important de logiciels de simulation hydrologique dans lesquels les écoulements sont analysés en deux ou trois dimensions : *MAGE Rubar20* développé par Cemagref (Paquier *et al.*, 2003), *TELEMAC* développé par EDF (ils en sont à leur 6^{ème} version), *SW2D* (Lhomme *et al.*, 2006), *Telemac 2D* développé en 1997 par LHF, *Reflux2D* développé par le CETE-Méditerranée en 2002, *FEFLOW* et *MODFLOW...*, le modèle *Soil and Water Assessment Tool* « *SWAT* » qui est un logiciel développé par *The United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service (ARS ; Borah et al.*, 2007) : il s'agit d'un modèle multifonctions dédié plutôt à la prévision et à la gestion préventive (impacts de la gestion de l'eau et des sédiments, effets des produits chimiques d'origine agricole dans des bassins versants non jaugés).

¹ C'est un modèle unidimensionnel auquel on a rajouté des équations supplémentaires telles que le Modèle de Barré de Saint-Venant 1D en régime permanent, les Modèles de type onde diffusante, etc.

L'évaluation de la vulnérabilité repose sur une analyse fine des enjeux (population, mode d'occupation et d'usage des sols) exposés à l'aléa. Il existe principalement trois grandes approches appliquées dans l'analyse et l'évaluation de la vulnérabilité : 1) *analyse coûts-bénéfices* (ACB) : cette approche est très largement admise dans de nombreux pays tels que la France (Hubert et Bruno, 1999), les États-Unis (USWRC, 1983), l'Angleterre (Penning-Rowsell, 1999), les Pays-Bas (Herman *et al.*, 1999). Selon Gaber (2007), une ACB consiste à « *comparer divers scénarios d'action entre eux ou par rapport à la situation de référence sur les base de coûts actualisés dans le temps et des bénéfices attendus actualisés sur la même période* ». L'application de cette approche dans le cas des phénomènes de crue et d'inondation pose problème du fait de la grande diversité des impacts à évaluer. Ce qu'on maîtrise actuellement, c'est l'évaluation des impacts directs (impacts physiques sur les biens et les personnes) ; les impacts indirects (*i.e.*, les impacts positifs et/ou négatifs liés à l'interruption ou la perturbation des activités) sont moyennement maîtrisés ; les impacts secondaires (impacts positifs et/ou négatifs sur les agents indirectement touchés) et les impacts intangibles (impacts dont l'évaluation monétaire est difficile, tels le stress, les impacts psychologiques, la rupture ou la perturbation du tissu social, etc.) restent très difficilement quantifiable, de ce fait, les gestionnaires les prennent rarement en considération dans les analyses de type ACB (Breaden, 1973) ; 2) *approche zonale* : elle se base sur un partage du territoire en plusieurs unités spatiales homogènes (maximum d'homogénéité intrinsèque). A chacune de ces unités est assignée une densité moyenne d'enjeux et de là un taux d'endommagement moyen pour chacune d'entre elles. Le partage du territoire est le résultat du croisement de plusieurs types de documents et d'informations (plans d'occupation des sols, cartes communales, documents cadastraux photos aériennes, enquêtes de terrain, etc.). Du fait de sa forte hétérogénéité, l'application de l'approche zonale en milieu urbain reste une tâche difficile (Sageri, 1987) ; 3) *approche par agents* : il s'agit d'établir dans un premier temps une typologie très fine des enjeux présents sur un territoire donné puis, dans un second temps, d'associer un taux d'endommagement à chaque type d'enjeux. Ce qui pose problème dans cette approche est la multitude de typologies d'agents présents dans la littérature, car selon la formation de l'auteur (politicien, urbaniste, économiste ...) les classes d'enjeux formées diffèrent (Devaux-Ros, 1999 ; Hubert et Ledoux, 1999 ; Barroca *et al.*, 2008).

A l'échelle du bassin Méditerranéen, un nombre important de projets d'appréhension du risque hydrométéorologique s'est basé sur des outils de simulation numériques. Ces projets varient entre travaux généralistes, souvent à caractère interdisciplinaire, menés à grande échelle spatiale, et des travaux spécialisés qui ciblent un seul aspect de la problématique. Selon leur extension spatiale, ils peuvent être classés en :

- *Programmes départementaux ou régionaux* : le projet Rive « *Risques d'Inondations en Ville et Évaluation des Scénarios* » piloté par le CEMAGREF et mené en partenariat avec le CETE méditerranée, le CETMEF, le LCPC, Hydrosociétés Montpellier et le LMF de Lyon ; le projet CPER Rhône-Alpes (1989-1994) dont l'objectif principal était le développement de modèle de simulation numérique spécialisé, qui prennent en compte les singularités rencontrées à l'occasion de l'étude morphologique du Danube et de l'Isar ; le projet de recherche « *Gestion du risque d'inondation dans les deux bassins versants de Fès et Beni Mellal au Maroc* » grâce auquel une première cartographie des risques d'inondation était établie en cette

région. Il s'agit d'un travail de collaboration entre le Laboratoire d'analyses géo-environnementales et aménagement (LAGEA), la Faculté des lettres et des sciences humaines de Fès et l'Institut de géographie de l'université de Lausanne.

- *D'autres projets ont eu une dimension nationale*, tels : la plate-forme nationale « *Dangers naturels* » *PLANAT* créée par le Conseil fédéral Suisse en 1997 dans le but d'améliorer la sécurité face aux risques naturels. Le projet national RIO 2 – Inondations « *Prédétermination multifractale des précipitations et des crues* » qui s'inscrit dans le volet « *Connaissance de l'aléa* » du grand programme de RIO (2) ; dans ce projet, les précipitations et les crues dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RMC) ont été prédéterminés *via* les méthodes multifractales.

- *Certains programmes prennent une dimension internationale* : ce sont des projets développés principalement dans le but d'assurer le recensement puis la coordination entre les différents travaux de recherche menés à différentes échelles spatiales par divers bureaux de recherches (nationale, régionale ou locale), une collaboration qui garantit un maximum de transfert d'informations et de savoir-faire déjà acquis. De nombreux projets à dimension internationale ont été montés à l'échelle du bassin méditerranéen : l'*ERA-NET CRUE*, dans lequel collaborent 11 pays européens (Allemagne, Angleterre, Autriche, Ecosse, Espagne, Finlande, Flandres, France, Irlande, Italie, Pays-Bas) avec un budget de 1,9 millions d'euros réparti entre 2008 et 2011. Le projet *ERA-NET CRUE* comprend de nombreux sous-projets : *RISK MAP*, *SUFRI*, *IMRA*, *FREEMAN*, *DIANE-CM*, *FIM FRAME*, *UR-FLOOD* ; on trouve également à l'échelle internationale le projet : *Stratégie internationale de prévention des catastrophes naturelles (SIPC)* financé par l'ONU ; l'*OSIRIS-inondation* qui est un projet européen mené dans le cadre du programme IST (Information Society Technology) chargé de l'amélioration, en termes de pertinence et de disponibilité, des renseignements relatifs aux phénomènes de crue et d'inondation. Les informations qui en résultent sont destinées en premier lieu au grand public (Morel *et al.*, 2005). Le projet intitulé *Evaluation de la vulnérabilité des villes côtières d'Afrique du Nord face au changement climatique et aux désastres naturels*, financé par la Banque Mondiale et concernant plus particulièrement les villes de la région du Grand Casablanca et de la vallée du Bouregreg au Maroc, de la région du Grand Alger en Algérie et de la ville de Sfax en Tunisie, a fait l'objet d'une analyse poussée. Un projet qui a mis en évidence dans les trois métropoles maghrébines que le risque de crue et d'inondation arrivait en tête des risques naturels dans ces régions.

Une bonne partie des travaux cités ci-dessus relève des disciplines physiques (météorologie, hydrologie et hydraulique) qui ont comme finalité la caractérisation de l'aléa. Les travaux sectoriels se sont ainsi développés au détriment des travaux interdisciplinaires qui eux analysent simultanément les deux volets du risque, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, créant ainsi un réel déséquilibre entre ces deux derniers en matière de niveau d'avancement scientifique : disponibilité d'informations, de connaissances scientifiques et de maîtrise des techniques d'analyse, efficacité d'intervention et de gestion. Un déséquilibre qui peut être expliqué par le fait que les travaux et les projets de recherche visant à étudier la vulnérabilité sont en grande partie financés par le secteur public et les ministères concernés (écologie, environnement, urbanisme, aménagement...) ; dans certains cas, ils peuvent être financés également par les autorités collectivités locales (communales, départementales). Le secteur de l'industrie

n'intervient pratiquement jamais dans le financement des travaux sur la vulnérabilité, vu que ces derniers aboutissent rarement à des brevets, et c'est bien à cela qui s'intéresse en premier lieu les industriels.

Le choix de la zone d'étude

En exploitant la bibliographie, on s'aperçoit rapidement qu'auparavant, les inondations qui se caractérisent par une extension spatio-temporelle réduite (petits bassins versants), ont été souvent délaissées par les programmes de recherche qui se concentraient préférentiellement sur des grandes plaines inondables. Les bassins versants de taille réduite sont également non jaugés et font rarement l'objet de travaux de prévision. Actuellement, la situation telle que décrite ci-dessus est en train de changer et une réelle prise de conscience concerne la dimension désastreuse que prend souvent un aléa météorologique de caractère intense quand il s'abat sur des petits bassins versants urbanisés. Selon Hubert (1999), la grande partie des zones inondables est située dans des bassins versants à petite taille, où la cause principale des inondations est le ruissellement pluvial et non le débordement du lit mineur. Selon les statistiques sur les inondations catastrophiques, les pertes les plus tragiques en vies humaines sont observées en milieu urbain (Mitchell, 1995) sachant qu'aujourd'hui, la moitié de la population mondiale habite en ville. Le milieu urbain présente donc un espace où les interactions Homme-milieu sont renforcées et dans lequel la vulnérabilité atteint souvent son paroxysme.

Dans le bassin méditerranéen, la trajectoire du développement des métropoles entre les pays de la rive nord et celles de la rive sud est très différente, même si dans la structure générale de certaines villes, une ressemblance apparente peut être relevée, tel est le cas de la ville d'Alger et la ville de Marseille par exemple. En réalité, et en terme de cadre environnemental et de qualité de vie, la différence est frappante, et la différence en terme de hauteur et de nature des dégâts observée de part et d'autre du bassin méditerranéen suite à un événement météorologique d'intensité comparable illustre bien cela. On compte un total de 4250 morts causés par des événements de crue et d'inondation dans le bassin méditerranéen, dont 3820 morts ont été enregistrés dans les pays sous-développés de l'est et du sud. Les dégâts matériels quant à eux sont plutôt importants dans les pays du nord, avec plus de 21400 milliards d'euros ; cela est expliqué par la nature des enjeux économiques, qui sont beaucoup plus importants dans les métropoles des pays développés que dans celles des pays en voie de développement. D'une manière générale, cette dichotomie est liée aux : niveaux de résilience, mode de gestion de crises, enjeux environnementaux, enjeux socio-économiques, gestion et politique d'aménagement du territoire, maturité législative.

La partie ouest de la région du Grand Alger, qui occupe un massif appelé *Massif de Bouzaréah*, a été victime le 10 novembre 2001 d'une catastrophe hydrométéorologique de premier ordre. Une catastrophe qui a marqué à la fois la mémoire des métropoles du bassin méditerranéen et toute la population algérienne, dont le deuil a été national. Le bilan de dégâts occasionnés par cet événement a été très lourd sur tous les plans : les pertes en vies humaines ont été sans précédent dans le bassin méditerranéen (780 morts et 350 disparus) ; de considérables dégâts matériels (environ 3721 immeubles et la plupart des infrastructures ont été détruits ou endommagés), dont le coût total s'élève à plus de 5 milliards de dinars algérien (DZD ; soit 220 millions d'euros).

Le Massif de Bouzaréah, par sa situation au bord de la Méditerranée, s'inscrit dans un climat cyclogénétique, connu pour ces événements météorologiques brutaux de forte intensité et de courte durée. Le massif est constitué d'un socle métamorphique relativement imperméable, favorisant ainsi la génération d'écoulements de type hortonien (Benseddik et Djabri, 2003). L'orographie quant à elle est très favorable à la formation des crues et des écoulements surfaciques rapides dans certaines unités hydrographiques (sous-bassins versants Côtiers, bassin-versant de l'Oued Koriche). Les caractéristiques météorologiques et physiographiques, telles que décrites ci-dessus, présentent un contexte favorable à la génération de réponses hydrologiques efficaces, caractérisées par des courts temps de réponse (inférieurs à 1 h) et de forts débits de pointe (730 m³/s en 2001 ; Behlouli, 2001).

A cette prédisposition naturelle à la génération des crues que présente le Massif de Bouzaréah vient se rajouter un nombre important de facteurs anthropiques qui ne cessent d'accroître la vulnérabilité du terrain. L'ensemble de ces facteurs est lié, d'une manière ou d'une autre, à une croissance explosive d'un tissu urbain exubérant, anarchique et non contrôlé (Menad *et al.*, 2011). A l'image d'Alger, toutes les villes algériennes connaissent une période de mutation urbaine, dont la population agglomérée est passée de 61,2 % en 1977 à 84,8 % en 2008 (Boudaqa, 2007). L'organisation de l'urbanisme en Algérie c'est faite *via* une série de plans qui se sont succédés dans le temps, le premier était le Plan d'Organisation Général (POG) édité en 1975, puis en 1980 il y a eu le Plan d'Organisation Général (POG), enfin en 1995, le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU). Le Grand Projet Urbain (GPU) est monté en 1996, spécialement pour assurer le développement territorial général d'Alger en aménageant la ville de manière à lui rendre sa fonctionnalité de capitale de pays. A l'échelle nationale, l'urbanisme est encadré actuellement par le PDAU qui a comme objectif de définir grossièrement les grandes lignes de la politique d'aménagement et de la répartition territoriale. Le PDAU est affiné par les Plans d'Occupation du Sol (POS), plans cadastraux établis à l'échelle du quartier. Ces deux instruments sont qualifiés par les urbanistes algériens d'approximatifs, non actualisés et, au jour d'aujourd'hui, en totale déconnexion avec la réalité du terrain. Le PDAU et le POS ont été réalisés à partir d'une base de données (documents cadastraux et photos aériennes) datant des années 70. A titre d'exemple, plusieurs zones, du Grand Alger sont définies par le PDAU comme zones agricoles alors qu'elles sont devenues actuellement des zones urbanisées ; tel est le cas de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri et de certaines parties de la commune d'Hydra, ainsi que de nombreux autres communes de la wilaya d'Alger.

En plus du problème de leur mise à jour, ces plans, à savoir le PDAU et le POS, qui présentent l'unique support de gestion du territoire en Algérie, sont des documents bruts qui ne dépassent guère la simple représentation spatiale, et qui n'intègrent aucune approche socio-économique. Tenant compte de tout cela, on peut conclure que les villes algériennes se développent sans une réelle politique de gestion du territoire, et c'est l'anarchie totale qui gouverne les pratiques sur le terrain, mettant ainsi en danger les habitants, leur environnement, leurs biens, ainsi que l'ensemble des infrastructures publiques. Selon le Pr Boudaqa, la capitale algérienne présente un état catastrophique en matière d'urbanisation et de gestion urbaine, en particulier d'un point de vue législatif : *Comment peut-on continuer de nos jours à mener des politiques de gestion du territoire sans y intégrer les probables risques encourus ? Il est*

indispensable d'actualiser les PDAU et donc les POS et de compléter ces plans par des informations d'ordre socioéconomique, et leur intégrer des informations concernant les risques majeurs encourus.

Le premier discours politique concernant la protection contre les risques majeurs est apparu en 1985. Depuis, la législation s'est développée très lentement et il a fallu attendre 2004 pour qu'une vraie loi concernant la gestion préventive du risque majeur voit le jour (loi n° 04-20). Ainsi, en matière de gestion durable du territoire, l'Algérie est en retard par rapport aux pays développés, tel la France, où l'on dispose de plusieurs types de plans de prévention réalisés à différentes échelles spatiales (du national au local) : les Plans d'Exposition aux Risques (PER), qui ont été suivis par le Plan de Prévention des Risques (PPR), les plans communaux de sauvegardes (PCS). L'Algérie est même en retard par rapport à certains de ses voisins. A titre d'exemple, on cite la Tunisie où la législation concernant la gestion des catastrophes est en cours d'élaboration. On trouve à la fois des articles qui organisent le travail préventif, à travers l'établissement d'une stratégie générale de lutte contre les différentes formes de risques majeurs, et de stratégies détaillées permettant une gestion efficace et instantanée d'une crise ponctuelle.

La volonté politique pour instaurer et vulgariser une culture sociale du risque est aussi absente, et la population algérienne n'a pas accès aux moindres documents ou informations concernant le risque encouru.

Objectif de la thèse et orientation méthodologique

En Algérie, le risque hydrométéorologique reste méconnu sur l'ensemble du territoire algérien, aucun plan de prévention n'ayant été établi. Concernant cette problématique, tout reste à faire : identification, analyse et gestion des zones à risque.

Au cours de ce travail, on a fait le choix d'étudier en particulier les *phénomènes de crue et de ruissellement superficiel déclenchés par des événements météorologiques à caractère intense, dans l'ouest du grand Alger (Massif de Bouzaréah)*. Pour parvenir à cela, trois grandes étapes, aux objectifs spécifiques, ont été fixées.

1. Montage d'une base de données en utilisant des documents facilement accessibles (gratuit ou à prix symbolique) et disponibles pour l'ensemble des villes du nord algérien (voire des villes du bassin méditerranéen), afin de pouvoir caractériser le risque hydrométéorologique via une analyse systémique.

L'événement météorologique du 10 novembre 2001 a mis en évidence la forte vulnérabilité que présentent les métropoles du nord algérien envers ce type d'aléa. A l'image du contexte climatique, structural et socio-économique de la ville d'Alger existent plusieurs autres villes en Algérie qui encourent le même niveau de risque. Le jour où ces dernières seront frappées par un aléa météorologique comparable à celui du 9-10 novembre 2001, la hauteur des dégâts sera, sans doute, semblable à celle constatée à Alger. D'où l'intérêt de mener une analyse à caractère *systémique* afin de hiérarchiser et de caractériser l'ensemble de facteurs impliqués dans la génération du risque hydrométéorologique dans un contexte typique d'une métropole du nord algérien.

L'analyse systémique nécessite la manœuvre d'une base de données volumineuse, dont chacune des composantes doit être vérifiée ou acquise avec le plus haut niveau de fiabilité possible. Dans notre cas se présentait un challenge autre que celui de la densité des données à manipuler, du fait qu'on est en train de développer une démarche d'analyse généraliste, il est nécessaire que les données utilisées dans les différentes étapes de l'étude doivent être *disponibles et accessibles pour l'ensemble des villes du nord algérien*. Un choix fait dans le souci de fournir à la fin de cette étude *un manuel dressant les grandes lignes de la prise en charge d'un aléa hydrométéorologique. Ce manuel doit pouvoir être appliqué sur les autres villes algériennes qui encourent le même type de risque*.

Une base de données qui réponde aux exigences citées ci-dessus n'existe pas actuellement ; pour monter cette dernière un gros travail de collecte et de génération de la donnée s'est imposé. Un nombre des données existantes déjà dans certaines administrations mais qui sont inaccessibles comme c'est le cas du Modèle Numérique du Terrain (MNT) à pas de 5 m (l'administration adopte une politique de la rétention de l'information). Le peu de données disponibles sont souvent non actualisées comme dans le cas des POS, d'autres présentent des anomalies. Pour toutes ces raisons, on a fait le choix de travailler avec des documents bruts, facilement accessibles et disponibles pour l'ensemble des métropoles du nord algérien, des documents à partir desquels on a développé notre propre base de données : 1) *les cartes topographiques*, documents de base à l'élaboration des MNT ; 2) *les images satellitaires, les images Google Earth* utilisées dans la reproduction de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique territoriale ; 3) pour implémenter les simulations hydrologiques, des *épisodes pluvieux* ont été reproduits à une échelle spatio-temporelle fine.

La base de données est présentée en totalité sous forme numérique et est manipulée dans des SIG. Le montage et l'alimentation d'une telle base de données nécessitent des connaissances et des compétences d'ordre interdisciplinaire (sciences physiques, sciences sociales, enquêtes et travail de terrain, outils SIG, outils de traitement d'images...).

2. Mécanismes et lois d'interaction entre l'ensemble des composantes de l'hydrosystème

La mise en jeu des différentes composantes de l'hydrosystème, à savoir les facteurs météorologiques, physiographiques et les facteurs de vulnérabilité, est assurée par des outils de simulation hydrologique (automate cellulaire *RuiCells*). Cette mise en jeu nous a permis : 1) d'identifier les mécanismes qui contrôlent les interactions entre les différents facteurs productifs de la réponse hydrologique ; 2) d'évaluer le poids causal de chacun de ces facteurs dans la genèse de la catastrophe afin de mener le plus efficacement possible la démarche de réduction du risque ; 3) de pouvoir pour la première fois quantifier l'impact de l'emprise urbaine (tant évoquée comme facteur aggravant des dégâts observés le 10 novembre 2001), sur l'évolution de la réponse hydrologique à l'échelle du bassin-versant.

3. Cartographie et gestion du risque

Les résultats obtenus sont présentés *via* des outils de SIG (logiciel ArcGis) sous forme cartographique. A la fin de l'analyse systémique (analyse climatique, météorologique, structurale, sociale, simulation numérique), la problématique du risque hydrométéorologique à Alger

a été bien identifiée, définie et évaluée. A la lumière des résultats des différentes analyses et des documents cartographiques produits, des mesures d'intervention (structurelle, non structurelle) sont proposées, assurant ainsi un premier pas vers une approche de caractérisation et d'évaluation du risque hydrométéorologique dans cette région. Une approche pensée avec l'ambition de pouvoir l'appliquer à l'ensemble des métropoles du nord algérien.

Structure de la thèse

Afin d'atteindre les objectifs cités ci-dessus, la thèse est structurée en trois grandes parties :

La première partie intitulée : Le risque hydrologique généré par des épisodes météorologique de caractère intense en métropole méditerranéenne. Cette partie est divisée en deux chapitres.

Chapitre 1. Précision terminologique : ce premier chapitre dresse le cadre conceptuel général de notre problématique, en commençant par définir les termes clés impliqués dans la problématique des risques hydrométéorologiques (aléa, vulnérabilité, gestion), puis spécifiant plus en détail les aspects analysés prioritairement dans ce travail.

Chapitre 2. Paramètres et mécanismes de genèse du risque hydrométéorologique : ce chapitre explique le fonctionnement hydrologique global d'un bassin-versant, les facteurs et les mécanismes de formation des crues et du ruissellement superficiel ainsi que leurs principaux régimes d'écoulement. A la fin sont présentées les particularités de la réponse hydrologique en milieu urbain.

La deuxième partie intitulée : Les acquis sur le risque hydrométéorologique à Alger. Cette partie est également subdivisée en deux chapitres.

Chapitre 3. Contexte sociétal du risque hydrométéorologique à Alger : la première partie du chapitre 3 restitue l'histoire du développement urbain (architectural et législatif) de la ville d'Alger. La deuxième partie et *via* un travail de photo-interprétation et de traitement numérique d'images satellitaires, la dynamique de l'occupation du sol entre 1960 et 2011 est reproduite et présentée sous forme cartographique (1960, 1986 et 2011).

Chapitre 4. Contexte physique du risque hydrométéorologique à Alger : caractérisation et intérêt de l'étude. La première partie du chapitre 4 analyse les caractéristiques structurale et climatique de la région dont fait partie le Massif de Bouzaréah. Cette analyse est étoffée par la deuxième partie où le contexte géologique, géomorphologique, climatique et hydrologique sont étudiés à l'échelle du Massif de Bouzaréah.

La troisième partie intitulée : contribution de la thèse à l'étude du risque hydrométéorologique à Alger.

Chapitre 5. Détermination et choix des événements de référence : ce chapitre argumente dans un premier temps le choix de l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 comme événement de référence. Puis il explique sa cinématique, décrit la configuration météorologique à l'origine de son déclenchement ainsi que la réponse hydrologique

qui en résulte. A la fin du chapitre, les impacts socio-économiques et politiques de l'événement de référence sont exposés.

Chapitre 6. Simulation numérique : ce chapitre évalue le risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah *via* l'automate cellulaire *Ruicells*. La première partie de ce chapitre présente une initiation à l'outil de simulation hydrologique *Ruicells*. En ce servant de cet outil de simulation, une évaluation de l'efficacité du système morphologique dans la réponse hydrologique en tout point du Massif de Bouzaréah est réalisée. A la fin du chapitre, l'impact de l'emprise urbaine sur l'évolution de la réponse hydrologique est évalué grâce à une simulation dynamique des écoulements en intégrant le paramètre d'occupation du sol.

Chapitre 7. Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : dans ce chapitre et grâce à une analyse systémique, les facteurs de prédisposition, de déclenchement et d'aggravation des crues et de ruissellements superficiels sont identifiés et hiérarchisés. Le chapitre a permis d'effectuer, en plus, une synthèse des différentes analyses et traitements réalisés dans les chapitres précédents.

Chapitre 8. Cartographie et gestion du risque des crues et de ruissellements superficiels dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. La première partie du chapitre présente une démarche vers une cartographie du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. La deuxième partie termine sur une approche tournée vers une gestion intégrée et préventive du risque à l'échelle du bassin-versant voire du sous-bassin-versant.

Première partie
Le risque hydrologique généré par des épisodes météorologiques
de caractère intense en métropole méditerranéenne

Introduction de la première partie

Chapitre 1. Précision terminologique

Chapitre 2. Paramètres et mécanismes de genèse du risque hydrométéorologique

Synthèse de la première partie

Introduction de la première partie

Cette première partie est consacrée à la restitution, dans un cadre conceptuel général, de la problématique : *le risque hydrologique généré par des épisodes météorologique de caractère intense en métropole méditerranéenne*. Dans un premier temps, les sens des différents concepts impliqués dans cette étude (aléa, vulnérabilité, risque), sont expliqués *via* une démarche diachronique qui permet de mieux comprendre le contexte contemporain dans lequel le risque est appréhendé. Ensuite, les concepts sont précisés tels qu'ils sont entendus dans ce travail. Cette démarche est d'une grande importance du fait qu'elle permet de dresser les grandes lignes des orientations idéologiques, en particulier en ce qui concerne les techniques d'interventions (structurales ou non structurales) et politique de gestion, adaptées dans ce travail.

Dans un second temps, les facteurs et les mécanismes de génération de crues et de ruissellements superficiels ainsi que leur complexité spatio-temporelle, sont étudiés à l'échelle du bassin-versant. Tenant compte de la nature de terrain (bassin-versant urbanisé) et des phénomènes météorologiques (événements à caractère intense), prise en charge dans ce travail deux sortes de phénomènes hydrologiques seront préférentiellement étudiés : 1) l'écoulement rapide de crue (ERC) et sa circulation au sein du réseau hydrographique et 2) la circulation des eaux en surface et en dehors du réseau hydrographique. On fini cette partie, par une précision des spécificités que présentent le comportement hydrologique dans le milieu urbain, des spécificités majoritairement liées à une large anthropisation aux conséquences difficilement prévisibles.

Chapitre 1

Précision terminologique concernant le risque en milieu urbain

Introduction

- 1.1. Conceptualisation du risque
- 1.2. Risque de crue et d'inondation
- 1.3. Gestion du risque

Conclusion du chapitre 1

Introduction

Ce premier chapitre est consacré à la définition des concepts clés intervenant dans la problématique des risques hydrométéorologiques. Dans un premier temps, les concepts vont être définis dans un contexte général puis étoffés dans un second temps pour permettre de dresser le cadre terminologique précis, en spécifiant les aspects de la problématique qui vont être pris en charge au sein de ce travail.

Certes le but de notre travail n'est pas étymologique ni historique mais relève de la géographie physique. Cependant, on a fait le choix d'étendre notre étude conceptuelle en restituant les origines et l'évolution spatio-temporelle des différents concepts dans le but de mieux comprendre le contexte contemporain dans lequel le risque est appréhendé. Une démarche d'apparence anodine, souvent effectuée dans le simple but de préciser les termes impliqués, mais qui, en réalité, a une grande influence sur les orientations idéologiques (inscription dans une école de pensée), en particulier en termes d'outils d'intervention et de politique de gestion adaptée.

1.1. Conceptualisation du risque

De nos jours, le risque est devenu une composante intrinsèque de la société (on parle de « sociétés à risque ») qui est de plus en plus exigeante en matière de sécurité et qui accepte peu ou pas l'existence de toutes formes de risque (du moins dans les pays riches).

Avant de définir le concept du risque, il est nécessaire de restituer brièvement le contexte spatio-temporel de son apparition dans le but de mieux comprendre sa perception actuelle.

Selon Dervaux (1983), le mot risque vient de l'italien *risco*. Au XVI^e siècle, ce mot a été présent dans deux domaines, l'un maritime où il signifie « danger lié à une entreprise », et l'autre militaire où il désigne « la chance ou la malchance d'un soldat ». En revanche, Galland (1998) nie toute relation étymologique entre le risque et le monde maritime. Glatron (2003) et Veyret (2004) relie l'apparition de ce concept à la naissance du système d'assurances vers la fin du XIV^e siècle. Un système conçu par les marchands-banquiers italiens garantissant les marchandises sur leur trajet contre une prime versée par l'armateur.

Il existe plusieurs autres avis sur l'origine du terme « risque ». Certains disent qu'il existait au sein de toutes les langues européennes (anglais : *risk* ; italien : *rischio* ; espagnol : *ri-za*), il ne peut donc provenir que du latin *resicare* ou bien du grec *rhisikon* qui lui-même provient d'un mot arabe *risk* qui désigne « ration d'une entrée donnée ». En langue française, le terme risque signifiait au début « hasard », avec ses deux figures « heureux » et « malheureux ». A l'époque, le risque et la fortune avaient la même signification. Plus tard, avec l'émergence du mot « chance », ayant pour définition « un événement hasardeux heureux », le risque sera le « hasard malheureux ». Le terme « risque » tel qu'on le connaît actuellement est utilisé depuis 1657 alors qu'il a été employé comme un verbe, « se risquer », dès 1577 et « risquer » à partir de 1596.

Au-delà du nom utilisé (fléau, calamité, peur, menace, danger, etc.), le risque a été omniprésent au sein des différentes civilisations du passé. Classiquement, son histoire d'évolution est répartie en trois périodes distinctes :

1) Au sein des civilisations de l'antiquité, la survenance d'une catastrophe signifie une punition divine, un châtement ou encore une force étrange surnaturelle envers laquelle l'Homme est entièrement impuissant. Un peu plus tard, et tout en gardant ce sentiment d'impuissance, la catastrophe n'est plus considérée comme un châtement, mais plutôt comme un produit du hasard de la nature.

2) Avec les évolutions de la science, les phénomènes naturels sont analysés et expliqués dans un cadre rationnel, ce qui permet par la suite de réagir en tentant de diminuer (*mitigate* en anglais) le caractère destructif de ces phénomènes.

3) Dans les années 1980, à cause de la forte médiatisation des problèmes environnementaux et des dangers des installations industrielles, cette prise de conscience a conduit au passage de sociétés industrielles aux sociétés à risque, dans laquelle le risque est omniprésent et prend parfois une dimension globale, tel le réchauffement climatique. C'est à cette époque que la science « cindynique » émerge et se développe. Cette dernière a été menée par des spécialistes dit « techniciens du risque » avec un « fantasme scientifique » de pouvoir éliminer le risque (Beck, 1996). Dans les années 1990, l'approche « cindynique » laisse place à la gestion des risques, fondée sur l'idée que la notion du risque zéro est irréaliste, où seule une gestion de « risque résiduel » est possible (Lascoumes, 1996). L'inscription profonde du risque dans son territoire d'émergence rend son élimination très difficile voire impossible, et on observe par la suite plusieurs catégories de risque se succédant sur le territoire et dans les politiques du risque qui l'accompagnent (Theys et Fabiani, 1987).

1.1.1. L'histoire récente du risque

Actuellement, plusieurs approches saisissent le risque comme un « système articulant des pratiques de gestion », appelé également « mise en risque », dans lesquelles les pratiques et les outils d'intervention diffèrent selon les acteurs et les espaces concernés.

D'une manière générale, l'histoire récente du concept risque peut être répartie en trois périodes principales :

Au cours de la première période, les modes de gestion mis en place sont choisis uniquement par les deux acteurs du territoire, les politiciens et les experts. A ce niveau, on est dans le cadre d'une politique basée sur les connaissances techniques, dans laquelle la gestion du risque est perçue comme un objet maîtrisable.

La seconde période est marquée par l'implication de la société civile dans le débat de la gestion territoriale du risque. La société est alors perçue comme un facteur de pression sur les gestionnaires, exigeant des niveaux de sécurité de plus en plus importants.

Le temps actuel représente la troisième période de l'histoire récente du risque, caractérisée par une forte disponibilité et une souple accessibilité aux informations liées aux risques encourus par la société. Cette période est également marquée par une grande divergence dans

la manière d'appréhender le risque par les différents acteurs du territoire, chacun d'entre eux défendant ces intérêts souvent au détriment de ceux des autres. Pouvoir *de facto* proposer une stratégie d'intervention mettant l'ensemble de ces acteurs en accord est loin d'être une tâche facile, du fait de l'ampleur et de la complexité des liens existant entre les acteurs (intérêts et motivations variés voire contradictoires). Ce dernier point est actuellement au cœur de tous les débats sur la mise en œuvre des stratégies de gestion intégrée du risque.

1.1.2. Concept du risque en géographie

L'exercice de retracer l'évolution épistémologique du concept de *risque* en géographie est un exercice difficile et les travaux qui se sont préoccupés de cet aspect restent très rares. Néanmoins, Hewith (1997) a essayé d'analyser l'évolution conceptuelle du risque en géographie, remontant jusqu'aux géographes de l'antiquité Strabon et Hippocrate pour démontrer que le concept de risque en géographie est très ancien (cf. *supra*).

En tenant compte de l'étroite relation existant entre le risque et le territoire, on peut dire que la problématique du risque est fondamentalement géographique. L'émergence de la nouvelle tendance « territorialité du risque », passant de la classification du risque selon leur nature à leur catégorisation selon leur « mode de répartition dans l'espace » (risque diffus, risque focalisé, risque global, etc.) renforce cette hypothèse. Novembre (1994) émet une autre hypothèse, à savoir que « *le risque est une composante intrinsèque du territoire, qui a une (ou des) logique(s) spatiale(s)* ». Pour mettre en évidence cette relation, il est nécessaire de développer les dimensions empirique et épistémologique du risque.

1.1.3. Les définitions contemporaines du risque

Le risque peut avoir diverses définitions selon la discipline dans laquelle il est enseigné.

En *géographie*, le risque est défini comme « *un danger éventuel, plus ou moins prévisible, dans une aire non précisément définie et d'une durée indéterminée* » (Bailly et Béguin, 1996). Pigeon (1994) quant à lui définit le risque comme « *une probabilité d'occurrence d'un dommage compte tenu de la conjonction spatiale d'un danger et de la présence humaine* ». Texier (2009) propose d'appréhender le risque « *dans un cadre conceptuel d'analyse de la vulnérabilité globale, c'est-à-dire intégrant tous les facteurs (socio-économiques, politiques, culturels) formant un système de contraintes qui agit de manière différentielle sur un territoire, sur les comportements des populations menacées au quotidien. L'aléa naturel devient alors un aléa parmi de nombreux autres* ».

En *philosophie*, le mot risque exprime l'espoir de s'améliorer, comme il l'explique Bernanos : « *Le monde n'est pas au vicieux comme se l'imaginent les chastetés torturées. Le monde est au Risque. Il y a là de quoi faire éclater de rire les Sages dont la morale est celle de l'épargne. Mais s'ils ne risquent rien eux-mêmes, ils vivent du risque des autres... Le Monde est au risque, le Monde sera demain à qui risquera le plus, prendra plus fermement son risque* » (Dervaux, 1983). Une conception partagée par Condillac (1982) : « *Le risque est le hasard d'encourir un mal, avec espérance, si nous y échappons, d'obtenir un bien* ».

En sociologie, le risque est considéré comme un événement endommageable (maladies, chômage, invalidité, etc.), dont les systèmes de sécurité sociale ont comme mission de le réparer. Coanus et Perouse (2006) définissent le risque en sociologie comme « *la présentation d'un danger donné, non encore latéralisé bien qu'étant survenu auparavant. Et gérer un risque, dans cette optique, c'est repérer un danger, et donc entre autres choses de le définir, en fonction des savoirs, voire des croyances disponibles ; anticiper son occurrence, c'est-à-dire opérer dans le temps une projection mentale ; prévenir son occurrence, en effectuant un certain nombre d'action, individuelles et ou collectives* ». En sociologie et au contraire de la philosophie, la vision positive du risque disparaît.

L'économie constitue un domaine où le risque est omniprésent, dans un contexte mondial où les acteurs économiques sont au premier rang. Selon Bost (2002), « *par définition, toute activité économique est sous-tendue par une prise de risque plus ou moins calculée et intégrée dans une stratégie générale* ». Certes la prise de risque peut avoir, dans certains cas, des conséquences néfastes sur l'entreprise, mais c'est à l'origine de tout grand succès. A ce niveau, l'enjeu est de bien mesurer le risque et de prendre la bonne décision au bon moment en tenant compte de l'environnement extérieur de l'entreprise (Lemaire, 1997).

Les statistiques, sont au cœur de cette problématique. Les probabilités jouent un rôle décisif en matière de prise (ou pas) de risque, d'où l'intérêt d'exiger la plus haute fiabilité au niveau des bases de données à partir desquelles les informations statistiques sont estimées. Selon Veltcheff (1996), « *Ces nuances pourraient se trouver matérialisées le long d'un axe qui aurait pour origine la valeur la plus proche de l'étymologie, le danger, et qui aurait pour valeur limite, valeur la plus éloignée, l'inconvénient, sachant que toutes les nuances intermédiaires sont possibles* ».

En droit le risque est appréhendé comme étant « *l'éventualité d'un événement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage. Par extension, [c'est un] événement contre la survenance duquel on s'assure* » (Glatron, 2003).

Au delà des définitions disciplinaires, la définition la plus courante du risque reste celle qui définit le risque comme une confrontation aléa-vulnérabilité (Fournier, 1979; Barroca, 2006). Pour compléter et reprendre certains points des définitions citées ci-dessus, on propose in tableau 1.1 une conceptualisation des différents types du risque selon la discipline dans laquelle il est appréhendé.

Tableau 1.1. Les disciplines étudiant le risque, leur cadre conceptuel et leurs méthodes d'analyse (Texier, 2009).

Disciplines	Analyse du risque	Considération de la vulnérabilité	Méthodes et outils
Sciences de la Terre (volcanologie, sismologie, hydrologie...)	Etudient l'aléa à l'origine des catastrophes considérées comme naturelles	Comme un facteur aggravant le risque ; envisagée par la perception	Technologies de pointe de surveillance des phénomènes ; Prévisions, modélisations, cartographies de l'aléa (ex. : cyclones tropicaux, Gray <i>et al.</i> , 2003 ; séismes, Murray <i>et al.</i> , 2002) ; Questionnaires de perception
Ingénierie, Architecture	Par l'aléa et ses impacts sur les enjeux matériels	Envisagée dans sa composante matérielle	Phase de conseil auprès des autorités, intervention technique de terrain (habitats parasismiques, abris de protection contre les nuées ardentes, ouvrages de protection)
Sciences sociales (sociologie, économie, psychologie, anthropologie)	Par l'entrée vulnérabilité ou gestion (Borraz, 2007) ; étudient les populations menacées ; Economistes : «possibilité de perte monétaire due à une incertitude que l'on peut quantifier »	Centrale dans leurs études, analyse complète de ses composantes matérielles et humaines	Analyses qualitatives des variables socio-économiques, culturelles, politiques et psychologiques (De Vanssay, 1994) ; études des comportements, des discours ; Analyses statistiques quantitatives (données démographiques, endommagement, coûts) ; spatialisation de la vulnérabilité ; analyses diachroniques
Géographie	Etudes intégrées des aléas et de la vulnérabilité ; Etudes multirisque	Variable	Dimension spatiale systématique ; méthodes variées, quantitatives et/ou qualitatives

1.1.4. Classification du risque

La classification du risque reste de nos jours une tâche complexe car différents types de classe ont été établis selon les échelles spatio-temporelles, l'orientation disciplinaire et la manière d'appréhender le risque. Généralement, chacune des approches présente un ou plusieurs inconvénients (cf. *infra*). Cependant, elles présentent toutes l'inconvénient d'être déconnectées les unes des autres et ne manifestent pas leurs probables effets d'interaction. Alors qu'en réalité, un même territoire peut abriter plusieurs types de risques interagissant entre eux.

La grande majorité des classifications ont été établies en se référant principalement à la source du risque. Dans notre cas d'étude (les risques hydrométéorologiques), qui s'inscrit dans la catégorie des risques *naturels*, la classification des risques est généralement basée sur une analyse des différentes formes de l'aléa. Barocca (2006), a proposé une « *classification basée sur la dualité du risque* » :

1) Types de risque selon la nature de l'aléa (logique de classification adoptée par le MEDD) : risques naturels et ouvrages hydrauliques (avalanche, séisme, inondation, cyclones, feux de forêts, etc.) ; risque technologique et transport de matières dangereuses (probable accidents nucléaires) ; pollution, qualité de l'environnement et santé, gestion des déchets, gestion des produits chimiques.

2) Types de risque selon la fréquence d'apparition (ou période de retour) : décennale, cinquantennale, centennale, millénaire, etc.

3) Type de risque selon le niveau d'endommagement, subdivisés en deux catégories : les « risques majeurs », caractérisés par une grande force destructive et une population encourageant un réel danger, et les « risques courants », dotés d'une force destructive moindre en com-

paraison avec les précédents mais les égalant en terme de coût d'endommagement étant donné qu'ils sont beaucoup plus fréquents.

4) Types de risque selon l'extension spatiale de l'aléa : ponctuel, local, régional, planétaire.

5) Types de risque selon l'origine primitive spatiale : il s'agit d'une sorte de territorialisation du risque : risque territorialisé, risque réseaux, risque diffus. Le gros inconvénient de cette approche demeure au sein des risques « mobiles », tel le transport des produits toxiques ou explosifs ou encore le risque OGM (Galland, 1998).

Les travaux ayant adopté une classification autre que celle basée sur la source du risque (ou aléa) restent rares, alors que l'on vit actuellement sur des territoires où les interactions Homme-milieux et les connexions spatiales sont de plus en plus renforcées et de plus en plus complexes (tableau 1.2). Il en va de l'intérêt de tous que d'établir une méthode de classification des risques permettant des mises en jeu du risque avec le territoire ainsi qu'avec les autres types de risque qu'abrite ce dernier.

Tableau 1.2. Mise en interaction de certain nombre de risques naturels (d'après Barroca, 2006).

Exemples d'interactivité	Risque naturel	Risque technologique	Risque social	Risque économique
Risque naturel Inondation	Eboulement de terrain	Destruction d'outils de production dans une zone inondable	Chômage technique	Mise en faillite d'entreprises locales
Risque technologique Accident T.M.D.	Pollution d'une rivière avec infiltration dans la nappe phréatique	Emanation de gaz dangereux dans l'atmosphère	Conflit entre transporteurs et population locale	Réorganisation logistique avec perte d'emplois
Risque social Violence et insécurité		Dégradation volontaire de matériel sur des sites à risque technologique		Fermeture d'entreprises locales et diminution du niveau de vie
Risque économique Fermeture d'entreprise		Friche industrielle non entretenue	Chômage de longue durée	

1.2. Risque de crue et d'inondation

Souvent, le risque de crue et d'inondation est défini comme un événement dommageable, doté d'une certaine probabilité et produit par la conjonction d'un aléa d'ordre hydro-météorologique et de la vulnérabilité sociétale. Les deux dimensions créatrices du risque évoluent dans le temps et dans l'espace.

Concernant ce type de risque, la littérature est très riche en définitions. Selon Scarwell et Laganier (2004), le risque d'inondation peut être défini comme « *un élément d'une infrastructure régionale dans la mesure où il influence le développement et l'organisation des terri-*

toires en tant que facteur limitant par les impacts passés, actuels ou potentiels des manifestations hydrologiques mais également en tant que porteur de développement en raison des effets bénéfiques que constituent les zones inondables [...]. Enfin, au-delà de sa matérialité, l'inondation est également un élément du vécu quotidien qui peut être appréhendé comme un objet perçu, interprété, médiatisé ».

Selon Lambert et Prunet (2000), le risque de crue et d'inondation peut être appréhendé comme « *un phénomène dynamique et plus ou moins paroxysmique, limité dans le temps et dans l'espace, qui se traduit par la submersion sous des eaux de crue de tout ou partie de ce territoire que représente la plaine inondable (vallée alluviale fonctionnelle)* ». Le passage de ces phénomènes laisse non seulement des empreintes sur le territoire et « griffe » l'espace géomorphologique mais marque aussi la mémoire de la population, comme l'explique Lambert et Prunet (2000) : « *cette dynamique morphogénique actuelle fait de la plaine inondable un espace géographique particulier, lieu d'une dynamique qui conditionne le modèle, le passage de la plaine, mais aussi d'une interaction intense entre dynamique des crues inondantes et activités socio-économiques forte* ». Et c'est bien cette manière d'inscrire le risque de crue et d'inondation au sein du territoire qui fait du risque une problématique fondamentalement géographique.

L'histoire du risque des inondations urbaines est fortement liée à celle de la ville. Vers 6000 av. J.-C., les premières villes sont apparues à la demande des besoins de rassemblement et d'interactions entre les populations. Les grandes civilisations se sont toujours développées près des réseaux hydrographiques (e.g., Arnaud-Fassetta et Landuré, 2003 ; Arnaud-Fassetta et al., 2003), qui constituent à la fois une source de richesse, un carrefour de communication et de transport, et un milieu propice pour éliminer les déchets domestique et industriels de la ville. Pour des besoins fonctionnels et afin d'assurer la cohérence des éléments de la ville, des réseaux routiers ont été construits souvent dans les lits des rivières naturelles, qui ont été ainsi comblés et transformés en réseau d'assainissement. L'efficacité des réseaux d'assainissement au début de leur mise en place a été très incertaine et leurs déficiences n'ont pu être repérées que plus tard, après que le territoire ait été mis à l'épreuve par des aléas hydroclimatiques plus au moins intenses.

Le risque de crue et d'inondation en milieu urbain comme tout autre risque résulte de l'interaction entre un aléa d'ordre à la fois météorologique (précipitations qui conduisent à la formation des crues et du ruissellement), hydrographique, hydrologique et hydraulique (Arnaud-Fassetta, 2009), et une vulnérabilité des zones exposées. Une bonne caractérisation de ce risque nécessite une caractérisation simultanée de ses deux composantes.

1.2.1. Conceptualisation de l'aléa

Dans son contexte général, l'aléa peut être défini comme étant un événement offensif d'une durée donnée et doté d'une probabilité d'occurrence sur un territoire (GEM Risques, 2002). Selon Gendreau (1999), l'aléa « *est une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence* ». Dauphiné (2001) propose d'assimiler l'aléa à une probabilité d'occurrence utilement complétée par une dimension spatio-temporelle.

Classiquement, l'aléa est déterminé selon trois critères : « *une magnitude (composante énergétique), une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale)* » (Beck, 2006 in Texier, 2009). Dans notre étude, l'aléa est le produit d'une réaction combinée entre l'aléa météorologique et l'aléa hydrographique-hydrologique-hydraulique (que nous appellerons ici « aléa hydrologique » par commodité et simplification).

1.2.1.1. L'aléa météorologique : magnitude, fréquence et typologie

L'aléa météorologique est souvent utilisé par les médias, les politiciens et les gestionnaires territoriaux comme argument justifiant une catastrophe, avec l'emploi de termes souvent abusifs de type « *événement météorologique exceptionnel* ». Il est donc nécessaire de bien borner les différents niveaux de l'aléa météorologique.

L'aléa météorologique (particulièrement les précipitations), représente le premier facteur déclenchant des mécanismes de crue et d'inondation. La réaction hydrologique au sein du bassin-versant est fortement influencée par la répartition spatio-temporelle de l'aléa météorologique.

A. Mécanisme de genèse des précipitations

La formation des précipitations nécessite que les masses d'air passent par un certain nombre de changements d'état, à savoir : refroidissement par détente adiabatique² ; chaleur latente de condensation et instabilité conditionnelle ; condensation ; formation des nuages (Beltrando, 2004). Les précipitations sont fortement influencées par les facteurs géographiques qui modifient les contrastes de température et de rugosité, mais elles restent toute de même imposées principalement par les conditions de la circulation atmosphérique générale.

Quels que soient les mécanismes impliqués, les précipitations sont le résultat d'une activité d'ascendance et elles sont classées en fonction des causes qui ont été à l'origine de cette ascendance. Ainsi, en fonction des processus initiateurs, les précipitations peuvent être réparties en trois catégories :

- *Précipitations convectives* : elles résultent d'un réchauffement au niveau de la surface du sol. Ce réchauffement a comme conséquence le soulèvement rapide des masses d'air vers l'atmosphère.
- *Précipitations orographiques* : comme leur nom l'indique (*oros* : montagne), ce sont des précipitations qui se produisent lorsqu'une masse d'air en mouvement franchit une barrière topographique, provoquant ainsi les premiers mouvements ascendants. En matière de production de précipitations, les mouvements ascendants ne sont pas un facteur très efficace, il s'agit plutôt d'un facteur de production indirect favorisant le développement des mouvements ascendants convectifs du fait des processus de refroidissement engendrés. Elles se ca-

² Vient du grec *adiabos* : impénétrable. Lorsqu'une masse d'air s'élève, la pression atmosphérique diminue, ce qui favorise l'augmentation du volume de la masse d'air, une détente qui va diminuer les chocs entre ces molécules et conduire ainsi à un refroidissement de cette masse d'air.

ractérisent par un stationnement sur le relief et engendrent généralement des précipitations d'intensité et de fréquence relativement régulières.

- *Précipitation frontales ou de type cyclonique* : elles résultent de la rencontre d'un front chaud avec un front froid au sein desquels les températures, les gradients thermiques verticaux, les taux d'humidité et les vitesses de déplacement sont différents. Les précipitations ont souvent lieu avant les fronts chauds et à l'arrière des fronts froids.

1.1.2.2. Caractérisation d'un événement météorologique

D'une manière générale, un épisode météorologique peut être qualifié de « courant », « rare » ou « exceptionnel ». En France, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) a opté pour la classification suivante : « aléa courant » (période de retour de 5-20 ans) ; « aléa rare » (période de retour de 50-200 ans) ; « aléa exceptionnel » (période de retour supérieure à 200 ans). Ledoux (2006) propose une répartition autre que celle adaptée par MEDD, définissant les événements « rares » et « exceptionnels » comme ceux dotés respectivement d'une période de 10-100 ans et supérieure à 100 ans.

Actuellement la fiabilité de la période de retour calculée est fortement remise en question en climatologie, et cela pour plusieurs raisons : « *La représentativité de cette évaluation par rapport à la réalité des phénomènes est liée aux choix d'analyse et de traitement statistique des observations (méthodes d'échantillonnage, ajustement sur des lits de distribution...) mais aussi et surtout de la représentativité des données par rapport aux phénomènes qui se produisent effectivement sur le terrain* » (Ledoux, 2006). Les résultats issus d'une analyse statistique sont jugés incertains étant donné que la valeur et le niveau de leur fiabilité évoluent en fonction de la fiabilité et la longueur des séries de données exploitées.

La valeur de la période de retour perd tout sens en dehors du cadre spatio-temporel dans lequel elle a été calculée, et tout travail d'extrapolation est spéculatif. A ce titre, citons l'exemple de l'épisode pluviométrique qui a frappé la ville de Nîmes en 1988, un épisode caractérisé par un cumul de précipitations de l'ordre de 400 mm relevé en 6 h avec des pics ayant varié de 50 à 150 mm/h ; selon les échelles spatiales (étendue de la zone considérée) et temporelle (la longueur de la série de donnée) considérées, différentes périodes de retour peuvent être proposées pour cet événement : en considérant la série de données d'un siècle et demi sur la pluviométrie locale, l'événement est doté d'une période de retour entre 150 et 250 ans ; si la série de données est élargie à l'échelle régionale, l'événement est dotée d'une période de retour de 100 à 180 ans ; pour une série qui englobe les données mesurées associées aux événements anciens renseignés par l'analyse historique et hydro-géomorphologique, la période de retour est de l'ordre de 60 à 120 ans.

Libeller un événement météorologique par son caractère exceptionnel pose un autre problème, celui des éléments que l'on prend en compte dans l'analyse : cumul pluviométrique, intensité, répartition spatio-temporelle, pic ? Tous ces éléments définissant le caractère de l'épisode météorologique qui va influencer fortement le type et l'intensité de la réponse hydrologique. A titre d'exemple, deux événements pluviométriques totalisant le même cumul pluviométrique mais des répartitions temporelles différentes pourront avoir des conséquences

différentes (l'un peut avoir des conséquences désastreuses, l'autre passer inaperçue) selon les caractéristiques du terrain de réception (orographie, formations superficielles, état initial).

1.2.1.2. Aléa hydrologique (pluvial et/ou fluvial)

L'étude de l'aléa hydrologique consiste principalement à comprendre les mécanismes de sa formation, de sa propagation et de leurs interactions avec les différentes composantes du milieu physique. Ceci passe par l'analyse géomorphologique, la modélisation hydraulique, le retour d'expérience, etc. Le but recherché ici n'est pas uniquement de pouvoir quantifier l'aléa mais aussi de retracer les scénarios de la survenance des événements du passé, pour mieux planifier toutes futures interventions au sein du territoire à risque.

En hydrologie, les phénomènes d'inondation et de crue ont toujours été liés. Ainsi, Salamon (1997) définit les inondations comme un « *phénomène occasionnel qui peut noyer de vastes parties du lit majeur ou de la plaine, à la suite d'une crue particulièrement importante et du débordement des eaux* ». On rappellera également la définition proposée par Ramade (1998) dans laquelle les deux phénomènes (crue, inondation) sont systématiquement liés. Roche (1986) propose la définition suivante : « *il y a inondation lorsque le cours d'eau quitte son chenal bien marqué, généralement appelé lit mineur, pour se répandre dans son lit majeur* ».

Les définitions citées ci-dessus, considèrent que le phénomène d'inondation est toujours le résultat d'un débordement de cours d'eau pendant les événements de crue, ce qui explique peut-être pourquoi la plupart des travaux d'étude de l'aléa sont réalisés avec une prise en compte quasi exclusive des phénomènes de crue. Cette approche réductrice en hydrologie pose plusieurs problèmes de gestion des événements d'ordre hydrométéorologique, en particulier lorsqu'il s'agit d'espaces déjà urbanisés.

Cosandey (2003) quant à elle considère que l'inondation englobe tous les phénomènes qui conduisent à une occupation de l'espace terrestre par l'eau. A noter, que c'est bien cette *définition qui a été adoptée par le Ministère*. Garry et Grazk (1999) proposent de définir l'aléa inondation à partir du phénomène à l'origine de son occurrence, distinguant : un débordement de cours d'eau de son lit mineur lié à une crue de débit supérieur au débit de pleins bords ; remontée de nappe phréatique ; ruissellement urbain parfois lié à la saturation du réseau d'eau pluviale ; submersion marine ; lave torrentielle.

B. Evaluation de l'aléa hydrologique (crue et ruissellement urbains)

Malgré les grandes avancées concernant l'analyse et la caractérisation de l'aléa hydrologique, aucun hydrologue ne se permettra d'évaluer cette dernière avec un chiffre absolu, toute quantification étant donnée avec un intervalle de confiance. Comme le souligne l'hydrologue Degoutte (2006), « *Le meilleur modèle ne compensera jamais la médiocrité des données ni celle de l'utilisateur. C'est toute la différence entre un modèle, toujours d'emploi assez facile et la modélisation qui s'apparente à un art délicat* ».

La notion de période de retour est largement utilisée pour caractériser les événements hydrologiques (tableau 1.3). Tout comme la période de retour d'un événement météorologique, la période de retour d'un événement hydrologique n'a de sens que dans un contexte

spatio-temporel bien défini en dehors duquel cette valeur n'a plus de sens. Une crue peut être centennale en un endroit précis du bassin-versant et n'être que cinquantennale ou décennale en un autre endroit. En plus de sa limite spatio-temporelle, la valeur de la période de retour d'un événement est très sensible au moindre changement affectant l'une ou l'autre des composantes de l'hydrosystème (modifications des formations superficielles, défrichement, modification des taux d'imperméabilité des sols, interventions au niveau du lit mineur du cours d'eau, etc.), ce qui impose des travaux de réévaluation réguliers.

Tableau 1.3. Fréquences de crue (d'après Degardin, 1996 in Ledoux, 2006).

Crue		Risque de voir la crue caractéristique atteinte ou dépassée au moins une fois		
Fréquence	Période de retour	Sur un an	Sur 30 ans	Sur 100 ans
Décennale 0,1	10 ans	10 % (1 « chance » sur 10)	96 % (soit presque « sûrement » 1 fois)	99,99 % (soit « sûrement » 1 fois)
Trentennale 0,3	30 ans	3,3 % (1 « chance » sur 30)	64 % (soit 2 « chances » sur 3)	97 % (soit presque « sûrement » 1 fois)
Centennale 0,01	100 ans	1 % (1 « chance » sur 100)	26 % (soit 1 « chance » sur 4)	63 % (soit 2 « chances » sur 3)
Millennale 0,001	1 000 ans	0,1 % (1 « chance » sur 1 000)	3 % (soit 1 « chance » sur 33)	10 % (soit 1 « chance » sur 10)

Selon Ledoux (2006), les crues cinquantennales peuvent être estimées avec un bon intervalle de confiance à partir d'une série d'observations de 150 ans. Toutes les évaluations des crues centennales relèvent du champ d'estimation probabiliste, une démarche qui est souvent critiquée dans la mesure où l'on ne dispose pas encore d'une méthode standardisée.

« Ne jamais confondre la période de retour d'un événement météorologique avec celle d'un événement hydrologique » car les deux sont rarement identiques. Le mécanisme de production d'une crue et son intensité est défini par les caractéristiques intrinsèques du bassin-versant, du cours d'eau et du contexte climatique dans lequel se trouvent ces derniers. La pluviométrie n'est qu'un facteur parmi d'autres. Au final, la réponse hydrologique résulte de réactions combinées de l'ensemble des facteurs (plus de détails concernant les enjeux d'une réponse hydrologique seront donnés dans le chapitre 2 ; cf. *infra*).

D'une manière générale, d'un point de vue technique et logistique, le contrôle et l'évaluation instantanée des crues ont atteint un niveau jugé acceptable (Ledoux, 2006). On constate que les grands oueds sont majoritairement jaugés, permettant de détecter immédiatement toute augmentation inhabituelle de leurs débits et/ou hauteurs d'eau. Les mesures instantanées donnent donc aux gestionnaires un temps suffisant pour réagir face à tout probable débordement de cours d'eau.

Le problème se pose avec acuité au niveau des phénomènes de ruissellement urbain, du fait qu'ils présentent un champ de recherches récent, mais aussi du fait de la grande multiplicité et complexité de leurs mécanismes générateurs (milieu physique, structure du tissu urbain, dynamique spatio-temporelle des enjeux, etc.). Les phénomènes de ruissellement urbain sont toujours qualifiés *de soudains*, cette impression de brutalité n'est pas seulement liée à

leur vitesse d'évolution mais aussi aux moyens de prévision et d'évaluation employés. Actuellement, il n'existe pas (ou très peu) d'outils et de structures dédiés à la surveillance des ruissellements urbains, les prévisions et les seuils de vigilance météorologique ne présentant pas une correspondance spatio-temporelle avec l'échelle de développement des ruissellements. Les structures hydrologiques (étatiques, organisations non gouvernementales ou autres) quant à elles n'ont ni les compétences, ni comme mission et surtout ne disposent pas des moyens pour produire en temps réel de l'information concernant l'évolution spatio-temporelle des phénomènes de ruissellement urbain. Néanmoins, une telle évaluation reste possible, dans une certaine mesure, grâce à l'emploi de lourds outils (e.g., radars hydrométéorologiques) à la fois très coûteux et nécessitant une main d'œuvre hautement qualifiée. A titre d'exemple, le projet RHyTMME (projet de collaboration entre Météo-France et le CEMAGREF), qui prévoit la mise en place de trois radars en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, a été cofinancé par de nombreux organismes (Météo-France : 31 % ; CEMAGREF : 17 % ; Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement : 14 % ; Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (19 %) ; Union européenne : 19 %). La grande majorité des territoires exposés au risque de ruissellement urbain jugent économiquement non rentable l'investissement de grosses sommes d'argent dans ce domaine.

1.2.2. Conceptualisation de la vulnérabilité

L'exploitation de la bibliographie montre que les définitions du concept de vulnérabilité sont nombreuses, parfois contradictoires.

D'une manière générale, l'évolution du concept de vulnérabilité peut être divisée en deux grandes périodes, la première dans laquelle la considération de la vulnérabilité se limitait aux coûts monétaires des dégâts physiques et la seconde qui commence au début des années 1990 avec un intérêt particulier accordé aux impacts indirects d'ordre social (psychologique, changement de comportement, stress...) et financier (diminution de la valeur des biens immobilier, diminution des taux d'investissement,...).

Les définitions concernant le concept de vulnérabilité peuvent être citées dans l'ordre chronologique :

- Dauphiné (2001) « à l'approche classique de la vulnérabilité, qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique (...), la vulnérabilité des sociétés à travers leurs capacités à répondre à des crises potentielles ». Ici, la vulnérabilité n'est plus estimée en post-crise, mais bien avant la survenue de la catastrophe. Ainsi, on passe d'une politique de gestion de crise et de réparation de dégâts à une politique de prévention.

- La vulnérabilité est appréhendée comme le degré de perte et de dommage causé par l'aléa. Elle est souvent étudiée dans le but de mieux comprendre la manifestation de l'aléa sur le territoire (Thouret et D'Ercole, 1996).

- Au sein de la définition adoptée par le MEDD, la vulnérabilité est assimilée au niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux (Mate, 1998).

- Une définition plus technique a été proposée par Gendreau (1999) dans laquelle la vulnérabilité correspond à « *la fragilité des installations humaines dans l'absolu. Autrement dit, cette notion s'appréciera de la même façon pour un élément donné, quels que soient sa position et le risque considéré. Elle est mesurée par une période de retour, ce qui lui confère la même dimension que l'aléa* ».

- Monachesi (2001) considère la vulnérabilité comme un facteur intrinsèque de la société, cette dernière étant en transformation permanente. Ainsi, la vulnérabilité est avant tout le produit de l'histoire évolutive d'une société donnée.

- Graillot *et al.* (2001) proposent une définition avec une vision beaucoup plus globale, basée sur une analyse multicritères qui intègre les aspects socio-économique et géographique.

- Texier (2009) classe les facteurs de vulnérabilité selon trois principaux sous-systèmes interactifs (tableau 1.4) développés initialement par Cannon (2000.).

Tableau 1.4. Classification des facteurs de vulnérabilité (Texier, 2009).

- **Le degré de préparation individuelle ou collective (sociétale).** Il correspond à la disponibilité en protections techniques et sociales et à la volonté collective de comportements de résistance et de protection. Il reflète les représentations et la perception des risques encourus par les populations, elles mêmes fonctions de nombreux facteurs tels le niveau d'éducation, l'expérience, la qualité de la politique de prévention des risques.
- **L'état sanitaire (robustesse de l'individu).** La résistance sanitaire est fonction de l'âge, du sexe et d'autres facteurs démographiques comme la mobilité, la densité de population, la résistance de l'habitat et des biens de production face à l'aléa.
- **La résilience** d'un système de moyens d'existence (ou de subsistance) individuel ou collectif. C'est la capacité du système à résister et à se reconstruire suite à l'occurrence d'un aléa. Elle reflète la robustesse économique des foyers ou communautés, elle-même fonction du niveau socio-économique, donc de l'accès aux ressources, du niveau de formation, des contraintes socio-économiques, politiques et institutionnelles, culturelles, qui créent d'autres formes de risques d'ordre quotidien. Cette définition découle de la définition initiale du mot résilience (Petit Larousse 2006) également utilisé en mécanique, et désignant « une caractéristique mécanique de résistance aux chocs d'un matériau ».

Dans cette thèse, l'analyse de la vulnérabilité se limite au sens physique du terme, faisant uniquement référence à l'exposition du territoire physique face à un Aléa. L'analyse ne portera donc ni sur la sinistralité des crues (Léone, 2003 ; Douvinet, 2010), ni sur les impacts économiques indirects (Thouret et D'Ercole, 1996), ni sur les aspects sociaux ou encore psychologiques. Ce choix a été fait en ayant conscience que certaines variables influençant fortement la gravité de la catastrophe (mobilité des personnes ; perception du risque ; comportement adopté en temps de crise ; Gaillard *et al.*, 2007 ; Ruin *et al.*, 2007 ; Barroca *et al.*, 2008 ; Rufat, 2009 ; Texier, 2009) auraient pu être considérées mais en raison de l'absence de données complètes sur le sujet, il aurait été nécessaire d'investir un temps trop important par rapport au temps de la thèse.

3.1. Gestion du risque

L'Homme a longtemps essayé d'agir face/sur le risque en élaborant des stratégies plus ou moins complexes de gestion. Au début, il s'agissait d'une gestion passive, fondée sur une transmission culturelle du risque par le biais de moyens très traditionnels (légendes, chansons, etc.). Il s'agissait d'une démarche de familiarisation des communautés avec leurs environnements (Yacou *et al.*, 1999).

Cassius (Gros, 1866 ; Cary, 1917) explique comment les crues du Nil ont servi aux paysans égyptiens pour organiser leurs cultures. Les crues n'étaient pas perçues comme un aléa dangereux mais plutôt comme un bienfait intégré à l'organisation territoriale.

Du XVII^e au XVIII^e siècle, la gestion du risque se base de plus en plus sur des connaissances et des techniques scientifiques. De nouvelles notions et théories scientifiques en la matière émergent, telle la théorie du cycle atmosphérique proposé par P. Perrault et A. Mariotte à la fin du XVII^e siècle et la diffusion de la notion de bassin hydrographique en 1752, ainsi que de nombreux écrits en géographie tel l'essai publié par P. Buache. Néanmoins, il faudra beaucoup de temps pour que ces nouveaux concepts soient réellement intégrés et concrétisés dans les modes de gestion pratiqués par la société. Les XVII^e-XVIII^e siècles sont également caractérisés par un grand nombre d'interventions de type ingénierie (gigantesques travaux d'aménagement) réalisées ponctuellement sans s'inscrire dans une gestion globale du territoire.

Un peu plus tard, d'autres préoccupations voient le jour tels les intérêts économiques, l'extension du tissu urbain, les soucis esthétiques, etc. Dans les sociétés dites démocratiques, la gestion d'un problème territorial doit forcément impliquer la société occupante, selon le *principe de participation*. La gestion devient multi-agents avec un grand nombre d'acteurs impliqués (sociologues, économistes, politiciens, experts et ingénieurs, financier...). Le challenge est de trouver un compromis entre ces différents agents du milieu pour pouvoir fixer *in fine* un seuil de risque acceptable. Cette démarche est connue sous le terme de *gouvernance*, une notion apparue pour la première fois au sommet de Rio en 1992 et largement reprise par la suite à l'échelle internationale. Dans l'analyse du risque, Wisner *et al.* (2004) jugent que « *la gouvernance dépasse le cadre d'élections libres et démocratiques, de processus de décentralisation et d'audit populaire. Elle renvoie aux relations plus larges entre un état et ses citoyens, soit l'idéologie, les valeurs et l'autorité que le premier impose aux seconds, les relations de pouvoir, les transferts de ressources et la priorité donnée à la réduction des risques et des catastrophes* ».

A l'échelle des collectivités locales, on emploie plutôt la notion de *risque acceptable*. Cette notion reste de nos jours entachée d'un flou extrême, dû principalement au manque important d'outils et de législations permettant de concrétiser les principes adoptés au niveau international. Ainsi, la considération du niveau de risque contre lequel la société veut se protéger est délivrée entièrement aux agents du milieu dont les centres d'intérêt et les priorités divergent voire se contredisent.

1.3.1. Phases et outils de la gestion

La gestion d'un problème quelconque est toujours précédée par une évaluation préalable du niveau de risque encouru, afin de convenir des actions à engager pour le réduire. Ce point pose problème dans la gestion des risques hydrométéorologiques. En réalité, pouvoir cerner avec certitude le risque maximal encouru est une tâche très difficile voire impossible dans le contexte des connaissances scientifique actuelles (météorologie, hydrographie, hydrologie et hydraulique urbaine). De ce fait, toute démarche de réduction de risque au sein de ce domaine est entachée d'un certain degré d'incertitude. L'information la plus fiable quand elle existe est celle de l'extension spatiale de la plus grande inondation connue dans le passé, une information déduite de méthodes hydrogéomorphologiques.

D'une manière générale, la gestion des risques est décomposée en plusieurs phases d'analyse et d'action. Celles-ci se succèdent dans le temps en s'organisant de façon cyclique, tout en impliquant de nombreux acteurs, de la manière suivante :

- *La prévision* : elle constitue la première étape au sein d'une démarche de gestion du risque. En France, elle repose sur la modélisation des processus de genèse de l'aléa (météorologique et hydrologique) ainsi que sur les centres de surveillance permanente opérationnels tels les services d'annonce de crues (SAC), le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations (ARAMIS ; Parent du Chatelet, 2003).
- *L'anticipation* : elle intervient en préparant les moyens d'intervention nécessaires durant une crise, dès lors que le niveau de l'aléa dépasse un certain seuil critique de probabilité d'occurrence.
- *La gestion de crise* : lorsqu'un territoire est frappé par un aléa inhabituel, une bonne gestion peut contribuer à diminuer grandement les pertes humaines et matérielles. Les principales interventions sont assurées par les services de la sécurité civile (Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS) en France (MATE, 2000) ; Services de la Protection Civile et de l'Armée Nationale Populaire (ANP ; en cas de grandes catastrophes) en Algérie.
- *La mitigation* (l'atténuation en français) : cette phase englobe tous les travaux de remise en état ou du moins de réduction des dégâts provoqués par le passage de l'événement qui vient de frapper (nettoyage, déblaiement, construction, etc.).
- *Le retour d'expérience* : il s'agit d'établir un scénario décrivant le déroulement des événements, évaluer l'efficacité des interventions au moment de la crise, la cohérence entre les différents services d'intervention, etc. Le retour d'expérience est réalisé dans le but de retirer des enseignements des événements du passé et contribuer ainsi à l'amélioration de la qualité des interventions pour de futurs événements probables.
- *La prévention* : en ayant recours aux informations fournies par le retour d'expérience, les services compétents établissent des dispositifs capables de réduire le risque encouru. En France, cette démarche prend la forme de *Plan de Prévention des Risques* (Garry, 1997).

1.3.2. Gestion du risque de crue et de ruissellement de surface en milieu urbain

La lutte contre les phénomènes de crue et de ruissellement de surface en milieu urbain est complexe du fait de la multiplicité des acteurs en jeu (Etat, experts, économistes, financiers, élus, citoyens). Ces acteurs doivent discuter ensemble des aménagements à entreprendre, des mesures qui doivent atténuer le risque sans pour autant influencer le développement socio-économique de la ville. Le défi est donc de définir un « niveau de risque acceptable » par l'ensemble des acteurs. La gestion du risque d'inondation devient alors un objet de concertation et d'acceptabilité après avoir été d'abord technique, médiatique puis politique.

Les solutions sont multiples et multiformes. En milieu urbain, les techniques de génie civil sont encore les plus favorisées, malgré l'existence de plusieurs méthodes alternatives, plus simples et moins coûteuses, portant sur les deux volets du risque (aléa et vulnérabilité). Néanmoins, sur le terrain, il est beaucoup plus facile de trouver des financements pour bétonner un tronçon de rivière (par exemple) que pour lancer des programmes de sensibilisation au risque sur la population.

D'une manière générale, les moyens de gestion de crues et de ruissellement de surface peuvent être classés en mesures structurelles ou non structurelles. Selon le passé du territoire en question et selon l'idéologie d'intervention (agir soit sur l'aléa soit sur la vulnérabilité et le comportement de la population, ou les deux à la fois), l'une ou l'autre de ces mesures est applicable.

1.3.2.1. Les mesures structurelles

Restant aujourd'hui les plus utilisées. Les mesures structurelles sont entreprises dans le but d'atténuer au mieux l'aléa de crue et de ruissellement de surface. Etant donné l'impossibilité de contrôler l'intensité et la répartition spatio-temporelle de l'événement météorologique, l'atténuation de l'aléa ne peut donc se faire qu'à travers la modification des conditions hydrologiques. Selon l'objectif de protection recherché, ces mesures prennent de nombreuses formes :

1. *L'augmentation des capacités d'écoulement* (i.e., débits) qui peuvent être supportés par le cours d'eau. Cela est souvent assuré par les aménagements fluviaux de type endiguement, rectification et suppression de méandres, recalibrage de lit, des ouvrages d'art et des systèmes d'évacuation de l'eau.

2. *L'augmentation des capacités de stockage* des eaux ruisselantes, ce qui permet de diminuer la vitesse, le débit de pointe ainsi que les hauteurs de submersion en aval. Parmi les outils utilisés à ces fins, on peut citer la préservation des zones d'expansion de crue et la construction des bassins de rétention des eaux d'orage et de ruissellement, afin d'éviter l'arrivée concomitante des eaux de crue et/ou de ruissellement en aval et diminuer ainsi le débit de pointe.

1.3.2.2. Les mesures non structurales

Ce sont des mesures qui ne nécessitent pas une mobilisation matérielle importante ni d'intervention de type génie civil pour modifier le comportement hydrologique. Elles misent plutôt sur le changement de certain comportement sur le terrain de manière telle que l'exposition des enjeux aux aléas diminue. Les mesures non structurales qui peuvent être appliquées en cas de problème de crue et de ruissellement de surface peuvent être classées en quatre grandes catégories (Grelot, 2004) :

1. *Modification des modes d'occupation et d'usage du sol* : délocalisation ou suppression d'activités, information des nouveaux arrivants qui veulent s'installer dans la plaine alluviale sur le risque potentiel afin de protéger les constructions, réglementation sur l'usage futur du territoire.

2. *Modification de la vulnérabilité des éléments physiques*, tout en gardant les usages initiaux : mesure de protection individuelle, modification des caractéristiques du bâti et renforcement des infrastructures, etc.

3. *L'engagement d'une gestion dynamique afin de traiter les enjeux mobiles* : système de prévention, système d'alerte, organisation préalable à la gestion de crise, utilisation des médias afin d'informer immédiatement les citoyens en cas de danger, etc.

4. *Système de mutualisation ou d'assurance*, à savoir des modes d'intervention qui n'agissent pas directement sur l'événement mais qui interviennent après leur survenue afin de répartir les coûts de la catastrophe sur une échelle plus étendue.

Conclusion

Une démarche d'analyse et de gestion du risque est très complexe et ramifiée : il s'agit d'un travail pluridisciplinaire qui fait appel aux sciences de la Terre et de la vie, aux sciences sociales et humaines. Ce travail va porter préférentiellement sur l'une des formes de risque la plus répandue dans le bassin méditerranéen à savoir les crues et les ruissellements superficiels, de caractère rapide (temps de concentration inférieur à 12 h)³, déclenchés par des configurations orageuses convectives de forte intensité et d'extension spatiale réduite⁴ et observés sur l'une des métropoles⁵ du bassin méditerranéen.

³ Selon Roche (1992), une crue de caractère rapide ou torrentielle a une réponse hydrologique inférieure à 6 heures.

⁴ L'aléa hydro-météorologique touche des bassins versants de quelques dizaines de km².

⁵ On entend par le terme de métropole méditerranéenne une grande étendue urbaine de plus de 500000 habitants considérée comme un centre d'attraction et de concentration d'activités scientifique, économique, financière, politique et culturelle à l'échelle du bassin méditerranéen.

Chapitre 2

Paramètres et mécanismes de genèse des crues et du ruissellement superficiel

Introduction

- 2.1. Facteurs responsables du ruissellement et des écoulements rapides de crue
- 2.2. Particularités de l'hydrologie urbaine

Conclusion du chapitre 2

Introduction

L'ensemble des eaux de pluie qui ne s'évaporent pas finit par rejoindre la surface du bassin-versant. Selon le microclimat, l'intensité et la distribution spatio-temporelle de l'événement météorologique, l'état d'humectation initial des sols et les caractéristiques texturales et structurales des formations superficielles, plusieurs cheminements de l'eau (*hydrological pathways*) peuvent être observés au sein d'un bassin versant. On citera quelques cheminements possibles de l'eau :

- L'eau s'évapore rapidement et ne demeure que momentanément dans le sol.
- L'eau rejoint directement le cours d'eau et s'écoule jusqu'à l'exutoire du bassin-versant. Cette partie des pluies alimente directement le débit des cours d'eau.
- L'eau qui s'infiltré dans la tranche de subsurface est en grande partie utilisée par la végétation. Elle forme une sorte de nappe perchée temporaire et contribue en grande partie à la saturation des couches superficielles.
- L'eau s'infiltré plus en profondeur pour rejoindre les nappes souterraines. Une partie des eaux des nappes phréatiques réapparaît plus tard en surface et alimente le débit des cours d'eau.
- Une autre partie des eaux de pluie forme les écoulements superficiels appelés ruissellement de surface.

Dans le cadre de cette étude, on va détailler deux phénomènes hydrologiques, à savoir 1) l'écoulement rapide de crue (ERC) et sa circulation au sein du réseau hydrographique et 2) le ruissellement de surface et sa circulation de l'eau en surface et en dehors du réseau hydrographique (un ruissellement peut être connecté ou pas à un drain permanent : selon les cas, il peut donc ou pas participer aux écoulements de crue). Ce choix s'explique du fait de la prédominance dans la zone d'étude de phénomènes d'écoulement rapide de crue et de ruissellement de surface lorsqu'un événement hydrométéorologique de forte intensité affecte une zone urbanisée, tandis que les écoulements subsurface et la participation des nappes souterraines dans les débits de cours d'eau sont négligeables dans ce genre d'événement. Le territoire d'une grande majorité de bassins versants urbanisés dispose de parcelles naturelles (bois, les jardins, des espaces verts, ...) où des parties de réseau hydrographique naturel existent encore. De ce fait, l'étude de la réponse hydrologique d'un bassin-versant urbanisé exige à la fois une maîtrise des techniques d'analyse de la réponse hydrologique à la fois en milieu naturel et en milieu urbanisé.

2.1. Facteurs responsables du ruissellement et des écoulements rapides de crue

2.1.1. Facteurs du ruissellement

Le ruissellement correspond à toute circulation de l'eau à la surface d'une topographie (naturelle ou anthropique). Le ruissellement est assuré naturellement par l'effet de la gravité

en suivant la pente du terrain, sachant que l'épaisseur de la lame d'eau doit être suffisante pour que les forces de gravité compensent les tensions de surface (Yen, 1986). Les mécanismes de ruissellement dépendent de la viscosité et de l'épaisseur de la lame d'eau, des tensions superficielles et de la rugosité de la surface topographique. Dans la grande majorité, l'eau s'écoule selon un régime turbulent, un régime laminaire ne pouvant s'installer que sur des surfaces très lisses, souvent observées en milieu fortement urbanisé où les surfaces sont bitumées ou bétonnées. Cependant, le passage d'un régime à l'autre est possible et peut se faire en très peu de distance (Mitci, 1978).

Il existe plusieurs classifications possibles des types de ruissellement (fig. 2.1). La classification anglo-saxonne privilégie les deux grands mécanismes intervenant dans leur génération : le ruissellement par dépassement du seuil d'infiltration (*excess infiltration overland flow*) et le ruissellement par dépassement du seuil de saturation (*excess saturation overland flow*) ; cette classification a été adoptée par plusieurs auteurs francophones (Cosandey *et al.*, 2000 ; Bigot *et al.*, 2004).

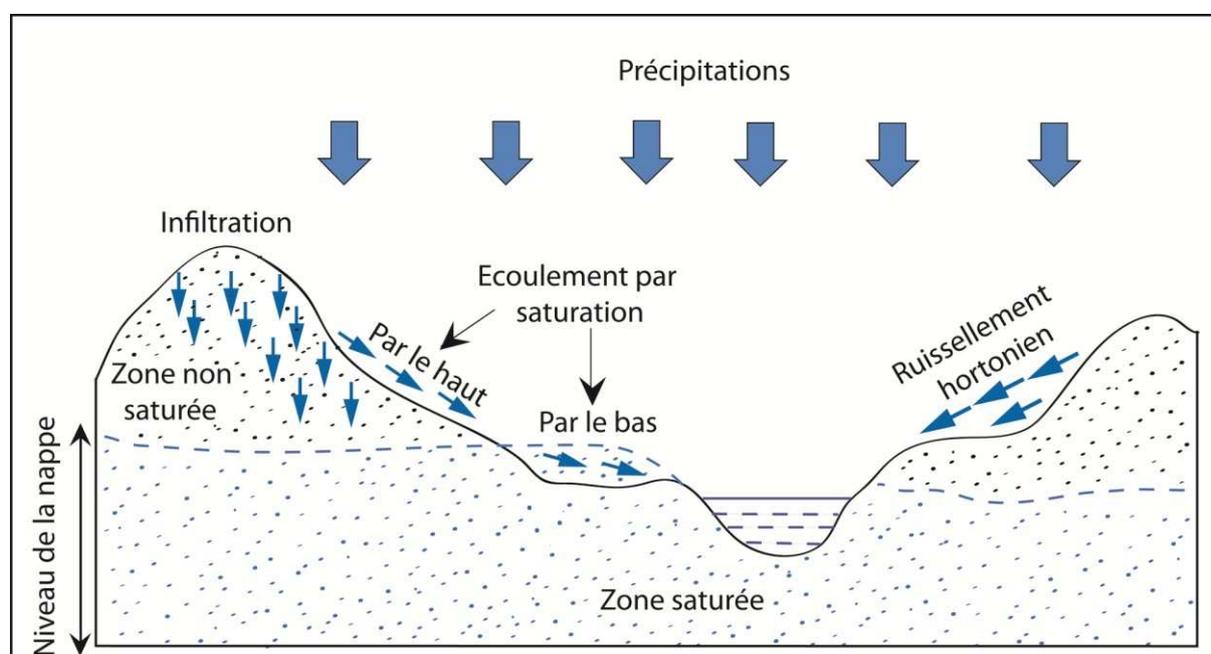


Fig. 2.1. Processus de génération des écoulements par dépassement de la capacité d'infiltration et sur surface saturée (modifiée selon Musy et Higy, 2004)

2.1.1.1. Dépassement du seuil d'infiltration

Le ruissellement intervient principalement dans l'explication de la réponse hydrologique sous climats semi-arides et en cas d'épisodes pluvieux intenses. Le phénomène de ruissellement par dépassement du seuil d'infiltration peut être constaté sur des sols à conductivité hydraulique élevée (*e.g.*, climat tempéré et humide) à condition que l'intensité pluviométrique dépasse la capacité d'infiltration du sol.

A. Ruissellement hortonien

Horton (1933) a travaillé dans des régions à faible taux de couverture au sol et sous climat tempéré où l'intensité pluviométrique était rarement supérieure à la capacité

d'infiltration des sols. Cependant, il existe des substrats à très faible imperméabilité (e.g., argiles, marnes) sur lesquels ce type de ruissellement peut être observé. A ces conditions naturelles se rajoutent d'autres conditions naturelles (sols couverts de végétation) ou anthropiques (surfaces de sol tassées dans les zones d'élevage de troupeaux, sur les chemins et dans les lieux de passage répété des engins agricoles) à l'origine du ruissellement hortonien. Horton (1933) explique la formation du ruissellement par le dépassement de l'intensité de pluie et la vitesse d'infiltration des sols : « *Les premières pluies pénètrent dans le sol, créant un horizon superficiel saturé à travers lequel l'infiltration se stabilise à la valeur de la conductivité hydraulique à saturation (K), caractéristique hydrodynamique du sol qui s'établit lorsque la succion du sol n'est plus sensible, et qui dépend tout à la fois de sa texture et de sa structure* ». Ce type de ruissellement peut être formulé par $R = I - K$ où K = conductivité hydraulique à saturation, supposée décroissante dans le temps, pour se stabiliser finalement à une valeur constante dite K , I = intensité des pluies, qui est la portion variable dans l'équation, et par la suite la grandeur des ruissellements est liée directement à celle de I .

On peut distinguer deux grandes phases dans la formation du ruissellement hortonien (Musy et Higy, 2004) :

- Au début d'une averse, l'intensité des précipitations est inférieure à la capacité d'infiltration des sols ; ainsi, l'ensemble des eaux reçues à la surface du sol arrive à s'infiltrer. Ce processus est continu dans le temps (temps de submersion t_s). Plus l'intensité des pluies et l'humidité initiale du sol sont élevées, plus t_s est court.

- L'écoulement de surface débute lorsque l'intensité des pluies (I_p) devient plus importante que la capacité d'infiltration du sol (C_s). La quantité des eaux ruisselées est évaluée par la différence entre ces deux variables ($I_p - C_s$).

Musy et Soutter (1991) soulignent que les caractéristiques hydrodynamiques des sols sont très variables spatialement (à petites distances), ce qui peut être à l'origine de la réinfiltration « *runon* ». Les eaux de ruissellement ont plusieurs devenir possibles : ruisseler à la surface des versants pour rejoindre le thalweg *via* la gravité (dans ce cas, l'eau de ruissellement participe directement aux écoulements de crue) et/ou rejoindre un réseau d'assainissement, être stockée et s'infiltrer en contrebas (dans ces cas, l'eau n'atteindra jamais le cours d'eau et ne participera donc pas aux écoulements de crue).

B. Ruissellement par dégradation de l'état de surface

Une surface topographique correspond à l'interface entre l'atmosphère et le sol, contrôlant *de facto* le coefficient d'infiltration de l'eau dans le sol. L'état de surface d'un sol conditionne donc significativement le taux d'imperméabilité. L'impact mécanique (poids, vitesse) des gouttes de pluie sur la surface nue d'un sol provoque l'éclatement de ses agrégats en plusieurs particules élémentaires qui vont se disperser et se réorganiser en surface. Les pores sont progressivement fermés, rendant le sol de plus en plus imperméable : se forme alors ce que l'on appelle la « *croûte structurale* ». Selon Boiffin (1984), les premiers ruissellements diffus circulant sur la croûte structurale vont entraîner les particules du sol dans les micro-dépressions de la topographie, où elles s'installent en couches stratifiées discordantes, renfor-

çant encore l'imperméabilité du sol. Ce mécanisme est appelé organisation pelliculaire superficielle (OPS), dont les principales phases sont expliquées *in fig. 2.2.*

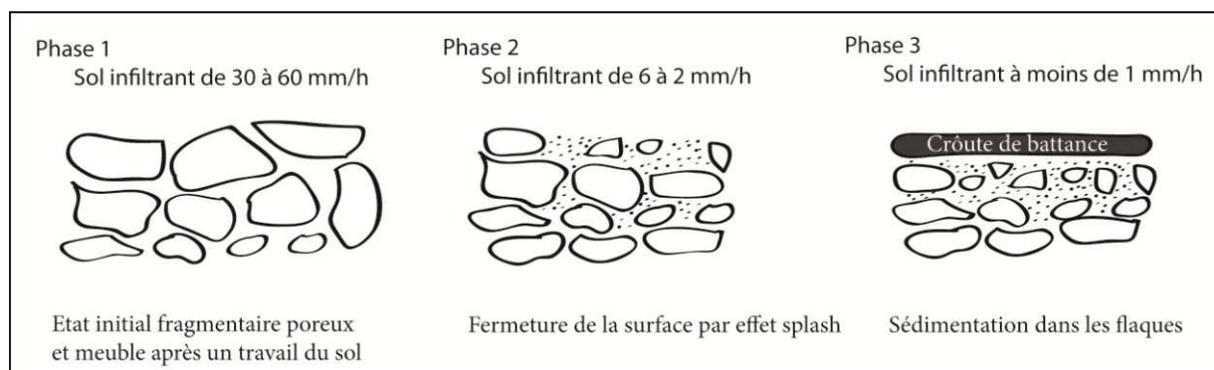


Fig. 2.2. Phase de formation des OPS sous l'effet de l'érosion mécanique des gouttes de pluie.

La formation des OPS est conditionnée par de nombreux paramètres. Le couvert végétal joue un rôle primordial dans la protection de la surface du sol. Certaines pratiques agricoles (*e.g.*, épandage protecteur) peuvent aussi jouer un rôle protecteur en diminuant l'effet d'érosion mécanique des gouttes de pluie sur la surface du sol. Les travaux de Duclos (1977) ont montré que l'aptitude des sols à former des OPS est différente selon leur teneur en argiles et limons (le sol devient battant à partir d'un rapport limons/argiles supérieur à 2,5) et leur stabilité structurale (un sol finement travaillé diminue sa stabilité structurale). Les travaux de Muxart *et al.* (1990) mettent en relation la vitesse de développement des OPS avec l'histoire récente de la surface du sol : pour des épisodes météorologiques de durée et d'intensité moyenne et maximale équivalentes, les coefficients de ruissellement varie significativement dans un même sol ; du ruissellement se produit lors de pluies intenses eu égard à l'érosion mécanique des gouttes de pluies puis par la dégradation et la fermeture rapide du sol.

Outre l'effet des gouttes de pluie, d'autres facteurs peuvent conduire à la dégradation de la surface du sol tel le tassement superficiel sur les chemins habituellement empruntés par les piétons, les troupeaux, les engins lourds, etc. Certes, ce type de ruissellement ne concerne qu'une surface réduite du bassin-versant mais leur rôle est loin d'être mineur d'un point de vue hydromorphologique : la concentration du ruissellement peut conduire à l'entaille des versants (ravines) ; l'eau de ruissellement atteint la nappe phréatique et participe ainsi indirectement à l'augmentation des écoulements de crue. Enfin, dans les régions à climat aride ou semi-aride, la croûte biologique⁶ a également un rôle non négligeable dans la formation des OPS, et cela *via* des dalles imperméables formées en phase de dessiccation. Sous climat tempéré, un tel phénomène reste encore mal connu.

2.1.1.2. Dépassement du seuil de saturation : aires contributives saturées

Les *aires contributives saturées* (ACS) surviennent lorsque l'infiltration de l'eau dans le sous-sol (*i.e.*, substrat géologique, formations superficielles, sols pédologiques, remblais anthropiques) n'est plus possible du fait que 1) l'ensemble de la porosité est déjà occupé par de

⁶ Croûte microbiologique constituée principalement à partir de populations de cyanobactéries en présence d'algues vertes, de lichens et de bactéries, accessoirement de diatomées et de mousses.

l'eau (porosité épuisée) et 2) la capacité de transmission latérale de l'eau est dépassée. Musy *et al.* (2003) ont étudié l'écoulement latéral d'une nappe profonde ou perchée : « *La remontée de la nappe à partir d'un horizon peu perméable ou à partir d'une nappe préexistante peut aussi être à l'origine de ce développement* ». Ici on parle d'un phénomène de saturation *per ascensum* observé essentiellement en bas de pente.

Les ACS à l'origine du ruissellement et des écoulements rapides de crue sont en relation avec les précipitations tombées sur une partie du bassin-versant. Au sein d'un même bassin-versant, la dynamique et l'extension des ACS dépendent de plusieurs facteurs :

- *Profondeur de la nappe* (cf. *supra*).

- *Variation locale au niveau des conditions de ressuyage* : quand la nappe est peu profonde, la frange capillaire peut jouer un rôle fondamental, en provoquant une élévation rapide du niveau des surfaces saturées. Certains auteurs supposent que « *l'intervention de la frange capillaire est probablement à l'origine de crues d'ampleur surprenante compte tenu de l'état apparent du milieu* » (Abdul *et al.*, 1989).

- *Variation au cours de l'épisode pluvieux* : les apports pluvieux rechargent progressivement la nappe, participant ainsi à l'augmentation des coefficients de ruissellement (Hewlett et Nutter, 1970 ; Dunne *et al.*, 1975 ; Schulé, 1989).

- *Variation de la réserve hydrologique* : la réserve hydrologique varie le long de l'année en fonction du climat régional et plus particulièrement des précipitations.

Le débit de base d'un cours d'eau avant l'épisode pluvieux renseigne sur l'état des réserves hydrologiques et non sur l'état hydrique moyen du bassin-versant, un point suscitant souvent une confusion. La réserve hydrique affleure en surface lorsque la nappe est proche de la surface ; dans ce cas, la réserve fait partie des zones saturées d'où l'hypothèse que « *les crues ne seraient générées que par les précipitations tombant sur ces surfaces non saturées* » (Cosandey *et al.*, 2000). On désigne par *zone active* toute zone productrice de ruissellement. Les ACS représentent une part des zones actives qui participent à l'alimentation directe des écoulements de crue, contribuant ainsi au gonflement des hydrogrammes. Cependant, la coïncidence entre ces deux zones ne signifie pas que l'eau reçue par les zones de saturation est la même que celle qui circule dans la rivière, ce qui laisse penser que le ruissellement superficiel ne représente pas toujours le facteur principal de genèse des crues.

A. Affleurement des nappes de fond de vallée

« *Le niveau supérieur de la nappe est en équilibre avec celui du cours d'eau qu'elle alimente, ce qui signifie que son toit est proche de la surface à proximité de ce cours d'eau* » (Cosandey *et al.*, 2004). L'eau de pluie qui s'infiltré rejoint la nappe, provoquant son gonflement, et l'extension des surfaces saturées qui en résulte dépend de la profondeur de la nappe et de son extension spatiale, de la dimension du fond de la vallée et de la taille globale du bassin-versant. L'extension des surfaces saturées dépend également de la quantité des apports pluvieux. Le toit de la nappe est souvent proche des surfaces à proximité des cours d'eau qu'elle alimente. Ainsi, des apports pluvieux même faibles peuvent contribuer à faire affleurer la nappe phréatique. Les travaux d'Ambroise (1988) ont montré que « *les surfaces qui ont*

donné lieu à du ruissellement de surface correspondent aux valeurs des surfaces saturées desquelles on déduit la valeur du débit de base ». L'extension spatiale des surfaces saturées représente donc un bon indicateur de l'état de la réserve hydrologique du bassin.

B. Débordement des nappes perchées temporaires

Selon Fernandes (1990) et Jordan (1992), les ACS ne sont pas immédiatement connectés aux talwegs. Lorsque la nappe est trop profonde pour pouvoir affleurer en surface, un ruissellement par dépassement du seuil de saturation peut survenir. Dans des conditions topographiques et hydrologiques favorables peuvent se former des nappes temporaires connues sous le nom de *nappe perchées*, suite à des apports pluvieux de forte ou moyenne intensité. Pour que ce type de nappe puisse se développer, un certain nombre de conditions doivent être réunies :

- L'existence de couches de perméabilité limitée (e.g., argiles) voire nulle, empêche l'eau de s'infiltrer et d'atteindre la nappe profonde.

- Dans les massifs anciens, les zones les plus éloignées du cours d'eau sont celles qui présentent les manteaux d'altération les plus minces, pouvant occasionner non seulement l'affleurement de la roche mère ou du substrat géologique mais aussi de nappes perchées.

- Les eaux s'infiltrant dans les couches supérieures d'un sol agricole « travaillé » peuvent se retrouver bloquées par la semelle des labours. Ce phénomène est observé principalement en région de grandes cultures, où les semelles de labour résultent se forment principalement par le compactage des sols suite au passage d'engins agricoles lourds.

Par ailleurs, Jordan (1992) observe que la densité des structures linéaires (réseaux routiers, chemins habituels, etc.) constituent des facteurs d'accélération des écoulements. Les travaux d'Oliveira (1992) ont montré que la formation de zones saturées peut ne pas suivre la logique de la topographie actuelle et être conditionnée par la paléotopographie. Dans ce cas, les eaux ruisselantes n'atteignent pas le cours d'eau et ne contribuent pas aux écoulements de crue.

En conclusion, certes il existe une relation claire entre l'état de la nappe phréatique et l'extension des aires saturées, et les eaux de ruissellement qui en résultent participent de différentes manières aux écoulements de crue. Les mécanismes qui contrôlent cette participation du ruissellement sur les versants aux écoulements dans les fonds de vallée sont complexes et rarement linéaires.

2.1.2. Du ruissellement sur les versants aux écoulements de crue

Les crues sont observées suite à une arrivée massive et rapide des eaux au sein du lit mineur d'une rivière ou d'un fleuve, provoquant une montée plus ou moins rapide de leur niveau. L'origine de cette eau est multiple mais le phénomène de ruissellement sur les versants représente le processus le plus important dans la genèse des crues.

La relation qui existe entre les deux types de réponses hydrauliques, à savoir le ruissellement de versant et l'écoulement des crues, reste à ce jour mal connu car complexe. A ce niveau, se pose de nouveau la question de la distinction entre surfaces actives et surfaces con-

tributives (Ambroise, 1998). Selon Cosandey *et al.* (2000), « cette relation pose tout le problème des relais, des changements d'échelle, qui induisent des modifications fondamentales dans les combinaisons de processus qui déterminent les modes de fonctionnement des milieux physiques ». Globalement, trois grands types de situations peuvent être distingués (fig. 2.3) :

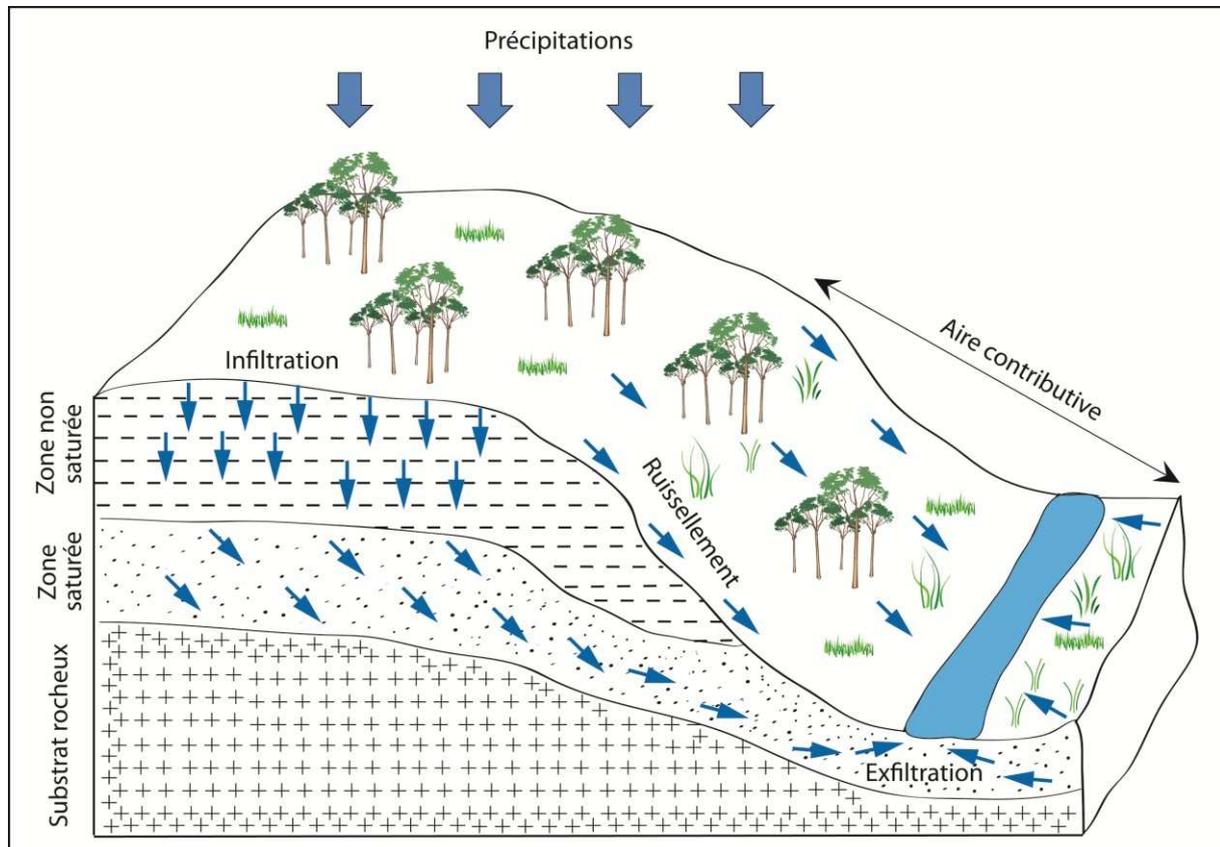


Fig. 2.3. Mécanismes à l'origine de la genèse des crues.

2.1.2.1. Formation du ruissellement sur les versants sans observation de crue dans la rivière

Dans ce cas, les surfaces actives ne sont pas des surfaces contributives, et le ruissellement qui se forme sur les versants n'atteint jamais le cours d'eau. Cette situation a été démontrée par un grand nombre d'études : travaux de Dupraz (1984), portant sur le Mont Lozère sous climat de moyenne montagne méditerranéenne ; travaux de Cosanday *et al.* (1987), dans le sud du Massif Central français et plus précisément sur le Causse Méjan ; travaux de Yair (1995) dans un petit bassin-versant en Négev sous climat désertique ; travaux de Cros-Cayot (1996) en Bretagne. Cette problématique relève plus de la géomorphologie que de l'hydrologie. L'hydrologue s'intéresse en premier lieu à ce qui se passe au sein du cours d'eau alors que le géomorphologue analyse les ruissellements comme un agent érosif de premier ordre.

Selon le climat de la région, les modes d'occupation du sol et les caractéristiques intrinsèques du bassin-versant, plusieurs mécanismes à l'origine du ruissellement ont été mis en évidence : 1) le ruissellement produit dans une zone active en amont (zone imperméable, croûte de battance). En présence d'une pelouse ou d'un sol épais, l'eau s'infiltration en aval et ne

participe pas aux écoulements de crue. Les propriétés des surfaces constructives d'un bassin-versant ont un rôle important dans la détermination de l'extension des zones productives puis de celle des zones contributives ; 2) certains volumes ruisselés se formant dans la partie amont des versants convexo-concaves s'infiltrent avant d'atteindre la convexité.

2.1.2.2. Formation de crue sans observation de ruissellement sur les versants

Ce phénomène se produit lorsque les pluies n'affectent que le fond de vallée. Des travaux portant sur la chimie des eaux (*i.e.*, basée sur la décomposition isotopique de l'eau) ont réussi à prouver l'origine essentiellement de fond de vallée des eaux de crue (eaux circulantes anciennes). Ce phénomène s'explique par le fait que l'eau de pluie qui tombe sur les surfaces saturées ne ruisselle pas mais s'infiltré pour rejoindre la nappe, occasionnant des processus de transfert de pression sur la nappe. Ainsi, l'eau ancienne de la nappe rejoint rapidement le cours d'eau par exfiltration (Mérot, 1981 ; Loÿe-Pilot *et al.*, 1990 ; Cosandey *et al.*, 2004). Cosandey (2000) pose l'hypothèse « *que l'air, comprimé dans le sol par la progression du front d'humectation, transmet un supplément de pression à la nappe, même profonde, provoquant une exfiltration dans lit du cours d'eau, et un gonflement des débits : c'est ce qui expliquerait que ce soit de l'eau « ancienne » qui s'écoule, et non de l'eau « nouvelle »*. Cette hypothèse est également posée par d'autres auteurs (Hubert, 1989 ; Buttle *et al.*, 1997).

2.1.2.3. Ruissellement connecté directement au cours d'eau

Dans ce cas, les eaux ruisselantes de surface alimentent directement les écoulements de crue : les zones actives sont donc des zones contributives. Cette coïncidence entre les ruissellements et les écoulements de crue peut être observée lorsque les zones actives sont proches du cours d'eau, quand les zones actives sont connectées aux cours d'eau par un réseau de drainage intermédiaire, dans des cas de ruissellement exceptionnel à forte concentration.

En conclusion, quel que soit le mécanisme de génération de crue (zone active, zone contributive, exfiltration), les précipitations restent le facteur clé. Cependant, l'identification et la compréhension des phénomènes relève d'une démarche scientifique indispensable qui doit précéder l'étape d'aménagement hydrographique et hydraulique du bassin-versant.

2.1.3. Ecoulements de crue et régime hydrologique

L'eau qui s'écoule dans les cours d'eau résulte soit de précipitations directes sur la surface du cours d'eau, soit d'écoulements de surface, de subsurface et/ou souterrains qui participent d'une manière directe ou pas à leur alimentation. L'identification et la compréhension du régime hydrologique passe l'exploitation de longues séries de données (débits, hauteur d'eau, vitesse d'écoulement). Ces séries décrivent généralement la fréquence et la magnitude des événements hydrologiques, ainsi que les conditions climatiques, physiographiques et hydrogéologiques du bassin-versant (Lambert, 1996). Selon Musy et Higy (2004) « ... nous pouvons caractériser un bassin-versant et son écoulement en adoptant une classification du régime des cours d'eau d'après l'allure de la fluctuation saisonnière systématique des débits qu'ils présentent, et d'après leur mode d'alimentation ».

Selon les paramètres considérés prioritairement par les hydrologues, il existe un grand nombre de classifications des régimes d'écoulement. Les classifications exposées ci-dessous sont principalement fondées sur les paramètres hydrologiques.

2.1.3.1. Classification de Pardé (1955)

Cette classification a largement été adoptée dans les pays francophones. Il s'agit d'une classification descriptive, proprement hydrologique, qui traduit la variabilité saisonnière des débits, consistant à identifier l'origine des écoulements et à évaluer les débits moyens mensuels au cours de l'année. Trois principaux types de régime hydrologique sont distingués :

1) « Régime simple » : c'est un régime qui se caractérise par un seul maximum et minimum et par un seul mode d'alimentation des volumes écoulés. Ce type de régime renseigne sur la présence de deux saisons hydrologiques distinctes. Selon le mode d'alimentation des écoulements, différents types de régime simple peuvent être distingués : régime glaciaire, régime nival, régime pluvial pur, régime pluvial tropical.

2) « Régime mixte » : c'est un régime qui se caractérise par deux maxima et deux minima et par plusieurs modes d'alimentation possibles. On citera par exemple le régime nivo-glaciaire, le régime nivo-pluvial et le régime pluvio-nival.

3) « Régime complexe » : il se caractérise par plusieurs maxima et minima dans une même année et leurs modes d'alimentation possible sont nombreux. Il caractérise les grands fleuves au réseau hydrographique très ramifié, dans lesquels les sous-bassins constructifs influencent variablement l'écoulement du chenal principal. *De facto*, le comportement hydrologique du fleuve n'est autre que la synthèse du comportement hydrologique des différents bassins constructifs. Les inconvénients de cette classification est le fait qu'elle se fonde presque exclusivement sur l'unique paramètre « volume d'écoulement », qu'elle prend en compte les moyennes et non les fréquences, et qu'elle ignore le rôle joué par les phénomènes d'embâcle/débâcle et de stockage/déstockage des réserves souterraines.

2.1.3.2. Classification de Lvovich (1973)

Cette classification est fondée sur deux paramètres caractéristiques des écoulements, à savoir, le « mode d'alimentation » (fonte glaciaire et nivale, pluie et neige, origine souterraine) et la « répartition des volumes écoulés » au cours de l'année. Sous la base de ces paramètres, Lvovich (1973) a développé une matrice composée de 144 régimes possibles. L'application de cette classification est conditionnée par la connaissance préalable des mécanismes générateurs des écoulements, condition qui représente la plus grande limite de cette méthode.

2.1.3.3. Classification suédoise

Elle est basée sur l'identification des périodes de « basses eaux » et de « hautes eaux ». Elle est bien sûr largement utilisée en Scandinavie. Elle compte six régimes différents dont trois observés en périodes de hautes eaux (crues alimentées par la fonte de la neige, régime transitoire, crues automnales alimentées principalement par les pluies), les trois autres étant distingués en période de basses eaux (étiages dus à la rétention nivale, étiage transitoire ob-

servé entre les deux débits mensuel les plus faibles de l'année, étiages dus aux phénomènes d'évapotranspiration dominant ou causé par une pluviométrie estivale très faible ; Musy et Higy, 2004).

2.1.3.4. Classification de Degoutte (2006)

Degoutte (2006) reprend une classification basée principalement sur les états de variation des crues au niveau du cours d'eau. Deux grandes catégories de régimes d'écoulement sont distinguées :

1) « Régime permanent » : le débit et la hauteur d'eau dans le chenal d'écoulement sont constants dans le temps. Ce type d'écoulement est observé, entre autres, dans les canaux d'irrigation, les cours d'eau en période d'étiage, mais jamais en périodes de crue. Selon la géométrie du chenal d'écoulement, le régime permanent est soit uniforme, soit il varie. Un *régime permanent uniforme* aura lieu lorsque la géométrie, la pente et la nature de l'encaissant du chenal restent homogènes. Un *régime permanent varié* est observé lorsque l'une ou plusieurs des caractéristiques du chenal d'écoulement ne sont plus uniforme. Mais il peut être observé également au sein d'un chenal uniforme dans le cas où le tirant d'eau est variable (il est généralement admis qu'un tirant d'eau ne peut être constant qu'à une grande distance des extrémités du chenal d'écoulement).

2) « Régime transitoire » : le débit et la hauteur d'eau dans le chenal d'écoulement varient dans le temps et dans l'espace (à l'échelle du tronçon fluvial ou de la section). Le régime transitoire est observé essentiellement en période de crues

En conclusion, les connaissances concernant les régimes d'écoulement ont beaucoup évolué, de Maurice Pardé aux classifications automatiques rapidement traduites sous forme algorithmiques. Néanmoins, ces connaissances n'ont pas encore atteint le stade de la maturité, en raison de la grande complexité d'interactions entre les différents paramètres intervenant dans la génération des écoulements (physiographie du bassin-versant, mode d'alimentation des écoulements, topologie du réseau hydrographique, structure géologique, anthropisation, etc.). Dans les hydrosystèmes anthropisés, les régimes hydrologiques évoluent rapidement en comparaison avec ceux des hydrosystèmes naturels dont l'évolution se fait principalement aux rythmes des temps géologiques.

2.1.4. Complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant

L'étude des phénomènes hydrologiques est issue essentiellement de la mécanique des fluides, dont les lois sont établies pour être appliquées à des milieux homogènes dans lesquels les phénomènes sont supposés fortement linéaires. Ainsi, l'étude du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant dans sa globalité est extrêmement difficile et impose de le décomposer en plusieurs sous-unités hydrologiques homogènes. La complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant est liée au relais spatio-temporel des processus générateurs de ruissellement et de crue, aux effets d'échelle et aux effets de seuil.

2.1.4.1. Relais spatio-temporel des processus générateurs de ruissellement et de crue

De l'amont en aval, plusieurs types de ruissellement peuvent être observés, dont les uns alimentent ou neutralisent les autres. Ces processus générateurs se relaient également dans le temps : on observe par exemple des régimes de ruissellement et de crue fort différents selon les saisons, ces différents régimes modifiant fortement l'état initial du milieu.

2.1.4.2. Effet d'échelle

Selon l'échelle à laquelle on se situe (bassin-versant, sous-bassin, tronçon fluvial, section), la sensibilité et les mécanismes de réaction, face à un même facteur générateur, seront différentes. Ce point est particulièrement à prendre en compte lors de travaux visant à analyser les impacts des changements environnementaux (pluviométrie, température, etc.) sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant (Albergel, 1987 ; Cras, 2005).

2.1.4.3. Effet de seuil

La montée soudaine des crues est souvent liée à un dépassement d'un certain seuil. Ce dépassement peut être dû à une large saturation de surfaces, à l'arrivée concomitante des écoulements, etc. Ainsi l'évaluation de ces seuils est très importante dans la prévention des événements brutaux de caractère souvent catastrophique. Plusieurs travaux ont été conduits dans le but de quantifier ces effets de seuil, en essayant de développer des lois générales capables de modéliser spatio-temporellement la totalité des mécanismes qui gèrent la succession des processus hydrologiques d'un bassin-versant. La méthode dite d'« inondabilité » est un exemple de développement collectif mené par la division hydrologie-hydraulique du CEMAGREF (1998).

2.2. Particularités de l'hydrologie urbaine

En milieu urbain, le système hydrologique naturel est fortement modifié voire entièrement artificialisé. Pour la grande majorité des villes, l'histoire de l'artificialisation du réseau hydrographique est la même : les ruisseaux et les petites rivières sont canalisés et souvent enterrés, les fleuves quant à eux, sont murés avec des hauts endiguements et isolés ainsi du paysage de la ville. Des pratiques qui ont eu des conséquences lourdes sur le cycle de l'eau mais longtemps adoptés par les hydrologues et les urbanistes aménageurs (Fig.2.4).

Les acteurs du milieu urbain n'ont pris conscience de ces effets néfastes de l'anthropisation que bien tardivement, après la survenue de nombreuses catastrophes hydrologiques et environnementales. Cette prise de conscience s'est traduite au début des années 1970 par l'émergence d'une nouvelle discipline dédiée principalement à cette problématique : l'« hydrologie urbaine ». Dans le même temps, précisément en 1967, le premier programme de recherche lancé par l'*American Society of Civil Engineers* (ASCE) sur les problèmes de l'eau en ville voit le jour. En 1973, à Varsovie, une première manifestation internationale est organisée, sous la direction de l'Association internationale d'hydrologie scientifique et de l'UNESCO. En 1981, on assiste à la formation du comité d'hydrologie urbaine avec *Urbana*

(USA), comité commun entre l'Association internationale de recherche hydraulique (AIRH-IAHR) et l'Association internationale pour la qualité des eaux (AIQE-IAWQ). Baptisé initialement ICUSD puis ICUD, son nom actuel est l'*International Conference on Urban Drainage*. Depuis sa création, ce comité organise une conférence internationale tous les trois ans.

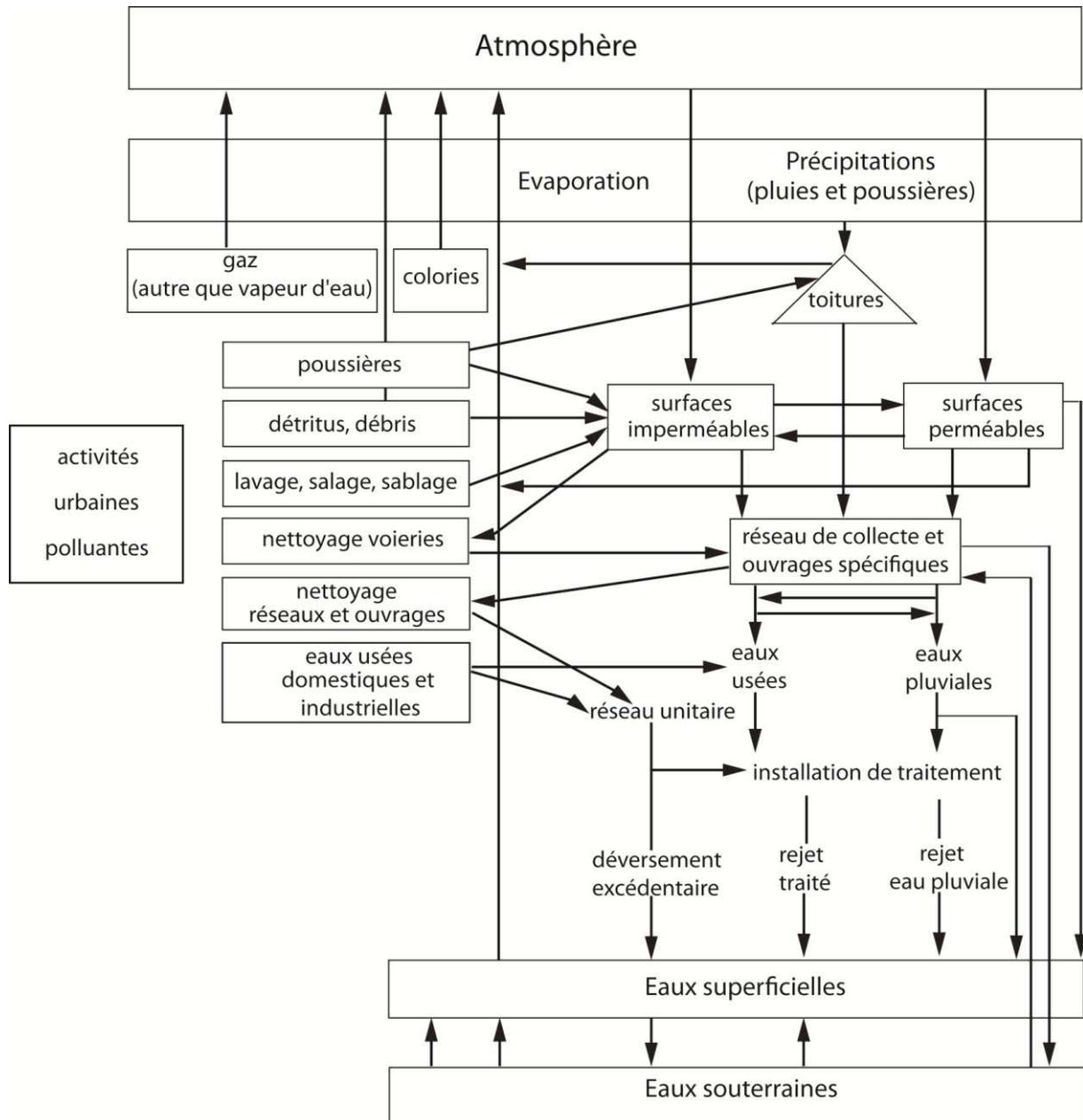


Fig. 2.4. Influence de la ville sur le cycle de l'eau (Chocat, 1997).

2.2.1. Hydrologie urbaine en tant que discipline

L'hydrologie urbaine est la discipline qui se préoccupe des impacts de l'évolution des villes sur le cycle de l'eau. L'encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement la définit comme « *Discipline scientifique de l'environnement se donnant pour objet l'étude de l'eau et ses relations avec les différentes activités humaines en zone urbaine. Elle traite tout particulièrement des relations entre la gestion des eaux de surface et les aménagements de*

l'espace en milieu urbain. Elle est organiquement liée à une technique urbaine particulière : l'assainissement ». Elle se distingue de l'hydraulique urbaine, qui « *concerne la distribution d'eau dans les agglomérations. Elle est parfois utilisée pour designer l'ensemble des écoulements de l'eau dans le milieu urbain* ». L'hydraulique urbaine est donc une composante de l'hydrologie urbaine. Dans le cadre de notre étude on va privilégier plutôt l'hydrologie urbaine, du fait que l'on traite du problème de ruissellement superficiel et des crues à l'échelle du bassin-versant affectés de mécanismes relevant de l'hydraulique urbaine, de l'hydrologie urbaine et de l'hydrologie de façon générale. Afin de mieux comprendre la complexité des problèmes liés à l'eau en milieu urbain, une restitution de leur l'histoire s'impose.

2.2.1.1. Liaison historique entre la ville et l'eau

Le facteur naturel joue un rôle clé dans la naissance et l'extension spatiale d'une ville, en particulier le relief et l'hydrographie. On se gardera cependant de tout déterminisme physique systématique.

1) *Installation de la ville* : le réseau hydrographique peut être historiquement le premier facteur attractif lors de la mise en place des villes, du fait qu'il présente à la fois une source d'alimentation en eau (consommation directe, irrigation, industrie), de nourriture, une voie de communication, etc. (Arnaud-Fassetta et Landuré, 2003). Le relief ne conditionne la mise en place des villes qu'à travers son réseau hydrographique et ses caractéristiques morphologiques (il faut qu'elles assurent une certaine protection de la ville faces aux attaques extérieures). On peut également évoquer les particularités des microclimats attractifs (pluviométrie, température) que peut créer un relief.

2) *La structure interne de ville* : la structure spatiale urbaine et son réseau de voirie peuvent être imposés en grande partie par le relief. Les vallées ont souvent été les premières à être exploitées du fait des commodités d'installation (pas de travaux de dénivellement préalable).

Des zones urbaines peuvent être valorisée suite à l'installation d'une activité importante (ports, usines industrielles, etc.). D'autres au contraire peuvent perdre de leur pouvoir d'attraction suite à des aléas naturels : c'est le cas de certaines vallées qui ont perdu de leur valeur foncière suite à des inondations.

2.2.1.2. Assainissement et réseau hydrographique artificiel de la ville

L'assainissement (*sewerag, sanitation*), tel qu'il est défini par l'encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, représente « *l'action d'assainir, de rendre sain. L'assainissement concerne la gestion des eaux usées comme celle des eaux pluviales. Il peut être collectif (...) et/ou utiliser des techniques plus au moins localisées (...). L'assainissement constitue l'aspect technique de l'hydrologie urbaine. Le terme d'assainissement peut avoir au moins deux sens. Le premier correspond à une approche physique. C'est l'ensemble des équipements utilisés : réseau d'assainissement, assainissement autonome, station d'épuration pour évacuer de l'eau d'une agglomération qu'elles soient usées ou pluviales. Le deuxième a une acception plus large : c'est l'ensemble des stratégies utilisées par les habitants des villes, responsables officiels ou non, pour essayer de répondre au problème de la circulation ur-*

baine de l'eau en excluant la production et la distribution de l'eau potable usée » (Joos, 2006).

2.2.2. Spécificité des bassins versants urbanisés

D'un point de vue hydrologique, un bassin-versant urbanisé présente quatre spécificités particulières, qui concernent les zones contributives, les réseaux d'évacuation artificiels, les ouvrages hydrauliques et les données disponibles.

- *Zones contributives* : elles correspondent en grande partie aux zones imperméables directement raccordées au réseau d'évacuation.

- *Réseaux d'évacuation artificiels* : ils constituent les chemins d'écoulement pris par la grande majorité des eaux et ont généralement une structure homogène et uniforme, facilitant l'application des lois de la dynamique des fluides.

- *Ouvrages hydrauliques* : ils sont dotés d'une structure simple et caractérisés par des écoulements généralement unidirectionnels. Leur installation sert à assurer ou à améliorer le fonctionnement du réseau d'assainissement, ou bien encore à assurer la connexion entre le réseau naturel et le réseau d'assainissement. D'autres ouvrages peuvent être installés afin de permettre l'accès au réseau d'évacuation pour des travaux d'entretien et l'optimisation de son fonctionnement. De nombreux autres ouvrages peuvent être rencontrés en fonction des sites (désableurs, station de pompage, bassin de rétention, etc.).

- *Données disponibles* : en milieu urbain, différents types d'information sont disponibles (plans cadastraux, plan du réseau souterrain, réseau des éléments linéaires de surface, information digitalisée). Ces informations sont souvent organisées sous la forme d'une base de données SIG facilement manipulée et qui offre la possibilité de croiser les différentes couches de données.

2.2.3. Structures élémentaires d'un bassin-versant urbanisé

D'un point de vue hydraulique, un bassin-versant urbanisé est composé de trois éléments structuraux, qui conditionnent en grande partie la dynamique des événements hydrométéorologiques de forte intensité : les obstacles, les éléments de drainage et les éléments de stockage.

1) *Les obstacles* : ce sont des objets qui empêchent le passage de quantités significatives d'eau écoulées et peuvent ainsi provoquer leur détournement. On distingue deux types d'obstacle, les obstacles purs ou imperméables et les obstacles perméables. Ils peuvent être d'origine naturelle (relief) ou artificielle, permanents ou temporaires. Ils peuvent avoir un rôle déterminant dans le comportement des inondations selon leur positionnement topographique et leur densité dans le réseau de drainage.

2) *Les éléments de drainage* : ce sont des objets qui assurent le transit des écoulements (conduite, canal, collecteur, réseau routier, bief du réseau hydrographique artificialisé, etc.). Ils sont dotés d'une géométrie bien structurée et délimitée dans l'espace et sont caractérisés par leur capacité d'évacuation (directement liée à la géométrie de l'objet) ainsi que par la nature des matériaux qui les composent (rugosité). Selon Hingray (1999), « *Diverses associa-*

tions d'éléments drainant conduisent à la formation d'autres objets urbains tels que les carrefours hydrauliques, qui peuvent être soit des diffluences soit des confluences, ou tels que les goulots d'étranglement qui diminuent localement les capacités d'évacuation du système de drainage (comme par exemple les ouvrages de franchissement tels que les buses, dalot, ponts...). Ces carrefours hydrauliques, et en particulier les diffluences, peuvent être considérés comme des objets hydrauliques urbains à part entière et posent d'ailleurs des problèmes assez délicats à résoudre concernant la modélisation de leur comportement ».

3) *Les éléments de stockage* : selon le mode de stockage des eaux, on distingue deux types principaux : les *éléments de stockage définitif*, dans lesquels l'eau stockée est définitivement perdue et ne réapparaît jamais en surface, ne participant pas à l'alimentation des débits des cours d'eau. En ville, ces éléments de stockage correspondent à des espaces viables aménagés en sous-sol (parkings, métros, habitats, etc.) mais il peut aussi s'agir de dépressions superficielles ; les *éléments de stockage temporaire*, dans lesquels l'eau est temporairement stockée puis relarguée, l'eau n'étant donc pas perdue par le système et participant à l'alimentation des débits de rivière. Le stockage temporaire est une technique largement utilisée par l'assainissement alternatif, permettant d'éviter l'arrivée concomitante des eaux de différentes zones contributives, à l'origine des forts pics de crue observés en aval (Azzout *et al.*, 1994 ; Deutsch, 2000).

2.2.4. Mécanismes d'écoulement de l'eau dans la ville

Avec l'installation de l'Homme à proximité d'un réseau hydrographique naturel, ce dernier va être fortement modifié au profit de la population (déboisement, imperméabilisation des sols, installation d'un réseau d'assainissement...), ce qui va bouleverser les mécanismes naturels et générer ou accentuer les risques liés à l'eau. Selon la nature de l'événement météorologique (fréquent, intense voire extrême), plusieurs réponses hydrologiques peuvent être constatées en milieux urbains.

1) *Mécanismes de réponses aux événements météorologiques fréquents* : la réponse diffère avec la nature de la surface réceptrice de l'événement pluvieux. Sur les surfaces imperméables, l'eau ruisselle directement et rejoint le réseau d'assainissement. Sur les surfaces perméables, une partie des eaux reçues par la surface s'infiltré, le surplus ruisselle et rejoint le réseau d'assainissement à travers la voirie. Les eaux de ruissellement reçues par la voirie rejoignent les caniveaux, où les débits sont faibles, ou ruissellent pour être ensuite interceptées par les avaloirs et donc évacuées vers le réseau d'assainissement et de là vers les stations d'épuration avant de rejoindre finalement les cours d'eau. Il arrive que le passage des eaux pluviales par une station d'épuration n'est pas systématique, ces eaux étant alors relâchées dans la nature sans le moindre traitement de dépollution.

2) *Mécanismes de réponses aux événements météorologiques intenses et extrêmes* : trois types de réponses sont possibles en milieu urbain. La crue du cours d'eau, qui conduit au débordement directement en ville ou en amont du bassin-versant, rejoint la zone urbaine à travers les grandes avenues reliant l'amont à l'aval. Dans le cas d'événements extrêmes, on a affaire à des fortes intensités pluviométriques, les seuils d'infiltration sont rapidement dépassés et le surplus d'eau se retrouve en surface. Dans le cas où la capacité des réseaux d'assainissement est dépassée, l'eau peut réapparaître en surface, en débordant à travers les

regards et les avaloirs. L'eau de débordement est renvoyée vers la voirie, accentuant ainsi les volumes ruisselés en surface.

D'une manière générale, en milieu urbain, on s'intéresse particulièrement aux eaux de ruissellement superficielles puisque l'eau qui s'infiltre est en *quasi* totalité perdue pour le système de drainage (Rousselle *et al.*, 1990 ; Zech, 1993). Ainsi, en milieu fortement urbanisé, la transformation des pluies en débit de ruissellement est générée par deux mécanismes principaux : le « mécanisme de production », défini par le pourcentage de pluie brute qui se ruisselle, et le « mécanisme de transfert de pluie nette », qui inclut les deux phénomènes générateurs des débits observés en milieu urbain, à savoir le ruissellement et l'écoulement des réseaux.

2.2.5. Facteurs anthropiques modifiant l'écoulement des eaux

Sans être exhaustif, on peut résumer les effets de l'anthropisation sur le cycle de l'eau dans un bassin-versant en trois principaux points : l'imperméabilisation, la modification de l'écoulement des eaux et les impacts écologiques et environnementaux.

2.2.5.1. Imperméabilisation

L'imperméabilisation des sols limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sous-sol. Cette imperméabilisation est à l'origine de la génération de nombreux phénomènes à risque, dont les deux principaux sont la défaillance en réalimentation des nappes et l'augmentation des volumes d'eaux ruisselant en surface. La défaillance de réalimentation des nappes est un phénomène qui peut conduire à une carence en ressources souterraines en eau. On peut citer d'autres conséquences moins immédiates mais directement liées à la baisse du niveau de la nappe tel l'affaissement du sous-sol, qui peut causer en retour une déstabilisation du bâti et des infrastructures vitales comme les routes, les réseaux d'assainissement, etc. *L'augmentation des volumes d'eaux ruisselants en surface* est la première conséquence directe de la diminution de la perméabilité des sols. L'imperméabilisation des sols est souvent utilisée, à tort, pour expliquer la survenue des grosses inondations en milieu urbain, alors qu'en réalité ce phénomène n'a d'effets significatifs que dans le cas d'événements pluvieux fréquents. A l'exception des sols sableux et des forêts denses, l'imperméabilisation des sols ne joue pas comme un facteur déterminant quand il s'agit d'événements pluvieux exceptionnels. Dans ce genre d'événement, les zones saturées sont très étendues (capacité d'infiltration rapidement dépassée par l'intensité des précipitations). Ainsi, les surfaces naturelles génèrent des volumes d'eau très proches de ceux constatés dans le cas de surfaces imperméabilisées.

2.2.4.2. Modification de l'écoulement des eaux

En milieu urbain, le réseau hydrographique est en partie voire entièrement artificialisé. Le réseau naturel est remplacé par un réseau d'assainissement souvent surdimensionné en amont, doté d'un tracé direct, à pente très favorable aux écoulements. Le réseau est ainsi conçu dans le but de diminuer au mieux sa longueur et son diamètre (moins de coûts) ainsi que son ensablement (limiter les travaux d'entretiens ; Chocat, 1997). Cette artificialisation a comme conséquences directes une réduction des forces de frottement, une accélération du

ruissellement (Desbordes, 1989), une diminution du temps de réponse et une augmentation considérable du débit de pointe. L'ensemble de ces conséquences rendent le bassin-versant beaucoup plus vulnérable et plus sensible à des événements météorologiques considérés autrefois comme courants (Desbordes, 1994). Par ailleurs, le réseau routier joue un rôle très important dans la modification des écoulements superficiels. Il réagit comme un obstacle lorsqu'il est perpendiculaire au relief : on assimile alors son rôle à celui d'une digue de rétention qui force l'écoulement à suivre un passage obligatoire. Au contraire, quand le réseau routier est conçu dans le sens de la pente du relief, il se comporte comme un véritable canal dans lequel les écoulements peuvent atteindre des vitesses très importantes, du fait de son imperméabilité et de sa faible rugosité. Qu'il s'agisse de cours d'eau canalisés, busés ou enterrés, ou bien encore de rivières enserrés entre des endiguements trop étroits et entièrement déconnectées de ses zones d'expansion naturelle en cas de crue, ces pratiques ont contribué à éliminer l'eau de l'environnement de la ville. Cette perception de « ville sèche » (terme utilisé pour la première fois par Manéglier, 1991) peut être dangereuse, car en cas d'événements intenses dépassant les capacités d'évacuation, la ville encourra un réel risque de submersion. De plus, en ville, les réseaux d'évacuation ont été calibrés pour assimiler des volumes d'eau résultants d'un événement décennal. Un réseau urbain est donc à la base vulnérable à tout événement doté d'une période de retour supérieur à 10 ans (Sieker, 1983 ; Hémain, 1986 ; Bertrand-Krajewski, 2007) A cela, il faut rajouter le fait que la ville est en constante évolution, avec une augmentation parallèle de la densité de sa population et par conséquent une augmentation des volumes d'eau usée générés. En conséquence les réseaux d'évacuation de la ville deviennent progressivement sous-dimensionnés même pour des événements hydrométéorologiques décennaux.

2.2.4.3. Impacts écologiques et environnementaux

L'artificialisation même partielle du réseau hydrographique naturel ne peut pas être sans conséquences sur son équilibre écologique. Le réseau hydrographique étant à considérer comme un « système, il suffit de déséquilibrer l'une de ces composantes pour que l'écosystème entier perde son équilibre. A titre d'exemple, en fonction de la vitesse d'écoulement au niveau du lit mineur, une espèce donnée de poisson peut ou pas s'y installer. On ne doit donc pas séparer la rivière de son environnement. Un réseau hydrographique se développe en fonction des caractéristiques physiques et biologiques du bassin-versant qu'il draine, et le fait de le déconnecter de son environnement, en le canalisant ou en l'endiguant, limite considérablement son bon état écologique. Les rejets urbains représentent une importante source de pollution des milieux récepteurs. En pays développés où pour la plupart, le réseau d'assainissement est un réseau séparé, les eaux usées passent normalement par des stations d'épuration. Quelquefois, l'exutoire naturel des eaux usées (et des eaux pluviales évidemment) est la rivière ou la mer, sans aucun traitement préalable. La qualité de ces milieux aquatiques est alors fortement dégradée.

Conclusion

L'hydrologie urbaine fait désormais partie de nombreux travaux de recherche, notamment avec l'arrivée des outils de la modélisation numérique. Néanmoins, et même si certaines conséquences directes des activités anthropiques sur les processus hydrologiques sont actuellement bien connues et identifiés, de nombreuses conséquences restent méconnues et non prévues initialement par l'aménageur. En réalité, les difficultés rencontrées par l'hydrologie urbaine ne sont pas propres à cette discipline mais émanent de la complexité spatio-temporelle des processus de genèse du ruissellement de surface et des crues.

Synthèse de la première partie

La restitution du cadre conceptuel général de la problématique de crue et de ruissellement superficiel dans les métropoles méditerranéennes, s'est avérée complexe et ramifiée, on ce rend compte rapidement de la dimension pluridisciplinaire que prend le sujet. On a défini la terminologie des concepts clés à savoir : aléa, vulnérabilité, risque ; puis on a précisé ces termes tels qu'ils sont entendus dans ce travail : 1) aléa : aléa hydrologique (*crue et ruissellement urbains*), aléa météorologique : événement cyclogénétique à développement rapide. 2) vulnérabilité : se limite dans cette étude au sens physique du terme, faisant uniquement référence à l'exposition du territoire physique à un aléa hydrométéorologique ; 3) risque : on analyse dans ce travail le risque de *crue et de ruissellement superficiel, de caractère rapide, déclenché par des configurations orageuses convectives de forte intensité et d'extension spatiale réduite et observé sur l'une des métropoles du bassin méditerranéen*.

Dans cette première partie il était également important, d'expliquer les facteurs et de souligner la complexité des mécanismes, impliqués dans la gène des phénomènes de crue et de ruissellement superficiel à l'échelle du bassin-versant. Dans le milieu urbain en plus des complexités classiques du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant, vient s'en rajouter d'autres facteurs liés aux à l'anthropisation du milieu naturel. Une anthropisation aux impacts difficilement prévisibles par les aménageurs lors de la mise en place d'un aménagement. Certes, que grâce à l'utilisation de plus en plus importante des outils de simulation et de modélisation numérique de nombreuses conséquences, directes et indirectes, des activités anthropiques sur le fonctionnement du système hydrologique sont désormais connues. Néanmoins, de nombreuses d'autres impacts restent aujourd'hui non prévisibles pour l'aménageur. Afin de surmonter ces obstacles, et pouvoir prévoir les conséquences d'un aménagement sur le fonctionnement hydrologique, on doit développer des modèles capables d'intégrer l'ensemble des paramètres (naturels et anthropiques) constitutifs de l'hydrosystème à considérer.

Deuxième partie

Les acquis sur le risque hydrométéorologique à Alger

Introduction

Chapitre 3 : Contexte sociétal du risque hydrométéorologique à Alger

Chapitre 4 : Contexte physique du risque hydrométéorologique à Alger

Synthèse de la deuxième partie

Introduction de la deuxième partie

Le support spatial est primordial dans une problématique d'ordre géographique. Afin de bien cerner les phénomènes de crue et de ruissellement superficiel dans une métropole du bassin méditerranéen, on a choisi de travailler sur la partie ouest du Grand Alger, une région qui nous semble assurée par la richesse de son tissu urbain (ville occidentales, ville arabe, et un tissu urbain métissé) la représentativité d'une grande partie des métropoles méditerranéennes, leur histoire fait également d'elle l'une des régions très exposées aux événements météorologiques de caractère intense.

Cette partie est composée de deux principaux volets, à savoir : une analyse à caractère social et une seconde à caractère physique.

Le contexte social est étudié à travers une reconstitution spatio-temporelle de l'évolution territoriale (législation, urbanisme). Pour y parvenir on a fait recours à plusieurs techniques d'analyse et de traitement (exploitation de différents types d'archive, photointerprétation, traitement numérique des images satellites).

Le contexte physique du Grand Alger sera appréhendé à travers des méthodes et d'outils d'analyse classiques et thématiques, il s'agit d'analyses géologique, géomorphologique, climatique et hydrologique. Des analyses entreprises afin de cerner les principales caractéristiques physiques de la région d'étude.

Chapitre 3

Contexte sociétal du risque hydrométéorologique à Alger

Introduction

- 3.1. Histoire du développement urbain de la ville d'Alger
- 3.2. Législation algérienne concernant le risque hydrométéorologique
- 3.3. Dynamique de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah

Conclusion du chapitre 3

3.1. Histoire du développement urbain de la ville d'Alger

Alger est une ville portuaire, bâtie en amphithéâtre sur une colline inclinée vers l'est, et culminant à 124 m. Son histoire commence au IV^e s. av. J.-C. quand les Phéniciens établissent un comptoir appelé *Icosim*, qui prendra le nom d'*Icosium* sous l'Empire romain. Au milieu du V^e s., les Vandales prennent le contrôle de la ville, qui restera longtemps sous l'empire des Byzantins. En cette époque, Alger n'est qu'une ville « secondaire » longtemps tiraillée entre les différents royaumes berbères. Elle n'obtient son statut de ville qu'au X^e s. L'histoire de la ville d'Alger peut être divisée en deux grandes étapes que nous rappelons ci-dessous.

3.1.1. Du Xe s. à 1830

En 960, l'Emir Bologhine Ibn Ziri Ibn Menad met en valeur la situation géographique et stratégique d'Alger et décide d'en faire sa capitale, devenant ainsi un carrefour maritime et un pôle commercial prédominant sur le pourtour méditerranéen. L'Espagne, dans le cadre de son projet expansionniste, occupe l'îlot Peñón en 1510. A cette époque, la population d'Alger s'accroît rapidement grâce à l'arrivée de nombreux immigrants venus d'Andalousie. En 1516, elle devient la capitale des corsaires barbaresques, après avoir appelé les frères Barbarousse en renfort pour chasser les Espagnols. A l'époque des Ottomans (*i.e.*, les turcs), Alger devient un pôle gestionnaire au sein duquel se concentre la plupart des administrations publiques. Les hauts fonctionnaires de cette époque font construire des habitations luxueuses dans la partie basse de la ville (Dar Hassan Pacha, Dar Aziza, Dar Mustpha Pacha), cette dernière devenant également un quartier d'affaires (*i.e.*, quartier des *souks*). Une très grande rue commerçante relie alors la porte de Bab-el-Oued à la porte de Beb Azzoun. En 1716, Alger est frappée par un grand séisme qui endommage une partie de la ville, sollicitant d'importantes sommes financières pour effectuer de grands travaux non seulement de réparation mais aussi d'extension de la ville entre la rue Benganif, le boulevard hahkad, la Casbah et le port. A cette époque, Alger est constitué d'un tissu urbain serrée, dotée d'un réseau de voiries étroites (absence de boulevard) et très peu développée servant uniquement à relier les différents îlots de la ville.

3.1.2. De 1830 (début de la colonisation française) à nos jours

En raison de son relief accidenté, Alger s'est développée vers le sud-est au détriment des quartiers de l'ouest et du sud dont la géomorphologie a contrarié et rendues coûteuses toutes les extensions de la ville. Cette deuxième étape de l'histoire urbaine d'Alger peut être divisée en quatre grandes phases.

3.1.2.1. 1830-1896

Dès le début de la conquête française, à cause du différend culturel opposant les colons français au mode de vie arabe et de leur désir d'imposer à la ville leur propre style architectural, d'importantes destructions ont dégradé la vieille ville, en particulier dans sa partie basse (basse Casbah). La ville perd alors toutes ces fonctions historiques (pôle commercial, centre administratif) et elle n'est plus qu'un simple lieu de résidence, dédoublée par une nouvelle

ville au style européen. Les deux villes restent totalement déconnectées l'une de l'autre. Les principaux travaux réalisés à cette époque sont : l'élargissement des voies, notamment celles de Bab-el-Oued, de Beb Azzoun et de Chartres ; l'élaboration d'un réseau de voirie urbaine hiérarchisé, conçu pour assurer la meilleure continuité spatiale ; l'aménagement de la Place d'Armes, appelée aujourd'hui Place des Martyrs, pour connecter les quartiers voisins (Bab-el-Oued, Beb Azzoun, Marine) *via* de nombreux avenues ; en 1834, l'arrivée massive d'émigrés européens favorise l'extension spatiale de la ville selon deux axes principaux, celui de la Rue d'Isly (aujourd'hui Rue Larbi Ben M'hidi) et celui de la Rue Constantine (aujourd'hui Boulevard Ben Boulaid) ; en 1968, des chemins sinueux et très difficiles ont été tracés au niveau des flancs de colline ; en 1870, la construction des remparts vers l'extérieur de la ville remplacent ceux bâties par les Turcs, détruits au début de la colonisation ; en parallèle est lancé un grand projet ayant comme objectif d'assurer l'interconnexion entre les trois principaux quartiers de la ville.

3.1.2.2. 1896-1945

La conquête des pentes s'étale jusqu'au Massif de Bouzaréah, limitant l'extension jusqu'ici limitée en largeur (l'extension était jusque là plutôt orientée plus vers l'est que vers le nord-ouest). Entre 1900 et 1910, on dénombre seulement 66 rues nouvelles. En 1920, un document d'orientation urbanistique est édité dans le but de sensibiliser les gestionnaires d'Alger à l'utilité d'établir un nouveau plan d'aménagement, avec le désir de préserver la ville ancienne. Le 4 avril 1930, un plan d'aménagement, d'embellissement et d'extension de la ville d'Alger (PAEE) est accordé dans le but de dresser les futurs grands axes d'aménagement et d'extension de la ville. Selon Hakimi (2002), « *Le PAEE constitue un fond de plan pour le plan régional. Le PAEE, avec une vue d'ensemble de la ville, est élaboré sur la base d'une approche scientifique définie par la doctrine propre à la Société française des urbanistes. Quant au plan régional, il définit la région et met en place le réseau de voirie et tente ainsi de régler les problèmes de circulation et de relations entre la ville et sa région* ».

L'établissement du premier plan régional est confié à l'architecte-urbaniste Henri Prost : étant donné le rôle que va jouer la ville contemporaine (*i.e.*, liaison et continuité entre les deux villes préexistantes), le plan régional est établi en accord avec l'ensemble des communes concernées afin de donner à Alger l'aspect d'une grande et unique agglomération. Selon Hakimi (2002), « *Le premier travail qu'ils effectuent est une enquête préalable très détaillée. Issu de cette enquête, le programme du plan régional défini par Henri Prost vise ainsi à ordonner les circulations pour atténuer l'extension en largeur et faciliter l'accès aux coteaux supérieurs. Il vise également à ordonner les constructions sur le territoire des communes de l'agglomération, comme il a été fait pour la ville d'Alger. Ce plan prévoit aussi la création de cités nouvelles pour les travailleurs algériens, ainsi que la préservation des principaux sites et vues panoramiques et la préservation d'espaces ouverts. Sont envisagés aussi le réaménagement du port et de ses abords en fonction de la construction d'une nouvelle gare maritime, et la création d'un réseau routier nouveau, devant rendre la circulation plus facile sur ce site accidenté. L'objectif du plan régional est aussi de favoriser la création d'un service permanent d'urbanisme. Dès 1933, la ville d'Alger, comprenant la nécessité de continuer les études d'urbanisme sur le territoire des communes limitrophes qui constituent sa banlieue, crée un*

service du plan régional de la ville d'Alger. Celui-ci est chargé d'établir, sous la direction de Prost et de Rotival, un plan de coordination portant sur quatorze communes⁷. C'est avec le décret du 6 novembre 1937 que la région algéroise est constituée. Elle comprend, outre les quatorze communes du précédent plan régional, quatre communes supplémentaires (Maison-Blanche, Birkadem, Ouled-Fayet et Zéralda) ».

En 1942, Renaud élabore un second plan régional, dans la continuité de celui établi précédemment par Prost. L'objectif de base de ce plan est d'aménager la ville d'Alger de sorte à lui faire pleinement jouer son rôle de capitale. Ainsi, de grands travaux sont engagés (réseau d'assainissement, liaison du port avec la ville, construction d'une gare maritime et d'une gare ferroviaire). Cependant, malgré tous les efforts effectués, les deux villes (*i.e.*, l'ancienne ville et la ville européenne), restent nettement séparées à la fin de la Deuxième Guerre Mondiale.

3.1.2.3. 1945-1962 (année de l'Indépendance)

En 1945 la crise du logement atteint son apogée. Wattez et Maisonneul, sous la direction de Prost, commencent à élaborer le troisième projet régional d'Alger, un travail qui aboutira en 1948. Les principales idées développées dans ce troisième plan serviront à l'établissement du plan proposé par le Groupement d'urbanisme de la région algéroise (GURA). Sur le terrain, on constate que l'urbanisation vers l'est continue. L'urbanisation vers l'ouest est de plus en plus importante de la fin de la Deuxième Guerre Mondiale à la veille de l'Indépendance en 1962. Les extensions vers l'est et l'ouest apparaissent quelque peu anarchiques. Le développement urbain vers l'est comprend principalement les zones industrielles (sud d'El Harrach, Rouiba, Réguaia), de grands ensembles, des cités d'urgence dont la plus grande est celle d'Oued Ouchayeh, et l'implantation d'équipements structurants (Ecole polytechnique d'El Harrach). Postérieurement au développement de la période 1945-1962 débute le développement des noyaux côtiers de l'est (Alger Plage, Tamentfoust). A l'ouest d'Alger, on implante plutôt *de grands ensembles de 15000 habitants, dont chacun est équipé d'un centre commercial* (*e.g.*, Château Neuf). Dans le sud-est, sur la bordure du Sahel et des collines, on construit aussi des cités résidentielles (cité de Crête, cité des Annassers) dépourvues de toute activité économique.

3.1.2.4. Depuis 1962

Après l'Indépendance, le développement urbain s'effectue dans les deux directions (est et ouest) et ce, de façon continue jusqu'au début des années 1970. Le développement urbain vers l'est reste cependant plus rapide et plus anarchique, eu égard aux caractéristiques physiques du site qui rendent les travaux d'urbanisme moins coûteux à l'est (pentes fortes, substrats rocheux) qu'à l'ouest (plaine). Cette extension urbaine « sauvage » a d'ailleurs nécessité la mise en place de plusieurs plans réparateurs. A partir du début des années 1970, soit 12 années après l'Indépendance, un réel débat s'engage au sujet du futur développement urbain d'Alger. Deux propositions majeures voient le jour : la première favorise l'extension vers l'est

⁷ Les quatorze communes sont : Alger, Saint-Eugène, Guyotville, Bouzaréah, Staouali, Chéragas, Dely-Ibrahim, El-Biar, Birmandrais, Hussein-Dey, Kouban, Maison-Carrée, Fort-de-l'Eau et Cap-Matifou.

et les nombreuses possibilités de connexion avec Alger centre pour permettre la continuité du tissu urbain. L'inconvénient majeur de cette proposition est que les terres sur lesquelles l'extension urbaine doit avoir lieu sont des terres agricoles de grande fertilité. La seconde proposition suggère plutôt d'orienter l'extension du tissu urbain vers les collines du sud-ouest, préservant ainsi les terres agricoles situées à l'est. L'inconvénient que présente ce choix est que les travaux d'urbanisation et d'installation des différentes infrastructures sont très coûteux vu le caractère accidenté du relief. Au final, c'est la seconde proposition qui est choisie, l'Etat ayant opté pour la préservation du potentiel agricole à l'est, supportant ainsi le coût plus élevé d'une urbanisation orientée vers le sud-ouest (Côte, 1996 ; Redjimi, 2000).

A. Plan d'Organisation Général (POG)

C'est le premier plan établi après l'Indépendance en matière d'organisation du développement urbain à Alger. Le POG est édité en 1975 par le biais d'un décret présidentiel, avec comme but principal de pousser plus vers l'est l'extension urbaine et d'organiser le tissu urbain en place en proposant des aménagements régionaux. Les travaux planifiés par le POG sont de grande ampleur mais en 1979, le projet est remis en cause car il est trop « consommateur » de terres agricoles fertiles. Le développement urbain est alors réorienté vers l'ouest sur les zones collinaires de valeur agricole moindre. Malgré la remise en cause du POG, certains des programmes prévus par ce dernier ont été maintenus, en particulier les projets du grand réseau autoroutier et d'habitat collectif. Alger connaît alors un développement très rapide, souvent non contrôlé, pour asseoir son rôle non seulement de capitale mais aussi de zones de développement de l'habitat, des administrations, des infrastructures et de l'industrie. La concentration des centres administratifs (ministères, consulats, ambassades, etc.) et de services (aéroport, port, grands hôpitaux, grandes surfaces commerciales, etc.) et des établissements éducatifs (grandes universités, écoles prestigieuses, etc.) a fait d'Alger une ville très attractive, au détriment de l'offre de logement et du développement du réseau routier. L'Etat algérien prend conscience de ce déséquilibre urbain et crée le Centre National d'Etude et de Recherche en Urbanisme (CNERU). La création de cette institution nationale constitue un tournant dans la politique de développement urbain en Algérie.

B. Plan d'Urbanisme Directeur (PUD)

Le PUD est édité en 1980 par le CNERU afin de développer l'extension d'Alger vers le sud-ouest. Les principales stratégies du PUD sont la centralisation (« ville en hyper centre »), la hiérarchisation de la structure urbaine et la polyfonctionnalité du tissu urbain, en plus de la gestion du foncier et de la maîtrise de la croissance urbaine.

C. Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU)

Ce plan a été initié en 1990 par la loi N° 90-29 relative à l'aménagement et à l'urbanisme mais il n'a été approuvé qu'en 1995. Il constitue un outil d'aménagement qui dresse des stratégies globales permettant de prendre en considération à la fois les facteurs extra-urbains et intra-urbains. C'est une sorte d'actualisation du PUD qui initiera le futur Grand Projet Urbain (GPU). Le a comme objectif principal « *la reconduction de l'ensemble des orientations ; une simple révision des dispositions spatiales par l'identification et la définition*

des plans d'occupation des sols (P.O.S) sur la base de la structuration proposée par le P.U.D et le découpage administratif (...). La mise en application de cette réforme avait nécessité l'identification du périmètre d'agglomération et l'institution d'autorités de gestion placées hiérarchiquement ; du gouvernorat du grand Alger jusqu'à l'arrondissement urbain en passant par la circonscription administrative afin d'instaurer le grand projet urbain, un dispositif de dynamique territoriale, qui vise à faire d'Alger, une ville compétitive sur le plan international » (Hadji, 2007).

D. Grand Projet Urbain (GPU)

En 1996, l'Etat crée un nouveau ministère dédié à la gouvernance de la région du Grand Alger, au renforcement de la métropolisation de la ville tout en gardant une certaine interdépendance avec les autres métropoles algériennes. En tant que capitale, Alger doit être un siège d'accueil international et compétitif, et cela sur le plan scientifique, économique, culturel, administratif et politique. Ainsi le GPU va assurer le développement territorial général d'Alger en aménageant la ville, en résolvant les problèmes de logements et d'équipement publics, en valorisant les quartiers périphériques, en améliorant le cadre de vie quotidien (transport, santé, hygiène...) et en instaurant de meilleurs systèmes de gestion des zones d'activités et d'industries. Selon Hadji (2007), les différentes interventions du GPU peuvent être classées en six principaux pôles : « *Le pôle (1) a concerné le projet d'aménagement des espaces portuaires, la réhabilitation de la Casbah et du quartier de la marine et la création de la liaison ville-mer. Le pôle (2) avait pour objectif d'actualiser les anciennes études sous une nouvelle optique. Le pôle (3) avait pour objectif de créer une zone de détente et de loisir tout en intégrant l'activité commerciale. Le pôle (4), (5) et (6) à vocation touristique et de loisirs* ». Plus tard, en 2000, avec la nomination d'un *Wali* à Alger, l'idée d'un gouvernorat du Grand Alger est écartée. Mais les grands axes stratégiques adoptés relèvent toujours d'une politique générale de métropolisation de la capitale algérienne.

3.2. Législation algérienne concernant le risque hydrométéorologique

D'un point de vue juridique, les lois relatives à la gestion des risques majeurs relèvent du droit de l'environnement. Le besoin de se protéger contre les risques majeurs a été apparu après le grand séisme d'El Asnam (l'une des wilayas de l'Algérie, aujourd'hui appelée Chlef) en octobre 1980. Une date qui marquera également l'apparition du nouveau concept « Prévention des risques majeurs » dans le discours politique algérien.

En mai 1985, le gouvernement algérien opte pour un projet de mise en place d'un plan national des risques naturels et technologiques majeurs et d'organisation de secours (plans ORSEC). Les conditions et les modalités d'organisation et de fonctionnement d'un plan ORSEC sont fixées par le décret n° 85-231 édité le 25 août 1985. Les plans ORSEC sont établis à l'échelle de la commune, donnant ainsi un aspect décentralisé à cette opération. C'est donc aux collectivités locales que l'Etat attribue la charge d'identifier les différents types de risque existants, de recenser les moyens nécessaires à mobiliser en cas de catastrophe, de définir les ordres prioritaires d'intervention, d'établir des outils de réactualisation des bases de données

(types de risque, disponibilité des moyens d'intervention) et de simuler régulièrement des situations de catastrophe afin de tester l'opérationnalité des plans ORSEC établis.

Or dans les années 1980, l'économie algérienne (industrie, commerces, éducation, santé, transports) reste dominée par l'Etat, la contribution du service privé dans l'économie nationale restant négligeable. Le décret n° 85-231 prévoyait d'utiliser l'ensemble des moyens (matériel, main d'œuvre) du service public pour mener à bien les opérations de plans ORSEC. Aujourd'hui, après l'adaptation de l'Algérie à l'économie de marché, l'Etat ne possède plus ces moyens du service public et les plans ORSEC ne sont plus fonctionnels.

Les inondations catastrophiques de Bab-el-Oued de novembre 2001 à Alger vont faire prendre conscience du grand vide de la législation algérienne en matière de prévention et de gestion des risques majeurs. Une nouvelle loi (n° 01-20) est éditée en décembre 2001, relative à l'aménagement et au développement durable du territoire, avec comme objectif de dresser « *les orientations et les instruments d'aménagement du territoire de nature à garantir un développement harmonieux et durable de l'espace national* ». Cette loi vient en complément de la loi n° 89-26 éditée en décembre 1990 relevant de la législation des finances, qui prévoit des « *fonds de calamités naturelles et de risques technologiques majeurs* ».

La loi n° 03-10 du 13 juillet 2003 est relative à la protection de l'environnement et du développement durable. Elle a été adoptée dans le but de : définir les règles fondamentales en matière de gestion de l'environnement ; instaurer à l'échelle nationale une politique de développement durable qui assure l'amélioration du cadre de vie ; sauvegarder les différentes composantes de l'environnement ; restituer les milieux endommagés ; préserver les richesses naturelles en rationalisant leurs usages ; instaurer une politique de gestion collective intégrant un large public.

La loi n° 04-20 de 2004, relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, elle présente un point de changement concernant la législation relative à la prévention des risques majeurs. Cette loi a permis de regrouper l'ensemble des règles élaborés auparavant, du fait qu'ils ont été dispersés en différentes dispositions législatives souvent édités dans le but de remédier envers un seul aspect de la problématique.

3.3. Dynamique de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah

Nous avons réalisé une cartographie de l'évolution de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah dans deux buts précis. Le premier est né du constat qu'un document cartographique synthétique n'existait pas, d'après l'exploitation de la bibliographie, alors que la cartographie de l'occupation du sol peut être très utile à la gestion du territoire par les collectivités locales. Le second vient du fait que les cartes que nous avons produites sont des données d'entrée nécessaires pour mener les simulations numériques de la réponse hydrologique du Massif de Bouzaréah que nous avons développées (cf. *infra*, chapitre 9). Ces simulations diachroniques prennent en compte l'évolution urbaine et les modifications spatio-temporelles de l'environnement en général.

L'analyse de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah s'est appuyée sur plusieurs supports cartographiques (fonds topographiques, images Google Earth, images satellitaires) et outils de SIG (ArcGIS, MapInfo) et de traitement numérique d'images (ENVI, IDRISI).

3.3.1. Cartographie diachronique (1960-2011) de l'occupation du sol, basée sur la photointerprétation et le traitement numérique d'images satellitaires

Deux principales méthodes ont été utilisées dans ce travail. La première est basée sur le principe de la photo-interprétation thématique (identification et description des principaux objets constructifs de l'environnement algérois ; interprétation visuelle concrétisée par le SIG avec édition de cartes d'occupation du sol). La seconde est celle du traitement numérique des images satellitaires. Actuellement, différents types d'outils sont disponibles sur le marché, tous (ou presque) offrant une grande convivialité et pouvant être maîtrisés en assez peu temps. Les méthodes de traitement sont multiples, certaines étant automatiques (K-means, intégrées dans les logiciels de traitement), d'autres semi-automatiques et quelques unes entièrement manuelles, dans lesquelles les classes sont définies par l'éditeur de la carte, qui doit par ailleurs avoir une très bonne connaissance du terrain.

Les documents que nous avons produits vont être présentés chronologiquement. Le choix des dates a été imposé en grande partie par la disponibilité des données. Ainsi, les cartes de l'occupation du sol ont été produites à trois dates différentes : 1960, 1986 et 2011.

3.3.1.1. Méthodes et résultats

A. En 1960

On a utilisé ici les fonds de cartes topographiques. La plus ancienne carte collectée remonte à 1879-1880 mais d'autres cartes ont été éditées en 1934. On a fait le choix de faire débiter la cartographie diachronique de l'occupation du sol à partir de 1960 car le Massif de Bouzaréah était vraiment très peu urbanisé et habité auparavant, notamment en 1979-1880. Étendre l'analyse en intégrant le XIX^e s, aurait demandé un travail de plus d'une vingtaine de jours pour une faible quantité d'information produite, on a décidé de ne pas produire une carte d'occupation du sol pour les dates antérieures à 1960. La carte topographique de 1960 utilisée a été éditée à une échelle de 1/25 000, par l'Institut Géographique National à Paris. Cette carte a été fournie par l'Institut de la Cartographie et de la Télédétection (INCT) d'Alger.

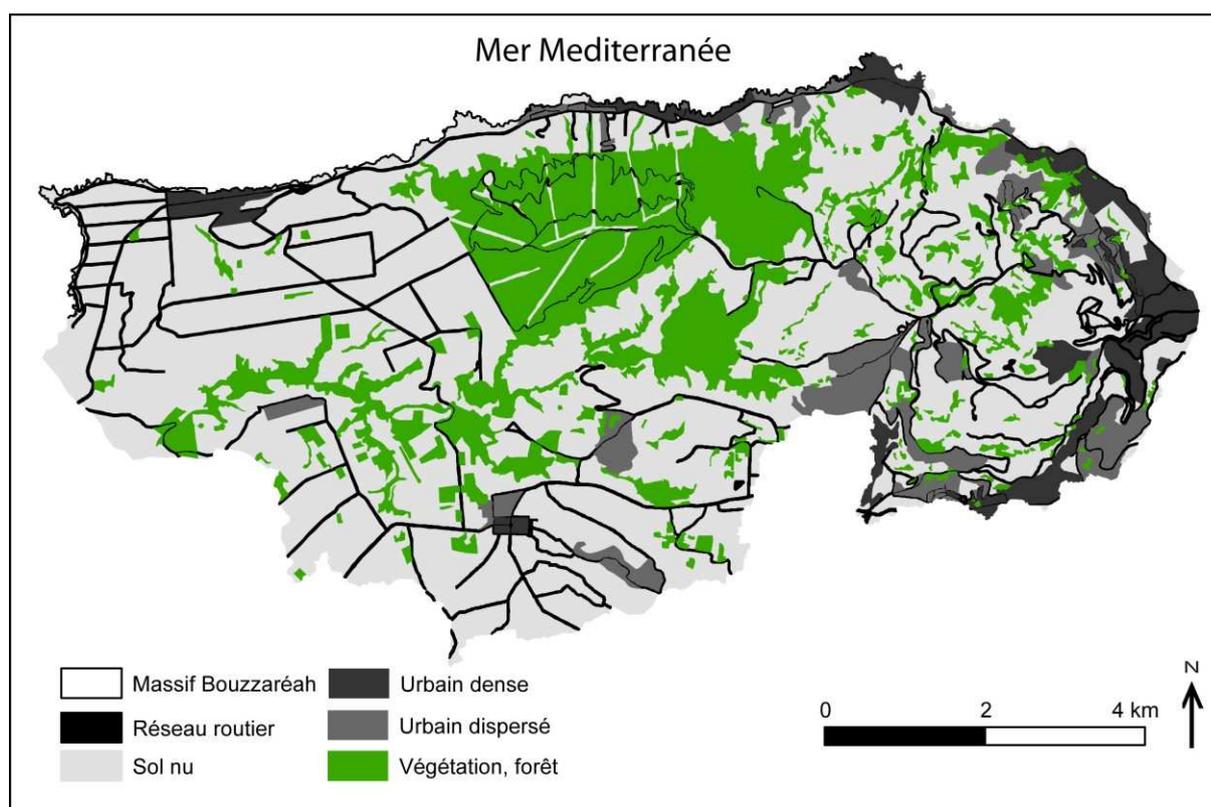


Fig. 3.1. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1960.

L'analyse de la carte topographique de 1960 montre que le Massif de Bouzaréah est très peu urbanisé (à peine 10 % de la surface totale). La zone urbaine s'étend principalement dans la partie est du massif, qui forme une continuité spatiale avec le cœur de la ville d'Alger. La moitié de la zone urbaine observée dans le massif s'étend sous la forme d'un tissu dispersé et non structuré. Certains secteurs proches du littoral sont également urbanisés, mais leur surface est très réduite. Au sud-ouest, on peut repérer un petit quartier avec un tissu urbain dense et structuré, représentant un noyau d'extension autour duquel se développe un tissu urbain dispersé.

Le couvert végétal est dominé par une végétation ligneuse haute. Il s'étend sur plus de 22 % de la surface totale du massif, dont une grande surface est occupée par la forêt de Baynam dans la partie centre-nord. Le reste du massif est occupé par les sols nus (substrat géologique principalement dans la partie est ; parcelles agricoles restant une grande partie de l'année sans couvert végétal dans toute la moitié sud-ouest).

La quantification de la répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est basée sur le calcul de la surface occupée par chaque type rapportée à la surface totale du massif. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1960.

	Surface cou- verte (m ²)	Pourcentage de couverture (%)
Urbain dense	3428779	5 %
Urbain dispersé	3647234	6 %
Végétation	6868957	10 %
Forêt	8002069	12 %
Réseau routier	3068805	5 %
Sol nu	41484436	62 %
Total	66500282	100 %

B. 1986-2011

Plusieurs types d'images ont été utilisés, les images satellitaires LANDSAT prises par des capteurs de 2^e et dernière génération, dont la meilleure résolution disponible gratuitement, pour les périodes visées, varie selon les dates et les capteurs d'acquisition entre 30 et 60 m, et la carte topographique au 1/50 000 éditée en 1986. Google Earth a fourni également des prises de vue couvrant la totalité du Massif de Bouzaréah depuis 2002. Dans cette partie, la carte d'occupation du sol présentée a été effectuée à partir de la carte topographique (1986) et des images Google Earth (2011). Tout ce qui relève du traitement numérique d'images satellitaires sera présenté dans la section 3.3.2.

a) En 1986

L'analyse est déduite de la carte topographique de 1960 au 1/25 000, fournie par l'Institut de la Cartographie et de la Télédétection (INCT) d'Alger.

En comparaison avec l'état de l'occupation du sol en 1960, on remarque que l'espace urbain, 26 ans plus tard, est plus étendu, avec de larges extensions dans les parties sud et nord-ouest. Il s'agit surtout d'un tissu urbain dispersé non structuré, qui laisse penser que l'extension urbaine se fait de façon « sauvage ». L'extension urbaine se fait au détriment des terres agricoles (de grande fertilité) présentes dans cette partie du massif. On remarque également que le couvert végétal est plus étendu par rapport à ce qu'il était en 1960. La répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau 3.2.

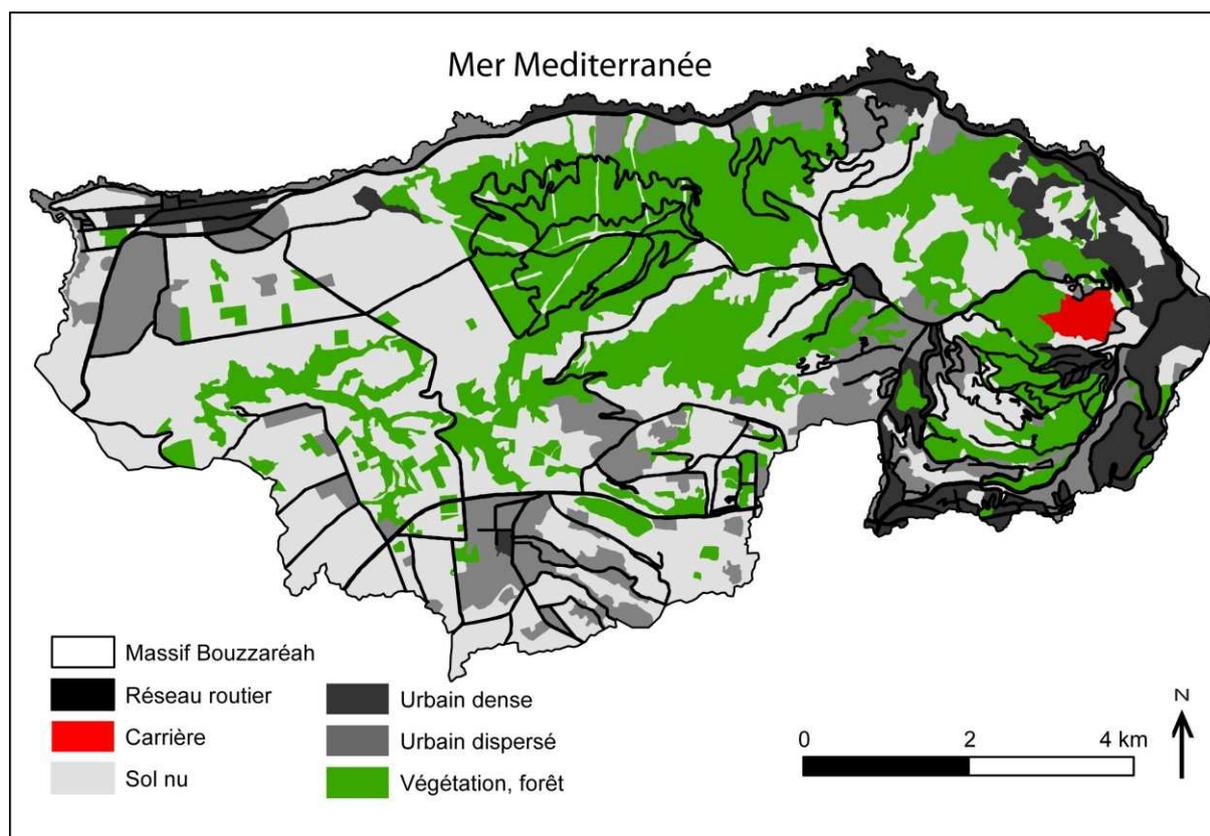


Fig. 3.2. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1986.

	Surface cou- verte (m ²)	Pourcentage de couverture (%)
Urbain dense	5689469	8 %
Urbain dispersé	9203213	14 %
Végétation	5558367	8 %
Forêt	14124383	21 %
Zone industrielle	384632	1 %
Réseau routier	2974873	5 %
Sol nu	28549530	43 %
Total	66484468	100 %

Tableau 3.2. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1986.

b) En 2011

L'analyse repose sur l'exploitation des images Google Earth zoomées à 370 m, donnant la possibilité de réaliser un travail de photo-interprétation assez précis.

L'espace urbain s'est encore étendu, et tout le tissu urbain qui était dispersé en 1986 est devenu un tissu dense. Les parties orientale et centrale du massif ont été déforestées, la forêt ayant été partiellement remplacée par un tissu urbain dispersé. On remarque aussi l'apparition de quelques petites usines industrielles qui n'occupent qu'une très faible part de

la surface totale. La répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau 3.3.

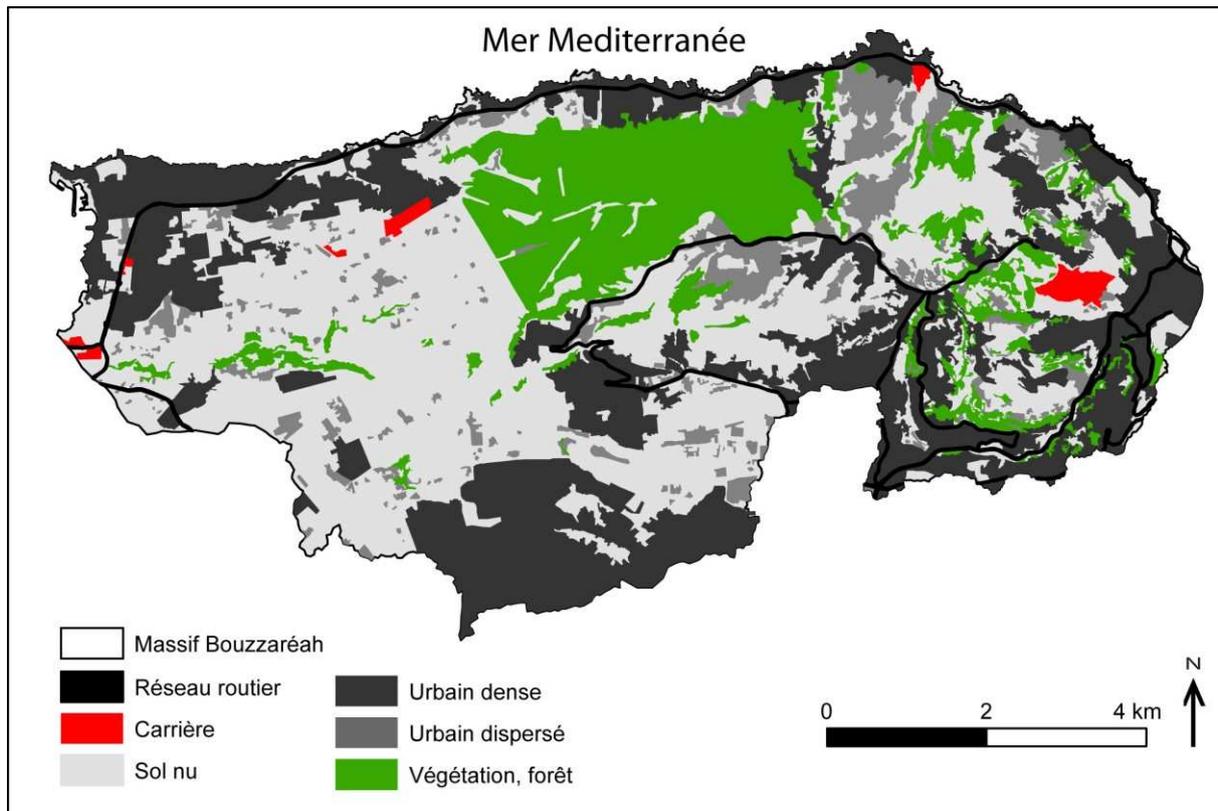


Fig. 3.3. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 10 août 2011.

Tableau 3.3. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 2011.

	Surface cou- verte (m ²)	Pourcentage de couverture (%)
Urbain dense	20950200	31 %
Urbain dispersé	5155903	8 %
Végétation	3254455	5 %
Forêt	7451541	11 %
Zone industrielle	575099	1 %
Réseau routier	628420	1 %
Sol nu	28600742	43 %
Total	66616362	100 %

3.3.1.2 Synthèse

La vision synthétique de l'évolution spatiale qu'a connu le Massif de Bouzaréah entre 1960 et 2011 est montrée par un histogramme présentant les différents types d'occupation du sol à trois dates différentes (1960, 1986, 2011 ; fig. 3.4).

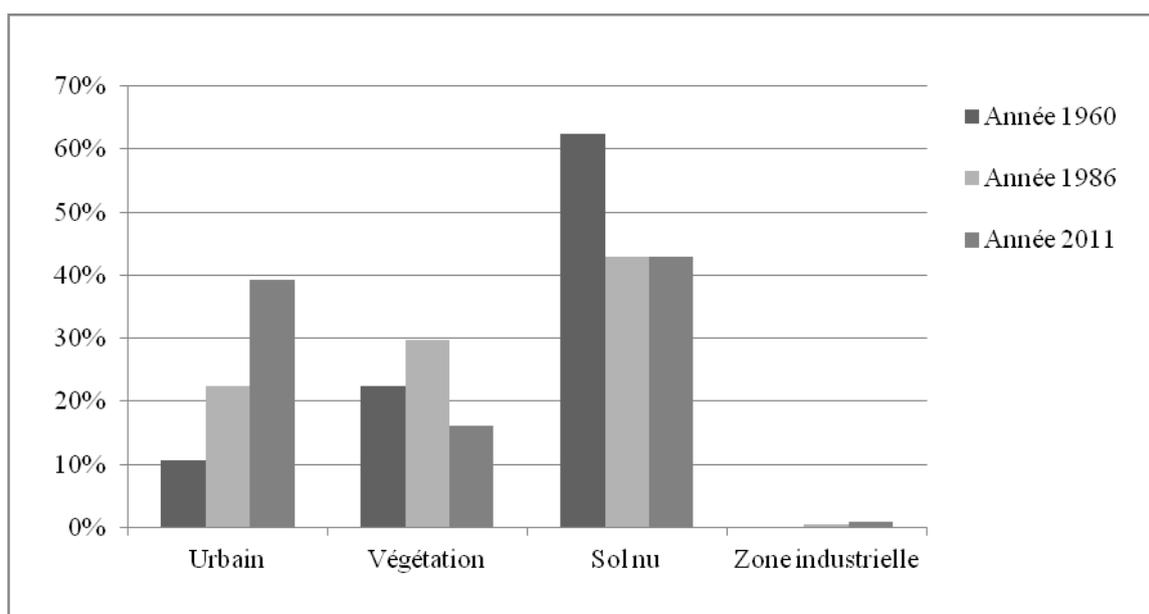


Fig. 3.4. Evolution de l'occupation du sol du Massif de Bouzaréah entre 1960 et 2011.

Entre 1960 et 2011, la surface du tissu urbain a été multipliée par 4, l'accroissement le plus marqué ayant été enregistré entre 1986 et 2011. Entre 1960 et 1986, en plus du faible taux de croissance, l'extension urbaine s'est faite d'une manière dispersée sans aucune structuration spatiale, alors qu'entre 1986 et 2011, ces zones d'extension urbaine dispersées se sont densifiées, constituant des noyaux de développement pour les nouveaux quartiers.

Le couvert végétal a connu sa plus forte extension en 1986. En 2011, le couvert végétal se contracte de moitié par rapport à la surface qu'il occupait en 1986. Cette contraction du couvert végétal s'est faite en grande partie à la faveur des espaces urbanisés.

Concernant les espaces libres, ce que l'on a appelé « sols nus » sur la carte, ce sont des espaces non occupés par le tissu urbain et non couverts par la végétation de façon permanente. Les surfaces de « sols nus » se sont contractées sur la période 1960-1986 (phénomène de déforestation pour étendre le tissu urbain, une partie des terrains étant resté en friches), pour rester stables de 1986 à 2011.

3.3.2. Images satellitaires des 2 avril 1987 et 11 septembre 2011, sources d'information complémentaires

Le but de cette partie est de proposer une alternative à la méthode de photo-interprétation présentée précédemment. On a fait pour cela le choix d'utiliser les images satellitaires de la famille LANDSAT, connues pour être de bons support à l'analyse thématique et présentant l'avantage d'une acquisition à faible coût (gratuites à partir de 30 m de résolution). La finalité ici n'est pas de produire des cartes d'occupation du sol à des dates différentes de celles présentées précédemment mais bien de produire des cartes aux mêmes dates avec une autre méthodologie. Les documents produits avec les deux méthodes, à savoir la photo-interprétation et le traitement numérique des images satellitaires, seront comparés (cf. *infra*, 3.3.3).

Etant donné que les missions LANDSAT n'ont débuté qu'à partir de juillet 1972, cela exclut *de facto* la réalisation, par la méthode de traitement numérique d'images, d'une carte de l'occupation du sol en 1960. En raison de la non disponibilité des scènes de bonne qualité réalisées lors de la mission LANDSAT en 1986, on a été contraint de traiter une image acquise en 1987. On suppose ici que le type d'occupation du sol et en particulier le tissu urbain n'ont pas significativement changé en quelques mois.

Le traitement numérique des images satellitaire a été effectué sous IDRIS, les cartes classées (traitement statistique) selon la méthode du *K-means*, qui est une classification automatique dans laquelle les réponses spectrales sont divisées en un certain nombre de classes principales (clusters) qui ne se chevauchent jamais. Les autres pixels sont attribués aux classes dont la réponse spectrale est la plus proche. Le principe est donc de minimiser le plus possible les différences intrinsèques et maximiser celles existantes entre les différentes classes.

3.3.2.1. Image LANDSAT5 (2 avril 1987)

L'image traitée a été acquise avec un satellite LANDSAT de deuxième génération, elle est de 60 m de résolution et se compose uniquement de quatre bandes spectrales. La composition colorée *in fig.* 3.4 résulte de la combinaison de trois canaux spectraux (bandes 1, 2 et 3), une combinaison qui nous paraît le mieux répondre à la nature des éléments que l'on recherche.

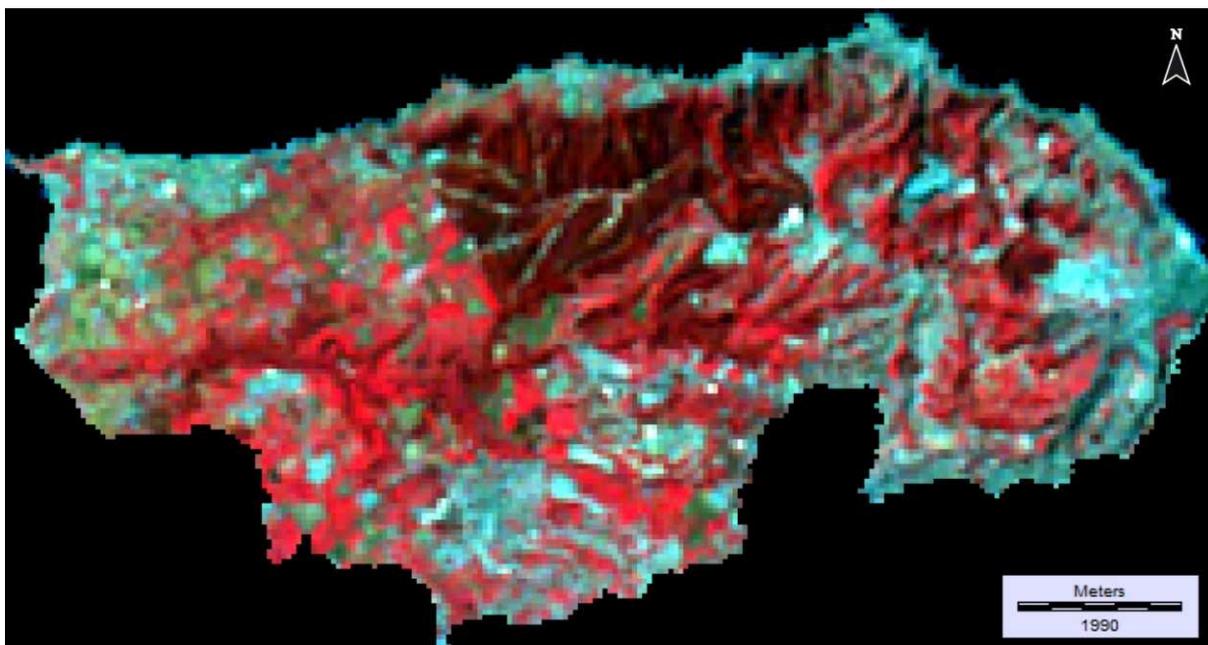


Fig. 3.4. Composition colorée d'une image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987. La composition colorée permet de proposer une première interprétation visuelle en vue d'identifier les principaux éléments qui structurent le territoire.

Les zones urbaines ressortent clairement avec une couleur proche du bleu turquoise. La végétation haute apparaît en marron, la végétation basse prend une couleur variant du rouge au rose selon la densité et le type d'espèces végétales. Les parcelles agricoles de la partie ouest du Massif de Bouzaréah en cette période de l'année sont en grande partie couvertes de végétation d'où la couleur rose clair observée, le reste des parcelles prennent une couleur ver-

dâtre (sol élaboré non couvert de végétation). Les sols nus ont une réponse très proche de l'urbain, en prenant une couleur qui varie du bleu turquoise très clair au blanc.

Grâce au classement automatique que l'on a exécuté à partir du traitement statistique de l'image avec la méthode des K-means, cinq principales classes ont pu être distinguées (fig.3.5).

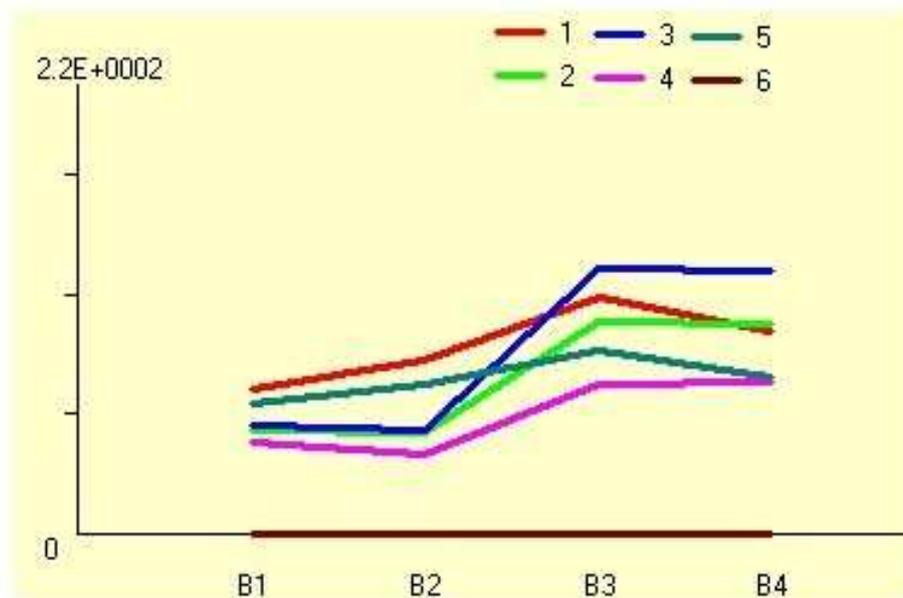


Fig. 3.5. Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987).

La classe 4 présente une réponse très faible dans le visible (B1, B2). La réponse la plus marquante de cette classe est observée dans la deuxième partie du visible (B2, B3), une réponse caractéristique du couvert végétal ; comme elle présente la réponse la plus basse dans le visible, elle correspond sans doute sur le terrain à la forêt. Les deux réponses les plus élevées dans le visible sont celles des classes 1 et 5. Les signatures de ces dernières ayant tendance à décroître dans le proche infrarouge, il s'agit donc de sols nus et/ou du tissu urbain. Néanmoins, on remarque que la classe 1 a enregistré une réponse légèrement marquée dans la deuxième partie du visible, ce qui laisse penser que la classe 1 représente plutôt des sols nus, la classe 5 le tissu urbain. La classe 3, qui représente une réponse plus élevée que celle de la forêt dans le visible, reste tout de même moins élevée que la classe de l'urbain et des sols nus et enregistre un signal très marqué dans la deuxième partie du visible. Ce comportement spectral correspondant à la réponse du végétal, il s'agit donc de la végétation basse. La classe 2 présente une courbe de tendance semblable à celle de la classe 3 (végétation basse) mais avec un pic plus faible dans la deuxième partie du visible : il s'agit des sols nus occupés en certains endroits par un couvert végétal herbacé dispersé. En se basant sur cette étude analytique de la signature spectrale, la carte d'occupation du sol présentée in fig. 3.6 a pu être réalisée.

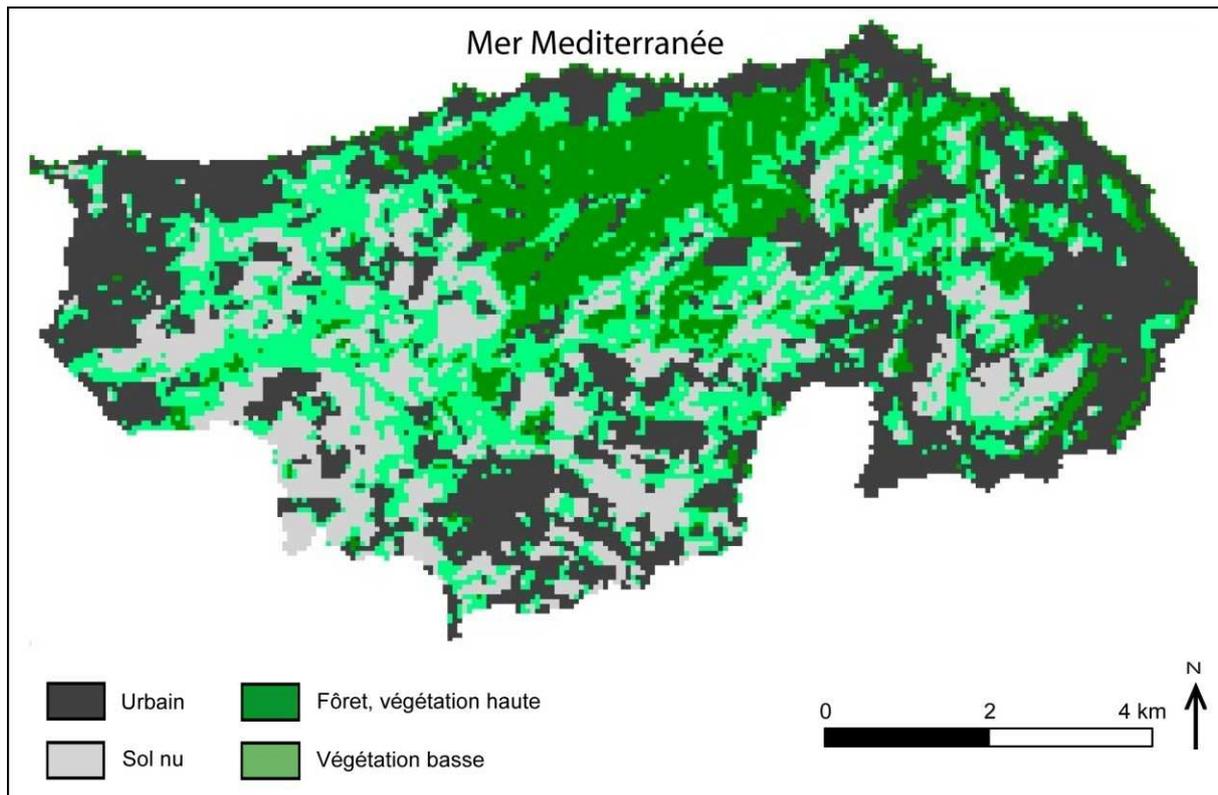


Fig. 3.6. Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987).

La quantification de la répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 2 avril 1987 (traitement d'image satellitaire).

	Surface couverte (m ²)	Pourcentage de couverture (%)
Sol nu	13309200	20 %
Sol nu, peu de végétation	1778400	27 %
Végétation basse	1258200	19 %
Forêt	11419200	17 %
Urbain	11372400	17 %
Total	66466800	100 %

3.3.2.2. Image LANDSAT5 (11 septembre 2011)

Il s'agit toujours d'une image prise avec un satellite LANDSAT de deuxième génération, de résolution 30 m et composée de sept bandes spectrales. La composition colorée présentée en fig. 3.7 résulte de la combinaison de trois bandes spectrales (2, 3 et 4).



Fig. 3.7. Composition colorée (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).

Les zones urbaines ressortent clairement avec une couleur proche du bleu turquoise, allant du foncé au très clair. La végétation haute apparaît en rouge foncé alors que celle basse et moins dense prend une couleur rouge clair. Le sol nu a une réponse très proche de l'urbain, quand il s'agit des affleurements rocheux (couleur variant du bleu turquoise très clair au blanc). En revanche, quand il s'agit de parcelles agricoles, la réponse prend une couleur verdâtre. En cette période de l'année, les parcelles agricoles sont à nu, leur réponse est pour autant très différente de celle du sol nu observé en d'autres endroits du massif. Ce constat peut être expliqué du fait que les parcelles sont formées principalement de sols rouges, donc leur signature spectrale est très différente de celle des surfaces grisâtres résultant principalement des affleurements du substrat géologique.

Grâce au classement statistique de l'image satellite, cinq différentes signatures spectrales ont pu être distinguées (fig. 3.8).

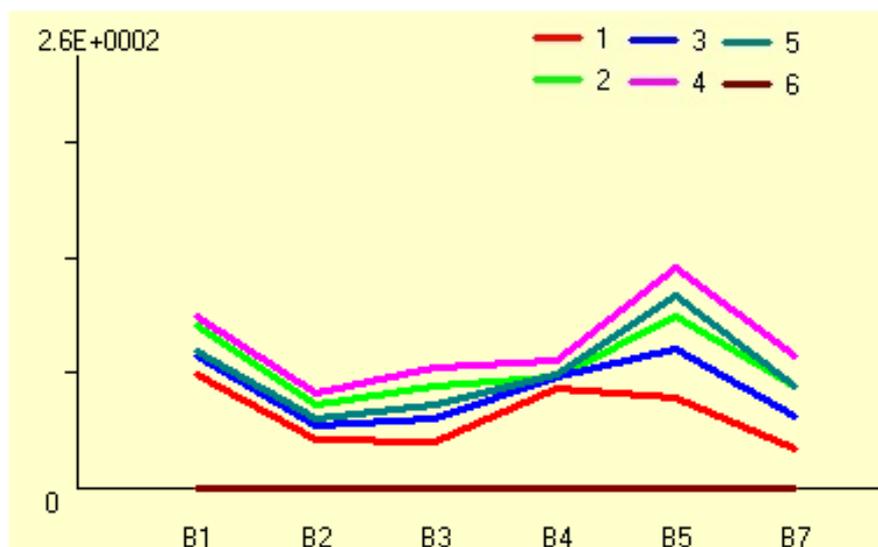


Fig. 3.8. Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).

La réponse la plus faible dans le visible est celle de la classe 1, qui enregistre sa réponse la plus marquée dans la deuxième partie du visible ; le proche infrarouge étant représenté par une courbe décroissante, la classe 1 correspond donc à la réponse spectrale de la végétation haute. La classe qui présente la réponse la plus élevée dans le visible est la classe 4, la réponse la plus marquée (pics) étant également enregistrée dans le visible. Cette classe correspond donc à la réponse spectrale d'un tissu urbain. La réponse spectrale de la classe 2 a une allure semblable à celle du tissu urbain, avec une réflectance un peu moins élevée, en particulier dans le moyen infrarouge (B5), ce qui laisse penser que le tissu urbain est associé à des sols relativement humides. Cette classe correspond à un tissu urbain dispersé ou, du moins, moins dense que celui de la classe 4. La classe 5 enregistre une réflectance moins élevée que celle du tissu urbain dans le visible. Elle reste tout de même plus élevée que celle de la végétation, sa réponse la plus marquée étant enregistrée dans le visible : il s'agit donc de sols nus. La classe 3 représente dans le visible une réponse plus élevée que celle de la végétation haute mais cette réponse reste beaucoup moins élevée que celle d'un tissu urbain ou encore des sols nus. La réponse de cette classe commence à croître à partir du B3 (proche infrarouge) pour atteindre son acmé dans le moyen infrarouge (B5) : ce comportement spectral peut être attribué à une végétation basse dispersée sur sol humide. L'analyse de la signature spectrale nous a permis de produire la carte d'occupation du sol présentée *in* fig. 3.9.

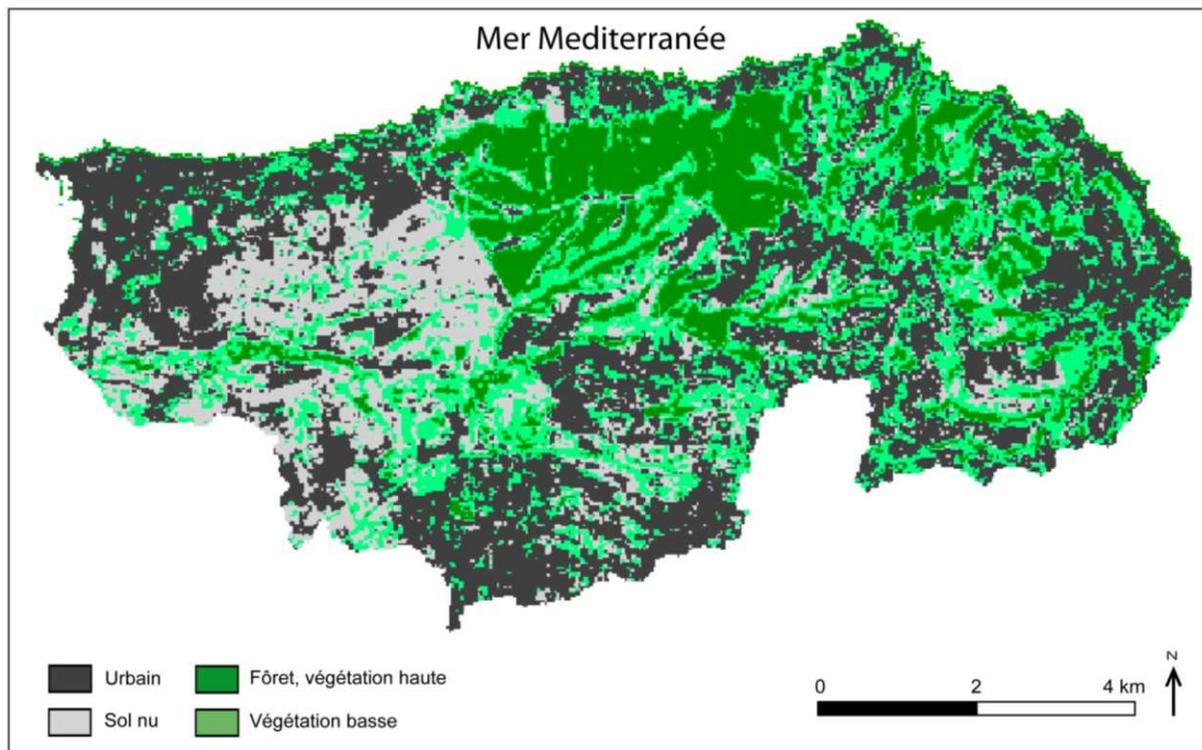


Fig. 3.9. Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).

La quantification de la répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 11 septembre 2011 (traitement d'image satellitaire).

	Surface couverte	Pourcentage de couverture
Sol nu	11714400	18 %
Sol nu, peu de végétation	17381700	26 %
Forêt	11093400	17 %
Urbain	26435700	39 %
Total	66625200	100 %

3.3.3. Confrontation des résultats photo-interprétation vs. traitement numérique des images satellitaires

3.3.3.1. Occupation du sol en 1987

Le tissu urbain ne présente pas une variabilité significative sur les différentes images traitées (annexe 3.2), ni sur les différentes méthodes utilisées. Néanmoins on a remarqué que pour l'image prise durant le mois d'août (LANDSAT 5 composées de quatre bandes spectrales), le pourcentage des zones reconnues comme urbaine est de près de 15 % plus élevé que celui relevé avec la méthode de la photo-interprétation fig. 3.10. Cette différence s'explique soit par le fait qu'une carte topographique au 1/25 000 ne permet pas de calculer avec une précision satisfaisante l'espace occupé par le tissu urbains. Une première hypothèse aussitôt rejetée en observant le pourcentage d'occupation enregistré avec les images prises aux mois d'avril et juin, dont on remarque que les surfaces calculées avec les deux méthodes sont très proches (près de 5 % de différence). La deuxième hypothèse est que le tissu urbain a tendance à être surestimé dans le cas de l'image prise en août. En réalité, le mois d'août est le mois le plus sec de l'année (taux d'humidité très faible) ; dans de telles conditions, la réflectance du tissu urbain et celle des affleurements rocheux est presque la même et au cours d'un classement automatique, ces derniers sont probablement mis dans la même classe.

Des différences dépassant 10 % peuvent être relevées dans les différentes classes de sols nus et de végétation, d'après les calculs *via* le traitement numérique des différentes images satellitaires acquises en 1987. On remarque sur l'histogramme que des différences intrinsèques suivent une croissance logique : les pourcentages de la végétation atteignent leur maximum au printemps, au moment où les surfaces non couvertes enregistrent les pourcentages les plus faibles. Les deux classes, végétation et sol nu, présentent également de larges différences selon les méthodes utilisées : se posent alors les questions de la date exacte de recueil des données, la végétation basse a-elle été prise en compte lors de la réalisation de la carte ?

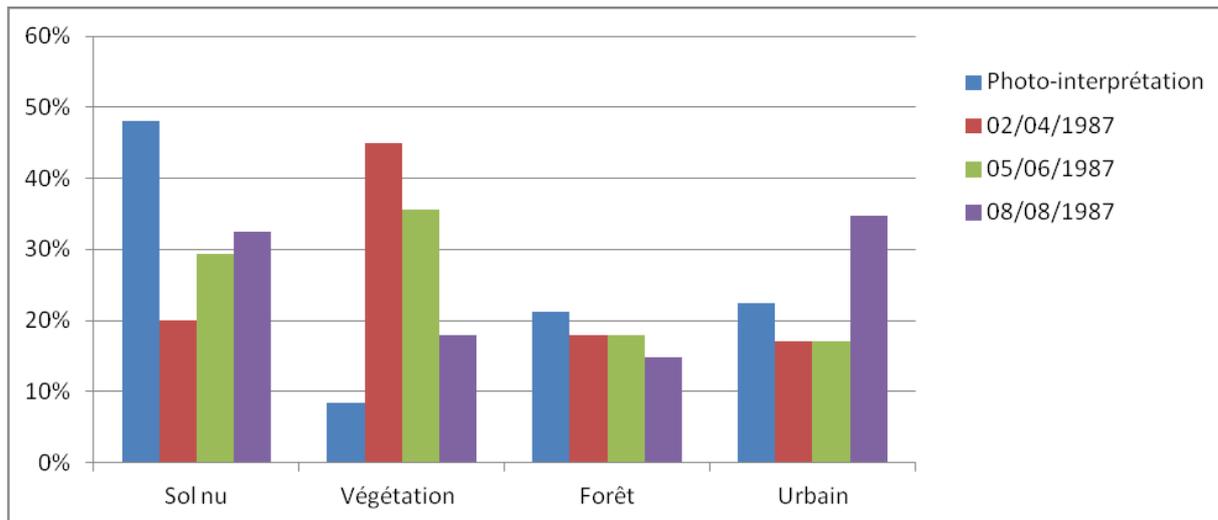


Fig. 3.10. Répartition spatio-temporelle des classes d'occupation du sol dans le Massif Bouzaréah obtenue avec deux méthodes différentes

Une légère différence est également observée entre la surface de la forêt calculée le mois d'avril et celle calculée le mois d'août (en pleine saison de sécheresse). L'explication de cette baisse est simple : le climat étant méditerranéen, la sécheresse commence au mois de juin et après deux mois, certaines zones de forêt deviennent plus ouvertes et seront par la suite classées végétation basse. Cependant, ce phénomène peut être facilement repéré en observant les cartes de compositions colorées correspondant aux différentes dates.

La confrontation des deux méthodes, révèle que grâce à la carte topographique d'une échelle de 1/25 000, la classe d'occupation de la forêt a pu être reproduite avec une marge d'erreur de près de 4 %, ce qui reste très raisonnable si on considère les quelques mètres carrés que peut gagner ou perdre la forêt selon la saison (la forêt est plus dense en hiver qu'en saison sèche l'été). Le tissu urbain, le sol nu et la végétation basse varient significativement selon les méthodes utilisées, et types (résolution, nombre de bandes spectrales) et date de prise de l'image satellite traitée (cf. *supra*). On peut également penser que les images satellitaires à 30 m de résolution ne permettent pas de distinguer avec précision les différentes classes d'occupation dans le Massif de Bouzaréah. Cette dernière hypothèse pourrait être vérifiée en analysant des cartes à haute résolution.

3.3.3.2. Occupation du sol en 2011

Pour permettre une confrontation concluante des résultats, on a fait le choix de traiter deux images satellitaires supplémentaires, l'une acquise le 11 septembre 2011 et l'autre le 13 octobre 2011, les deux dates étant très proches de la prise de vue de Google Earth (8 octobre 2011) traitée précédemment. Les résultats de cette confrontation sont présentés *in* fig. 3.11

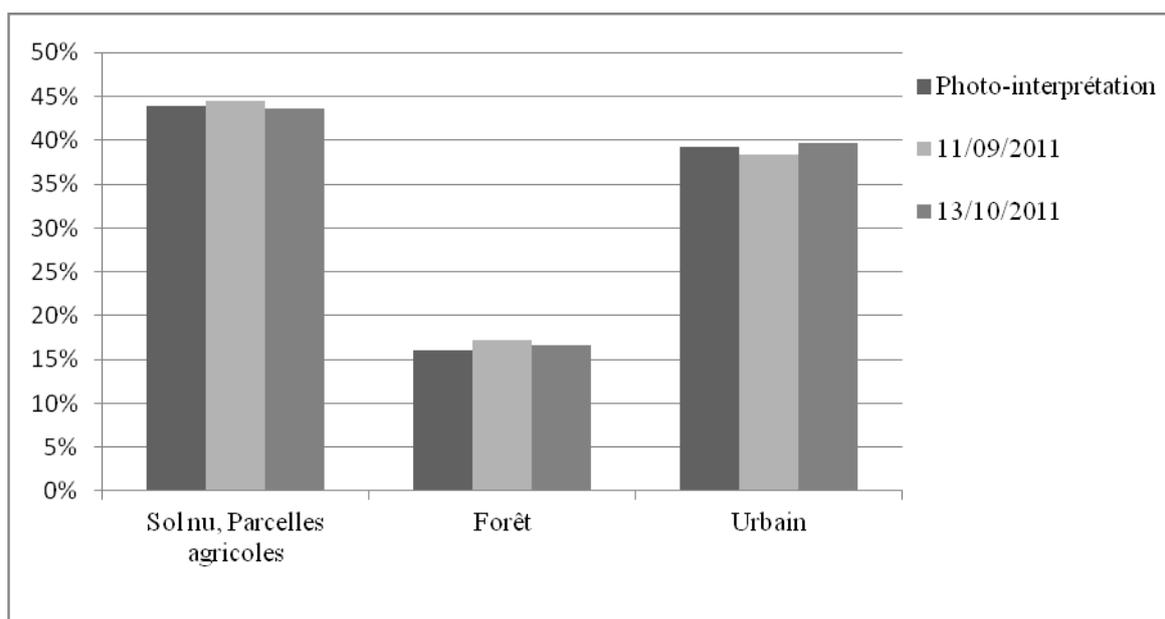


Fig. 3.11. Répartition spatio-temporelle des classes d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah obtenue avec deux méthodes différentes.

Les résultats sont très satisfaisants au niveau de toutes les classes d'occupation du sol existant dans le Massif de Bouzaréah : aucune différence significative n'a été enregistrée entre les deux méthodes. Les images Google Earth et LANDSAT à 30 m de résolution sont donc deux méthodes pertinentes pour définir les principales classes d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah.

Conclusion

L'objectif de faire aujourd'hui d'Alger un territoire compétitif et attractif sur le plan économique, social et culturel n'est pas totalement atteint. La ville souffre encore de nombreuses imperfections, d'ordre qualitatif et quantitatif, au niveau de ses infrastructures et d'insuffisances (moyens de transport collectifs, réseau routier en comparaison avec le flux entrant chaque jour dans la capitale) ce qui a de néfastes répercussions sur la dynamique économique et sur la gestion des risques hydrologiques.

La confrontation des résultats obtenus avec la méthode de photo-interprétation et ceux obtenus avec le traitement d'images satellitaires a permis de mettre en évidence deux principaux résultats méthodologiques. 1) Le travail de photo-interprétation mené à partir du fond de carte topographique au 1/25 000 doit être complété par d'autres documents (photographies aériennes, plans cadastraux) et un travail de terrain. 2) Une image LANDSAT de 30 m de résolution, gratuite et facilement acquise, donne accès à une évaluation qualitative et quantitative fiable des principaux types d'occupation du sol existant dans le Massif de Bouzaréah.

Chapitre 4

Contexte physique du risque hydrométéorologique à Alger : caractérisation et intérêt de l'étude

Introduction

- 4.1. Caractéristiques physiques régionales
- 4.2. Massif de Bouzaréah

Conclusion

Introduction

Alger est une métropole méditerranéenne bâtie sur les contreforts des collines du Sahel algérien. Elle a été affectée à plusieurs reprises par des aléas hydrométéorologiques de forte magnitude qui ont engendré des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts matériels majeurs. Ce chapitre analyse les caractéristiques physiques régionales (climat, structure, hydro-géomorphologie) afin de préciser la prédisposition naturelle, les mécanismes de genèse et le niveau de risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah et le Grand Alger.

4.1. Caractéristiques physiques régionales

4.1.1. Relief et structure

4.1.1.1. Principales unités de relief

La chaîne de l'Atlas, qui s'étire du Maroc à l'ouest jusqu'à la Tunisie à l'est, marque la limite entre le nord de l'Algérie, méditerranéen, et le sud caractérisé par un climat aride. Le pied de cette chaîne coïncide en plusieurs endroits avec la limite actuelle de la Mer Méditerranée. Dans d'autres secteurs, des zones collinaires viennent s'intercaler entre la mer et la chaîne montagneuse de l'Atlas (fig. 4.1). Tout comme le reste des zones côtières algériennes, la région d'Alger est assez accidentée par des reliefs contrastés.

On peut distinguer cinq principales unités de relief dans la région d'Alger :

- Massif d'Alger : il mesure 20 km de longueur et 6 km de large, se présente sous la forme d'un chaînon orienté E-W culminant à 407 m d'altitude et fait partie intégrante du Maghrébides. Sa topographie est très accidentée et il draine un réseau hydrographique dense et très encaissé par endroits.

- Sahel d'Alger (appelé également Massif d'Alger) : il se présente sous la forme de collines et de croupes étendues sur 60 km de longueur aux sommets ne dépassant pas 260 m d'altitude. D'orientation E-W, il s'intercale entre le Massif d'Alger au nord et les rives de l'oued El-Harrach au sud et au sud-est. Il est bordé au sud-ouest par les rives de l'oued Nador. Le Sahel d'Alger est communément décomposé en deux parties, l'une dite Sahel occidental (zone côtière), l'autre dite Sahel oriental, dans le prolongement naturel du premier. La principale différence entre les deux est topographique. Le premier est formé par un ensemble de croupes avec des altitudes souvent comprises entre 50 et 200 m tandis que le second est formé principalement de collines dont l'altitude ne dépasse guère 80 m.

- Plaine de la Mitidja : elle correspond à une plaine de remblaiement s'étalant sur 1300 km², selon une orientation ENE-WSW. Elle s'intercale à 40-50 m d'altitude entre le Sahel et le piémont de l'Atlas tellien.

- Massif de Chenoua : ses chaînons orientés E-W culminent à 905 m d'altitude. Il forme une unité montagneuse très accidentée, en contact brutal avec la mer Méditerranée, et entaillée par des ravins étroits de forme en V.

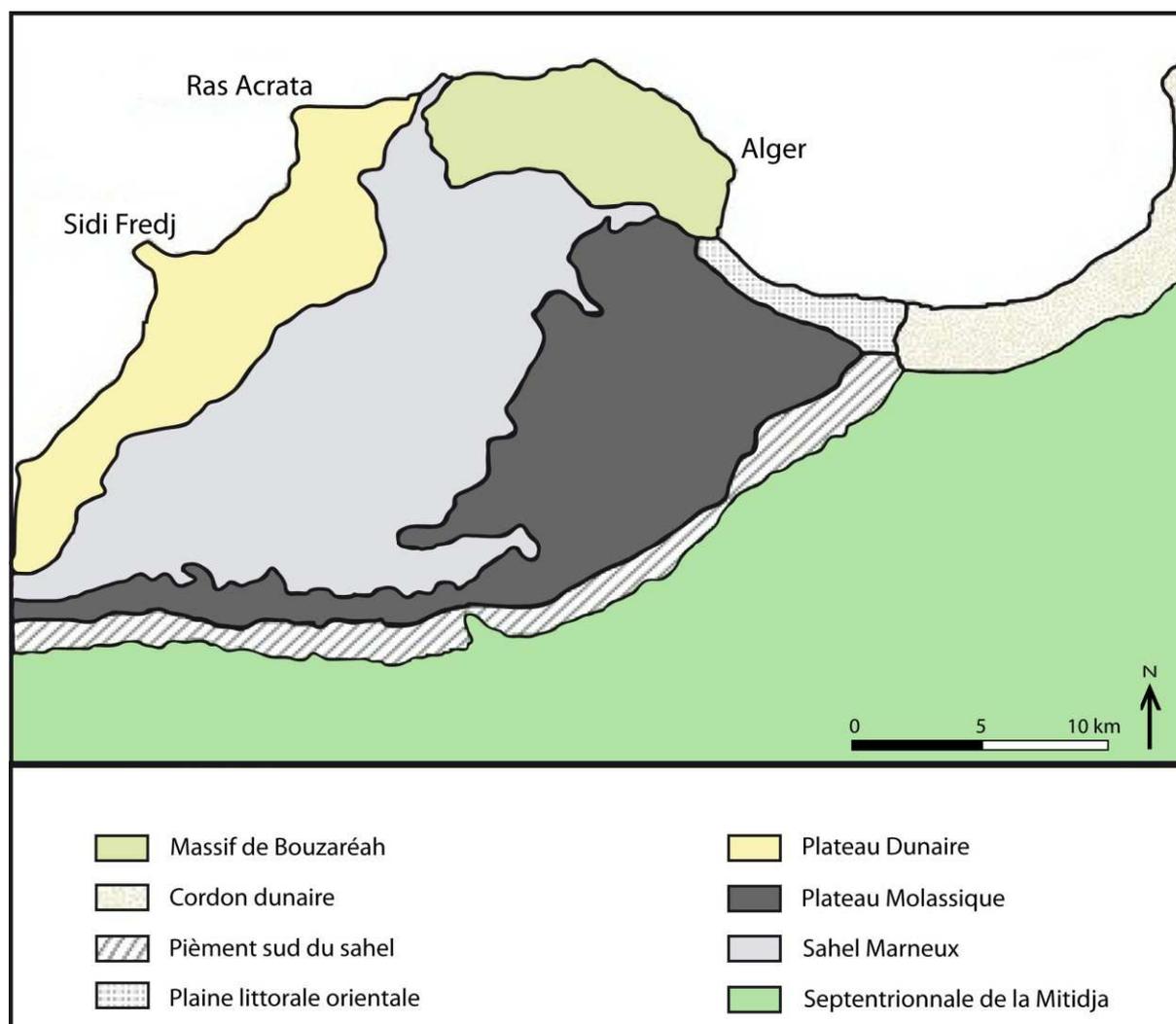


Fig. 4.1. Unités de relief dans la région d'Alger.

- Plaine de la Mitidja : elle correspond à une plaine de remblaiement s'étalant sur 1300 km², selon une orientation ENE-WSW. Elle s'intercale à 40-50 m d'altitude entre le Sahel et le piémont de l'Atlas tellien.

- Massif de Chenoua : ses chainons orientés E-W culminent à 905 m d'altitude. Il forme une unité montagneuse très accidentée, en contact brutal avec la mer Méditerranée, et entaillée par des ravins étroits de forme en V.

- Piémont atlasique : il présente une vraie barrière physique face aux influences maritimes, par ses altitudes qui peuvent dépasser 1600 m.

4.1.1.2. Structure géologique

La géologie du nord de l'Algérie est complexe en raison notamment de sa structure. Dans cette étude, on s'est basée sur les travaux de Ficheur (1896), Glangeaud (1932), Royer (1933), Ehrmann (1938), Lambert (1948), Delage (1888), Ben Allal et Ourabia (1992) et Mancer (1999), ainsi que sur les cartes morphostructurales au 1/500 000 et hydrogéologique au 1/200 000 de la région d'Alger.

4.1.1.2.1. Unités morphostructurales

D'une manière générale, la structure géologique permet d'individualiser trois unités, du sud au nord : le domaine pré-atlasique ou atlas saharien ; le domaine atlasique des Hauts Plateaux, appelés également hautes plaines ; le domaine tellien. Les deux premières unités constituent ce que l'on appelle le bâti alpin, relié directement à la plate forme saharienne au sud.

Le domaine tellien, qui forme en grande partie les Maghrébides, constitue la partie périméditerranéenne du système alpin. Notre zone d'étude se situe dans le domaine tellien (cf. *infra*), communément subdivisé en deux grands domaines :

- Tell septentrional (ou zone interne) : bordé par la mer Méditerranée au nord, limité au sud par l'accident sud kabyle. Sa structure est complexe (massifs cristallins internes ; formations paléozoïques, dorsale calcaire, flyschs, bassin néogène post nappes). Le massif cristallin interne inclut le Massif de Bouzaréah.

- Tell méridional (ou zone externe) : limité au sud par le front sud des nappes telliennes, le tell méridional est constitué par 1) les unités autochtones ou parautochtones constituées de terrains parfois paléozoïques mais surtout mésozoïques légèrement métamorphisés, affleurant sous forme de nappes ou dans des fenêtres et résultant de la combinaison d'une activité érosive et de bombements anticlinaux postérieurs aux déplacements tangentiels) et les nappes telliennes formées des unités autochtones ou allochtones constituées de nappes pelliculaires nettement imbriquées sur une épaisseur de 2 à 3 km, quasiment toujours jalonnés de Trias gypso-salin et surmontant le parautochtone qui présente l'unité inférieure.

D'autres formations peuvent être observées, affleurant au-dessus des unités précédemment évoquées. Il s'agit de structures argilo-gréseuses correspondant aux flyschs du Crétacé, de l'Eocène et de l'Oligocène, et qui peuvent remonter jusqu'au Miocène.

La région du Sahel d'Alger est une zone riche en morphostructures causées par la surrection. La faille la plus importante est celle du Sahel qui s'étale sur plus de 90 km selon une orientation NE-SW ; considérée comme une faille inverse, elle est subdivisée en plusieurs segments. On peut évoquer aussi la faille de Bouzaréah, d'orientation WNW-ESE, qui marque la limite nord du bassin subsident de la Mitidja.

4.1.1.2.2. Evolution paléogéographique

L'histoire géologique de l'Algérie du Nord est polyphasée. Ses grands traits structuraux sont apparus suite à deux principaux événements tectoniques, à savoir les orogénèses hercynienne et alpine. Mais c'est surtout cette dernière qui a marqué l'histoire géologique de la région.

L'évolution paléogéographique et tectonique est focalisée sur le Sahel et la Mitidja, partie nord du domaine tellien et incluant la zone étudiée. La limite morphostructurale séparant le Sahel de la Mitidja est très marquée, résultant d'une zone d'effondrement à la fin du Pliocène et au début du Quaternaire. Le Sahel s'inscrit dans une structure plissée anticlinale qui s'est soulevée suite à une phase tectonique débutée au Pliocène supérieur et qui s'est poursuivie au Quaternaire. La Mitidja s'inscrit dans une structure plissée synclinale (Ficheur, 1896 ; De Lamothe, 1911 ; Gautier 1932 ; Aymé, 1964 ; Glangeaud, 1952 ; Bennie *et al.*, 1982 ; Saoudi,

1989). La paléogéographie et la tectonique de la Mitidja et du Sahel d'Alger se suit à travers quatre cycles évolutifs (Ben Abdelouahed *et al.*, 2003) :

- Cycle de l'Eocène : à la fin de l'Oligocène, les formations anciennes ont acquis une structure en écaillés et en plis complexes. A la fin du Lutétien s'amorce une phase de régression marine avant une phase de soulèvement de l'Atlas.

- Cycle du Miocène : au Miocène inférieur, la mer continue à occuper toute la Mitidja alors que les processus de sédimentation et de plissement sont de plus en plus actifs. Un début de subsidence s'amorce au Burdigalien. La fin du Miocène moyen est marquée par une régression quasi totale de la mer, ce qui se traduit par une forte sédimentation détritique. La régression marine continue au Miocène supérieur, accompagnée d'une activité tectonique distensive et l'émission de roches éruptives.

- Cycle du Pliocène : une transgression marine se traduit par une large sédimentation marine avant que la mer n'entame une régression. La submersion du Plaisancien favorise des phénomènes de sédimentation en mer profonde. La mer, qui transgresse sur une large zone sans pour au temps gagner le pied de l'Atlas tellien, déposent des marnes sur les formations du Miocène. A la fin de l'Astien, une phase de plissement surélève l'Atlas alors que le synclinal de la Mitidja s'enfoncé, laissant apparaître l'anticlinal du Sahel. L'Atlas est soumis à une forte activité érosive, les produits de cette dernière vont gagner et combler en partie le bassin de la Mitidja, entamant ainsi la phase de remblaiement villafranchienne.

- Cycle du Quaternaire : la Mitidja est remblayée par les apports résultant de la forte activité érosive dans l'Atlas. Les dépôts mis en place au cours du Villafranchien sont entièrement érodés à la fin du Pléistocène. Les oueds creusent des lits profonds et les cônes de déjection progradent vers la plaine. Selon Glangeaud (1952), la partie centrale de la Mitidja est en subsidence continue, ce qui justifie une activité sédimentaire très active.

4.1.2. Climat

4.1.2.1. Caractéristiques générales

L'Algérie, par sa localisation en bordure de la Méditerranée, est dotée d'un climat méditerranéen, depuis la frange littorale (longueur : 1200 km) au nord jusqu'aux montagnes de l'Atlas tellien au sud. Dans la partie nord du pays, la pluviométrie moyenne annuelle varie de 400 mm (à l'est) à 1200 mm (à l'ouest ; fig. 4.2).

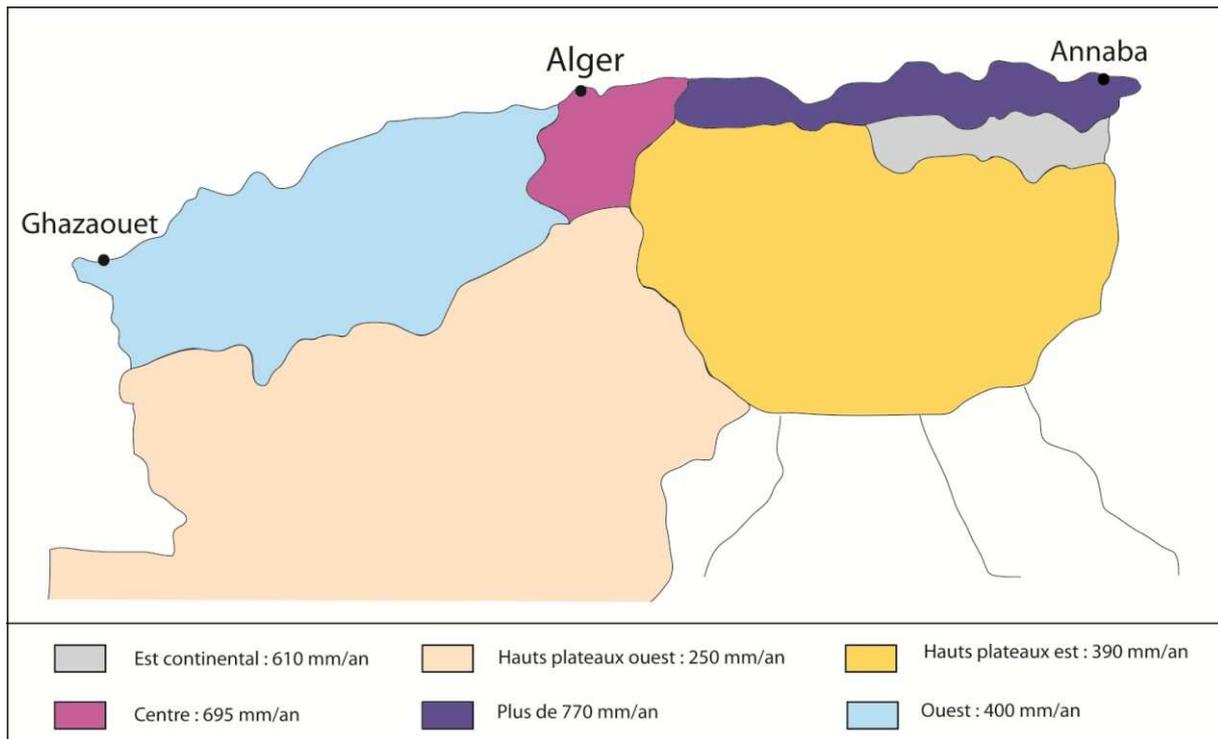


Fig. 4.2. Carte pluviométrique du nord de l'Algérie (ONM, 2010).

Le climat nord algérien est marqué par deux saisons contrastées : une saison fraîche et humide en hiver et une saison chaude et sèche en été (fig. 4.3).

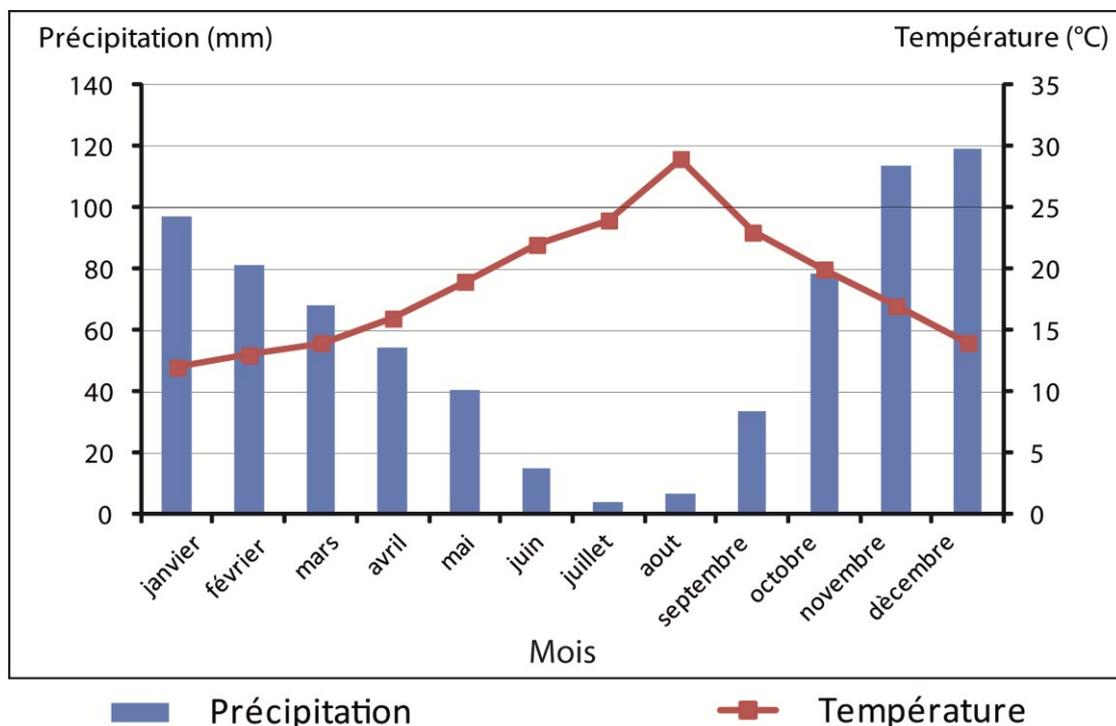


Fig. 4.3. Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Bouzaréah.

La période pluvieuse s'étend de septembre à mai avec 96,35 % (soit 686,19 mm) des précipitations annuelles. La période sèche dure de juin à août avec 3,65 % (soit 26 mm) des précipitations annuelles.

4.1.2.2. Événements météorologiques méditerranéens de forte intensité

Le climat méditerranéen de l'Algérie l'expose à des épisodes météorologiques de caractère intense. La Mer Méditerranée représentant une source de chaleur et d'humidité, les températures en eau atteignent leurs maximums à la fin de l'été et en automne. Durant cette période, l'air continental qui arrive sur la Mer Méditerranée est souvent plus froid et plus sec. La rencontre des deux masses d'air est favorable à la formation de perturbations convectives. Le potentiel latent de ces dernières va être libéré à la rencontre du premier obstacle capable de forcer l'ascension de l'air (Doswell, 1982 ; Romero *et al.*, 1998 ; Buzzi et Foschini, 2000 ; Ferretti *et al.*, 2000).

Quels sont les mécanismes intervenant dans la genèse des événements météorologiques méditerranéens de forte intensité ? Si tous les bassins versants sont concernés et ce, quelle que soit la saison, les mécanismes à l'origine des perturbations majeures n'ont pas toujours la même ampleur (Maheras *et al.*, 2001). La connaissance des mécanismes de formation et d'évolution de ces événements intenses reste délicate, particulièrement à méso- et micro-échelle, en raison de la multitude des processus impliqués dans leurs genèses, ainsi que leurs chevauchements et interactions souvent non linéaires. Les mécanismes intervenant dans la genèse des événements intenses sur la Mer Méditerranée peuvent être classés en trois catégories selon leur échelle temporelle (de quelques heures à plusieurs jours), leur échelle spatiale (dizaines à plusieurs centaines de kilomètres) et les conditions initiales régnant sur le milieu au moment de leurs genèses (Argence, 2008).

4.1.2.2.1. Cyclogenèses

Un cyclone se présente sous la forme d'une grosse masse nuageuse dotée de mouvements en spirale qui convergent tous vers l'axe de la dépression (œil). Plus on s'approche du cœur de la dépression, plus la température augmente, plus la pression diminue et plus les précipitations s'intensifient. En moyenne, le diamètre d'une dépression est de 20-50 km (max. 200 km). Les dépressions prennent naissance au-dessus des eaux tropicales ou subtropicales. Elles sont dotées d'activités convectives organisées qui se manifestent par des pluies torrentielles, des tornades souvent accompagnées de vents violents. Pour qu'une telle configuration atmosphérique ait lieu, il faut réunir un certain nombre de conditions :

- La disponibilité d'une source importante d'humidité et de chaleur est primordiale, les cyclones prennent toujours naissance au-dessus des eaux océaniques humides et suffisamment chaudes. L'humidité en se condensant dans l'atmosphère alimente le cyclone par l'énergie dans les premiers temps de son cycle de vie, pour pouvoir demeurer, avant le rivage. La chaleur compte à elle présente un double rôle, c'est un élément indispensable dans le mécanisme d'évaporation, mais elle présente aussi une source d'énergie en elle-même, et cela par le transfert direct de la chaleur océanique à l'atmosphère ;

- La présence de la force de Coriolis, induite par le mouvement rotationnel de la Terre. Cette force est à l'origine des mouvements tourbillonnaires dans le cyclone.

D'après les travaux d'Alpert *et al.* (1990), Maheras *et al.* (2001), Trigo *et al.* (2002) et Argence (2008), la cyclogenèse est un phénomène assez fréquent sur la Mer Méditerranée ; on

y compte, particulièrement en hiver, le nombre de cyclogenèses le plus élevé au Monde (Pettersen, 1956 ; Radinovic, 1987 ; fig. 4.4).

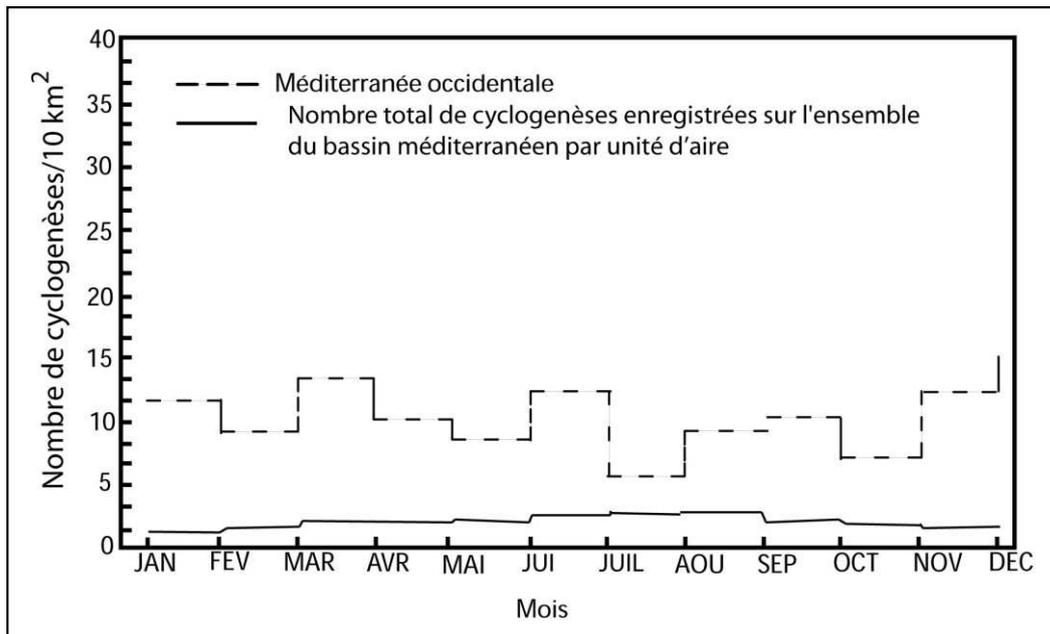


Fig. 4.4. Nombre total de cyclogenèses détectées sur 105 km² sur la Méditerranée occidentale et nombre total de cyclogenèses enregistrées sur l'ensemble du bassin rapporté à la surface (modifié d'après Trigo *et al.*, 2002).

La formation de cyclones sur la Mer Méditerranée, dans les conditions climatiques actuelles, est impossible. Ainsi tous les phénomènes de ce type observés sur la Méditerranée ne peuvent être que des restes de cyclones formés sur les océans et entraînés sur la Méditerranée *via* l'Atlantique. En été, la cyclogenèse est caractérisée par le développement de nombreuses dépressions thermiques d'amplitude le plus souvent faible, alors que l'automne et l'hiver sont plutôt des périodes affectées par des événements intenses à développement rapide. Les événements de cyclogenèse observés en Méditerranée sont principalement d'origine barocline et dotés d'un champ de pression perturbée, avec un fort gradient de température et un fort vent thermique. Mais ils peuvent être également d'origine orographique.

4.1.2.2.2. *Systèmes perturbés provenant de l'Atlantique Nord*

Les dépressions cycloniques d'origine l'Atlantique qui arrivent sur la Mer Méditerranée fournissent la majeure partie des précipitations reçues par cette dernière. Lorsque les conditions synoptiques le permettent, des situations de blocage se produisent ; la dépression reste stationnaire et déverse son contenu sur la Mer Méditerranée et le continent proche (Argence, 2008). Ces dépressions présentent une source non seulement d'apports pluviométriques mais aussi de danger. En arrivant sur la Méditerranée, elles peuvent en effet générer une cyclogenèse très réactive qui devient dans certains cas une « bombe météorologique » (Conte, 1986 ; Homar *et al.*, 2003). Les régions situées au voisinage de l'Océan à l'ouest de la Méditerranée (Espagne, France, pays du Maghreb) sont les premières exposées. Le reste de la Méditerranée n'est tout de même pas à l'abri car dans la réalité, les dépressions circulent sans aucun obstacle notable et peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres en dépassant le Moyen-Orient.

4.1.2.2.3. Systèmes convectifs de méso-échelle et orages orographiques

A. Systèmes convectifs de méso-échelle

Les phénomènes météorologiques de type convectif naissent suite à un réchauffement de la surface du sol et propulsent les masses d'air humide vers les couches supérieures et instables de l'atmosphère. Si la quantité d'eau est suffisante dans l'air ascendant pour atteindre l'état de saturation, des cellules convectives naissent et sont à la base de la formation des systèmes orageux. L'organisation des cellules orageuses est décrite grâce aux images radars sous trois formes distinctes : orages unicellulaires ou orages d'impulsion (fig. 4.5) ; orages multicellulaires formés de plusieurs cellules convectives à différents stades de développement et pouvant générer des épisodes pluvieux d'une violence importante (fig. 4.6) ; orages supercellulaires formés d'une seule cellule géante qui atteint à la maturité un diamètre variant de 20 à 50 km (fig. 4.7).

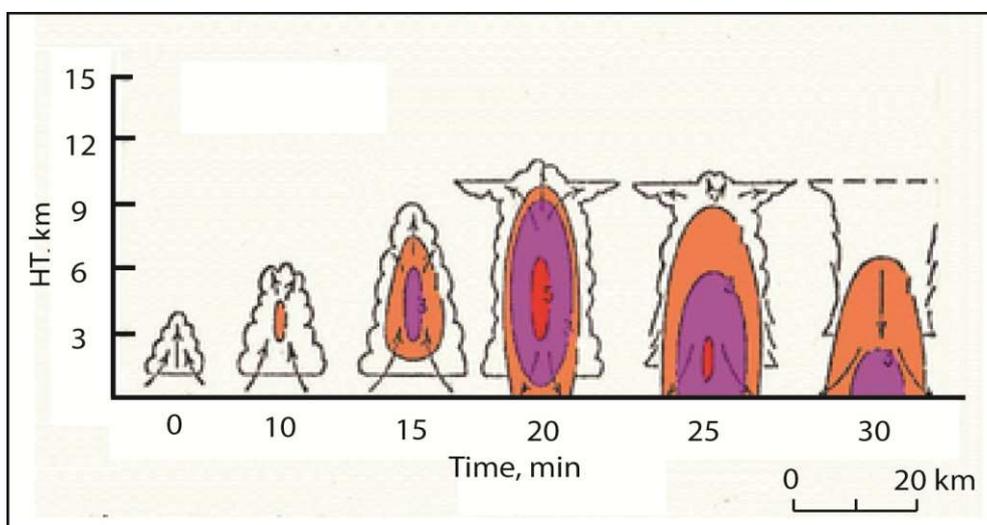


Fig. 4.5. Schéma d'un orage unicellulaire (adapté de Wilk *et al.*, 1977).

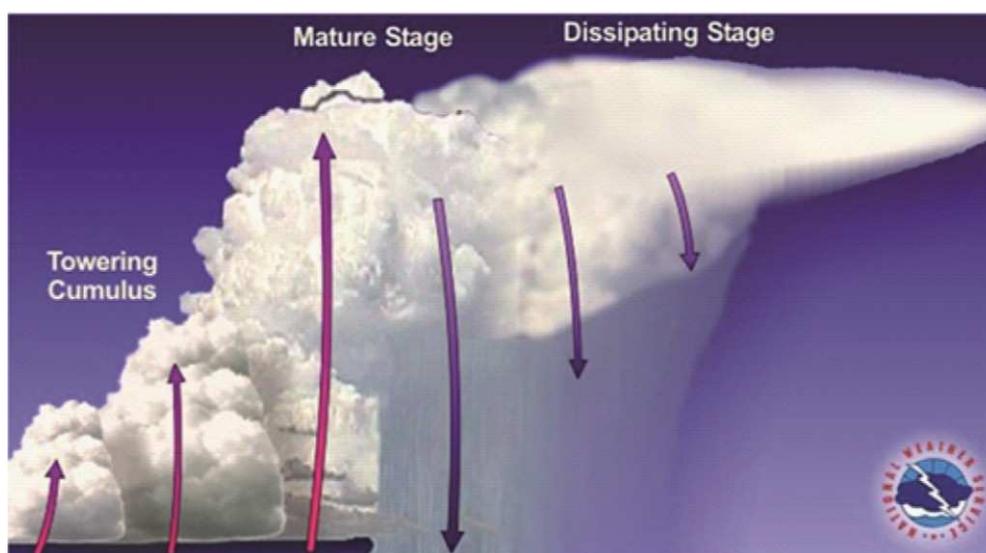


Fig. 4.6. Schéma d'un orage multicellulaires (adapté de NOAA).

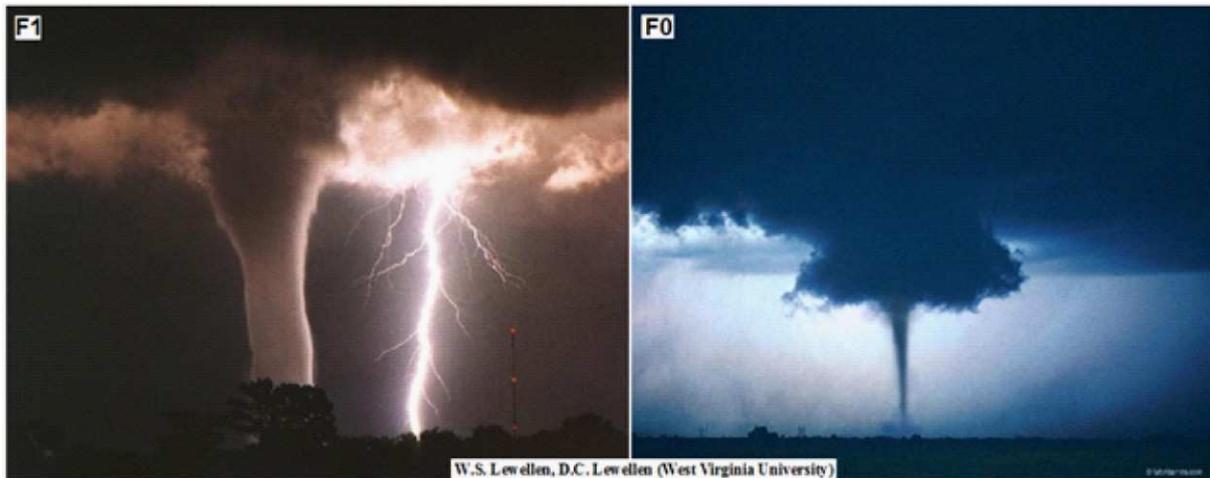


Fig. 4.7. Aspect des tornades subtropicales (d'ordre F1, F0).

B. Orages orographiques

Ce type d'orages se forme sur les reliefs jouant le rôle de barrière physique face aux flux d'airs chauds et humides de caractère instable. Ainsi, des nuages se forment et restent stationnaires le long du relief et la charge nuageuse se déverse là où elle s'est formée (système spatialement localisé). L'orage persiste tant que les écoulements d'air continuent à l'alimenter (Speranza *et al.*, 1985 ; Pichler *et al.*, 1995).

4.2. Massif de Bouzaréah

Cette partie a comme objectif la caractérisation des différents facteurs physiques contrôlant la dynamique du Massif de Bouzaréah : le contexte géologique local, les formations superficielles et les dynamiques géomorphologiques et leurs impacts sur le comportement hydrologique. Pour mener au mieux cette analyse, nous avons découpé le Massif de Bouzaréah en trois principales unités hydrologiques correspondant à trois bassins versants contributifs, à savoir : les bassins versants côtiers, le bassin-versant de Beni Messous et le bassin-versant de l'Oued Koriche (fig. 4.8).

4.2.1. Contexte géologique local

L'histoire géologique du Massif de Bouzaréah est déduite de plusieurs travaux de différentes natures et époques : géologique (Glangeaud, 1931, 1932 ; Royer, 1937), pétrographique (Royer, 1933), travaux de synthèse (Moussu, 1962), géologique et stratigraphique (Mahdjoub, 1981 ; Saadallah, 1981).

Le Massif de Bouzaréah (appelé également Massif d'Alger), forme un chaînon E-W de 20 km de longueur et de 6 km de largeur culminant à 407 m d'altitude. Il est situé à l'ouest d'Alger, en bordure de la Mer Méditerranée, limité au sud par le bassin de la Mitidja et à l'ouest par les dépôts discordants du Néogène. Il est structuré en plusieurs unités tectoniques qui se superposent ou sont séparées par des contacts anormaux orientés E-W (fig. 4.9).

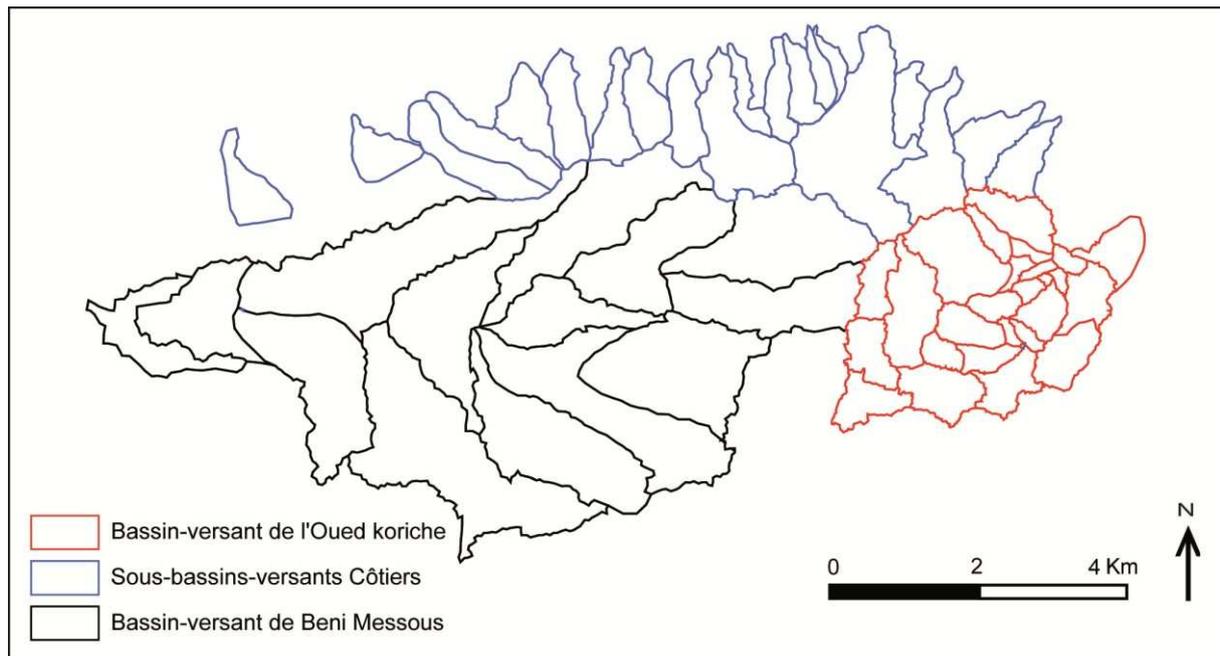


Fig. 4.8. Unités hydrologiques contributives du Massif de Bouzaréah.

Les formations géologiques constituant le Massif de Bouzaréah se succèdent comme suit :

- Primaire : les terrains sont cristallophylliens, affleurant sur la *quasi* totalité de la surface du massif. Ce sont des roches métamorphiques plus ou moins fortement tectonisées (calcaires métamorphisés, schistes, micaschistes, gneiss).

- Tertiaire : marqué par une lacune de l'Eocène et de l'Oligocène, le Pliocène marneux affleure en discordance sur le Primaire métamorphique. Les marnes bleues du Plaisancien (2 à 4 m) se retrouvent à la base de quelques falaises côtières. Les mollasses astiennes sont des formations argilo-sableuses et gréseuses ou argilo-gréseuses souvent verdâtres (glauconie). Cette formation est très abondante et occupe presque toute la banlieue d'Alger.

- Quaternaire : ce sont des terrains gréseux, formés principalement par des sables argileux, affleurant sur les flancs nord du Sahel.

4.2.2. Substrat, formations superficielles et dynamiques géomorphologiques

La morphologie actuelle du Massif de Bouzaréah est le résultat d'une érosion active exercée sur le massif ancien et dont témoignent les produits de l'altération recouvrant les micaschistes et les calcaires métamorphisés. Les facteurs de contrôle de l'évolution géomorphologique de la région sont d'ordre physique (relief, structure, climat, hydrologie) et/ou anthropique (défrichement, pratiques agricoles mal adaptées, aménagement du territoire en milieu urbain).

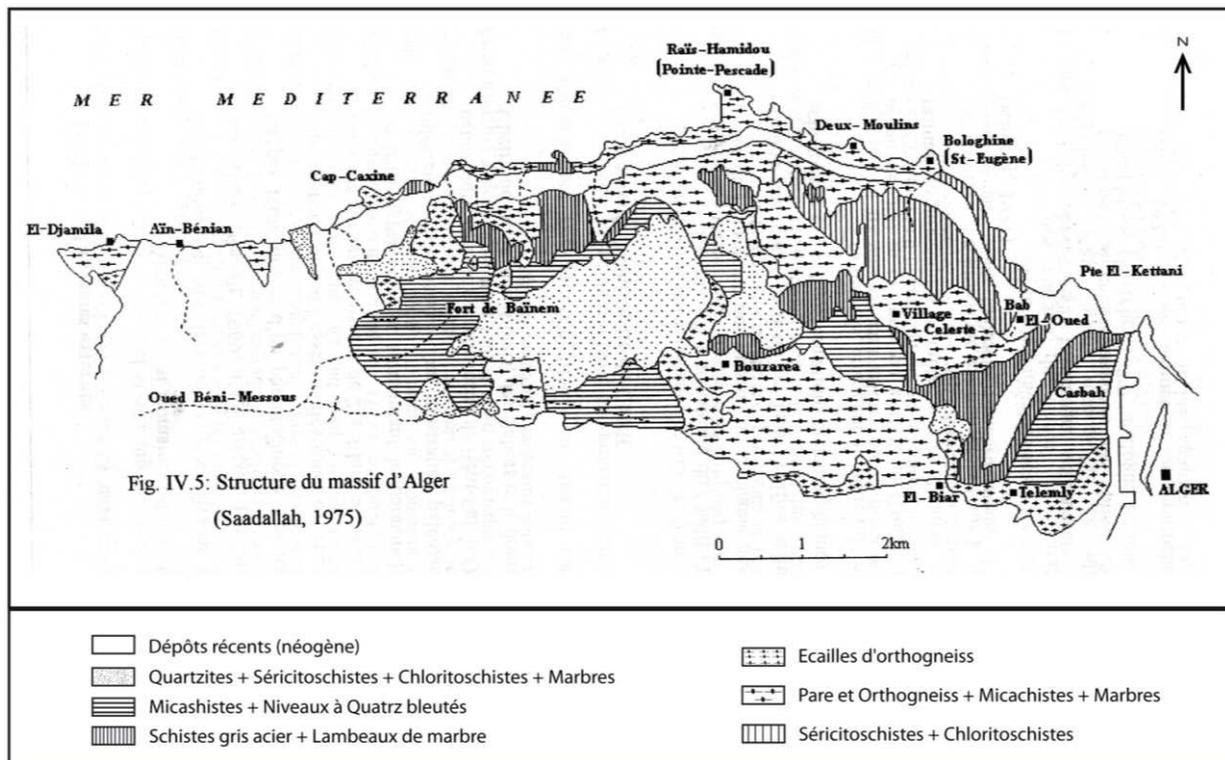


Fig. 4.9. Structure du Massif de Bouzaréah (Saadallah, 1975).

4.2.2.1. Processus d'érosion

L'activité érosive reste aujourd'hui très active. Plusieurs processus morphodynamiques peuvent être identifiés :

- Altération : les roches fissurées et riches en feldspaths (micaschistes, gneiss) sont favorables au phénomène d'altération.
- Mouvements de masse (glissement superficiel, solifluxion laminaire) : ils affectent principalement les terrains marneux et sont à l'origine de la forme bosselée observée sur certains versants.
- Erosion hydrique de type ravinement (rigole, ravin) ou coulée boueuse sur les versants : elle se développe préférentiellement dans des formations moyennement résistantes voire tendres comme les marnes argileuses.
- Erosion torrentielle dans les fonds de vallée : elle n'est pas à proprement parlé lithodépendante ici.

4.2.2.2. Affleurements géologiques, formations superficielles et dépôts anthropiques

Le titre insiste sur le distinguo de base qui doit être fait entre les affleurements du substrat géologique (roches en place) et les formations superficielles définies par Campy et Maicaire (1989) comme étant « constituées de sédiments et de roches exogènes et volcaniques, demeurés à l'interface lithosphère-atmosphère depuis leur mise en place sur les continents, disposés en une ou plusieurs unités d'épaisseur métrique à décamétrique, avec ou sans rela-

tion génétique avec le substratum, mais étroitement associées à l'évolution du relief actuel dont ils sont l'expression lithologique ». Dans ce travail, nous accordons un intérêt particulier aux formations superficielles. Car lorsqu'il s'agit de phénomènes de crue et de ruissellement de surface, les formations superficielles ont un rôle important non seulement dans la détermination de la nature et l'intensité de la réponse hydrologique (ruissellement hortonien, ruissellement par dégradation de l'état de surface, détermination des aires contributives saturées...) mais aussi du fait qu'elles représentent un facteur prédisposant au déclenchement des mouvements superficiels de terrain lors des épisodes pluvieux et qu'elles fournissent aux écoulements leur charge solide.

Nous avons classé les différents types d'affleurements (substrat géologique, formations superficielles, formations anthropiques) en se basant sur les travaux réalisés par le BRGM (2005) ainsi que sur nos propres observations de terrain.

Pour produire la carte des affleurements (substrat géologique, formations superficielles, formations anthropiques ; fig. 4.10), le BRGM (2005) s'est servi de la carte géologique de l'Algérie au 1/50 000 (feuille de Cheraga) ainsi que d'une collection de 90 rapports d'étude géotechniques. Sur le terrain, l'étude du sous-sol s'est appuyée sur des sondages de l'ordre de 10 à 15 m de profondeur (voire plus quelquefois). La résistance des terrains a été mesurée à l'aide de pénétromètres statiques. La sismique réflexion a été utilisée afin d'évaluer le cisaillement des terrains. La texture granulométrique des terrains a été effectuée en laboratoire de sédimentologie.

Ces travaux mettent en évidence douze types d'affleurements géologiques, formations superficielles ou dépôts anthropiques. Nous les présenterons ici depuis les plus anciennes (substrat géologique) jusqu'au plus récentes (formations superficielles, dépôts anthropiques).

4.2.2.2.1. Substrat géologique

- Roches cristallines ou métamorphiques résistantes (RR) : elles se caractérisent par des faciès résistants : quartzites, gneiss, micaschistes, calcaires métamorphiques à grain fin et lenticulés dans les schistes. Les calcaires métamorphiques affleurent principalement au nord et au nord-est du Massif de Bouzaréah. Les quartzites restent plus localisés.

- Schistes altérés (SA) : ces terrains métamorphiques fortement tectonisés datent de l'ère primaire. Ils sont très étendus dans le massif, affleurant principalement au centre et à l'est. Leur niveau d'altération superficiel dépassent 0,5 à 1 m, voire plus : ils sont très sensibles aux phénomènes de glissement de terrain et de ravinement.

- Grès burdigaliens (GB) : reposant directement sur le socle, ils affleurent au sud du Massif de Bouzaréah, en particulier en bordure de la voie rapide de Frais Vallon. Il s'agit de grès grossiers à fins et relativement consolidés mais friables, localement sableux, marneux ou même calcaire contenant des éléments du socle (quartzite, schistes) plus ou moins roulés et de tailles diverses (millimètre à décimétrique).

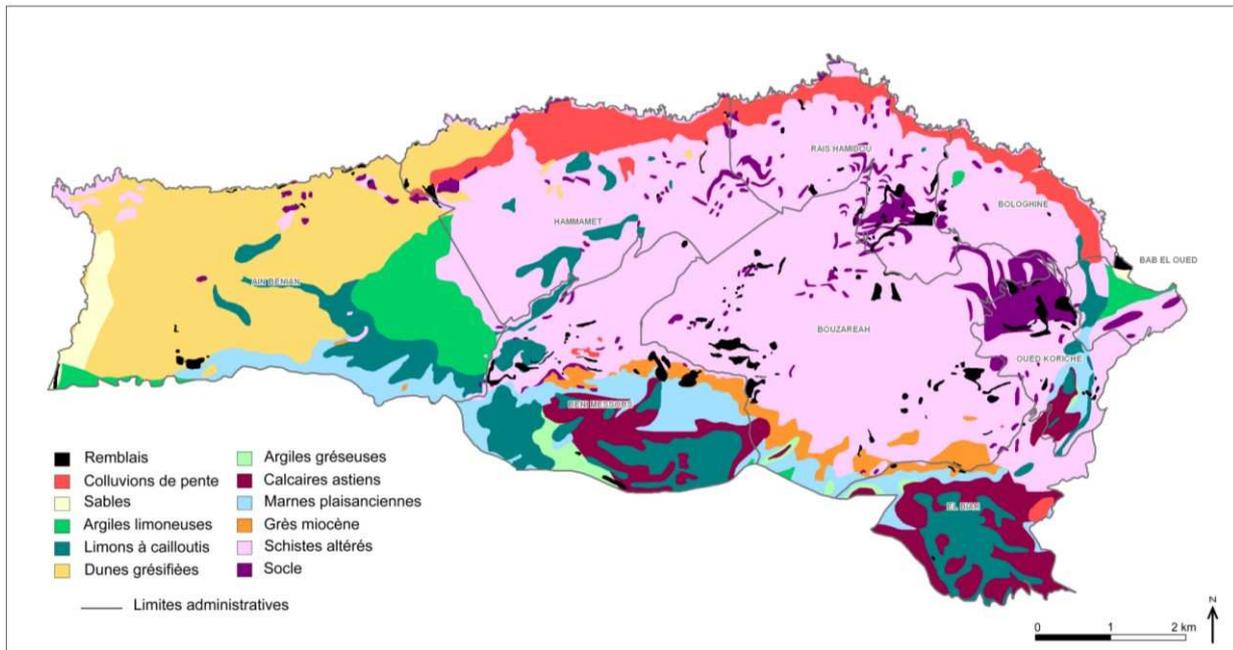


Fig. 4.10. Carte lithologique du Massif de Bouzaréah (BRGM, 2005).

- Limons à cailloutis pontiens (LC) : ces formations sont principalement présentes au sud et au sud-ouest du Massif de Bouzaréah ainsi qu'à son extrémité orientale. Leur granularité est hétérogène. Dans les communes de Beni Messous, de Bab-el-Oued, d'El Biar et le long de l'Oued Koriche, les limons à cailloutis se mélangent à des sables rouges et des conglomérats rougeâtres attribués au Pontien. Leur épaisseur ne dépasse généralement pas 5 m (maximum : 10 m). La présence d'éléments grossiers aide à la stabilité de la roche mais la présence de limons les exposent au ravinement.

- Marnes plaisanciennes (MP) : ce sont des argiles marneuses ou des marnes compactes localisées principalement au sud et à l'extrémité orientale du Massif de Bouzaréah, dans les communes d'Aïn Banian, de Beni Messous, de Bouzaréah, d'El Biar et le long de l'Oued Koriche. Leur épaisseur augmente de 17 à 46 m vers le sud. Le fait que ces terrains soient très argileux, fortement plastiques et sensibles au gonflement les rend propice aux mouvements de masse lent (solifluxion) ou brutal (glissement profond).

- Calcaires astiens (CA) : d'une épaisseur variant de 40 à 50 m, se présentant en bancs tantôt réguliers, compacts et durs, tantôt tendres et grumeleux, ils affleurent principalement au sud et au sud-est du Massif de Bouzaréah dans les communes d'El Biar et de Beni Messous et le long de l'Oued Koriche et constituent les escarpements de Saint-Raphaël-Telemly à El Biar, favorables aux chutes de blocs.

- Argiles argilo-sableux ou gréseuses de l'Astien (AG) : elles affleurent au sud-ouest de la commune de Beni Messous, ainsi que très localement dans l'Oued Koriche. Elles présentent une forte aptitude au gonflement, les rendant elles-aussi propices aux mouvements de masse (solifluxion, glissement profond).

4.2.2.2.2. Formations superficielles

- Dunes grésifiées d'origine marine et/ou éolienne (DG) : on les retrouve nombreuses à l'ouest du Massif de Bouzaréah, sur la commune d'Aïn Benian. Les dunes sont formées principalement de sables grésifiés à stratification entrecroisée en intercalation avec des niveaux argilo-sableux rouges (quelques cm d'épaisseur), et des brèches constitués de débris de schistes anguleux emballés dans une matrice limoneuse (quelques dm d'épaisseur, localement plusieurs mètres). Leur épaisseur est variable (quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres). Les fronts de dune présentent une bonne stabilité mécanique assurée principalement par la forme subverticale de leur parois, mais cela n'exclut pas des chutes de blocs occasionnelles. Peu sensibles aux glissements de terrain, les dunes sont également peu affectées par les altérations superficielles ; qui sont seulement locales.

- Sables d'origine marine et/ou éolienne (S) : ils correspondent à des dépôts actuels à subactuels d'origine marine ou éolienne. Ces affleurements spatialement localisés s'observent principalement en bord de mer à Bab-el-Oued (0,5 à 3 m d'épaisseur), à Aïn Benian (8 à 10 m) et sur la côte ouest. Les sables sont généralement déposés sur des zones à faibles pentes, ce qui les laisse peu exposés aux mouvements de terrain.

- Argiles limoneuses d'origine fluviale (AL) : elles sont présentes principalement dans les fonds de vallée et peuvent contenir des cailloutis et des petits blocs dérivés de l'érosion du socle (quartzites, schistes) puis de leur transport par les cours d'eau. Ce sont des formations spatialement localisées, récentes ou anciennes, mises en place aux débouchés de l'Oued Koriche (commune de Bab-el-Oued), de l'Oued Beni Messous (commune d'Aïn Benian) à l'ouest du Massif de Bouzaréah (commune de Aïn Benian). En fait, les faciès sont plus complexes que le nom donné à cette formation d'origine fluviale : il peut s'agir de sables argileux ou limoneux, d'argiles sableuses ou de limons, avec ou sans éléments grossiers. Des argiles vaseuses ainsi que des niveaux de graves peuvent même être observés. Les argiles limoneuses ont une épaisseur qui varie de quelques mètres à plus de 15 m au débouché de l'Oued Beni Messous. Leur résistance mécanique varie avec l'âge, selon qu'il s'agisse d'alluvions récentes (formations meubles à très meubles ; Oued Beni Messous et Oued Koriche) ou anciennes (formations meubles ; flanc ouest du Massif de Bouzaréah).

- Colluvions de pente (CP) : leur épaisseur est de quelques mètres. Elles sont principalement localisées sur le versant nord du Massif de Bouzaréah, au pied des escarpements de calcaires astiens (Saint-Raphaël) et sur les pentes taillées dans le socle à Beni Messous. Les colluvions de pente sont principalement constituées d'argiles peu gonflantes, contenant des cailloutis et des petits blocs anguleux constituées de roches cristallines ou calcaires emballés dans une matrice de sables grossiers, de sables argileux, de limons ou d'argiles sableuses. Ces formations sont plutôt meubles, ce qui les rend très sensibles à l'activité érosive (glissement de terrain, ravinement) lors d'épisodes pluvieux.

4.2.2.2.3. Dépôts anthropiques

Il s'agit essentiellement de remblais (R) constitués de débris de construction largués d'une manière sauvage autour des chantiers. Les grands remblais résultent la plupart du temps de travaux de nivellement sur les versants, une pratique très répandue dans le Massif de Bou-

zaréah du fait de son relief accidenté, mais aussi du fait de la politique urbaine qui pousse à l'extension de l'habitat vers les collines du sud-ouest afin de protéger les terres fertiles à l'est. Certains remblais que nous avons retrouvés sur le terrain sont aussi des restes de stériles de carrières abandonnées. La nature de ces remblais diffère selon la nature de la roche intervenant dans leur formation. Leur volume est variable, mais ils peuvent atteindre une épaisseur de plus d'une dizaine de mètres, et des superficies de plusieurs hectares. On les retrouve partout de l'amont à l'exutoire des bassins versants ou bien encore dans le lit des oueds. Déposés sans le moindre travail de tassement, ils sont très meubles et par conséquent très sensibles à l'activité érosive : glissement de terrain, ravinement, coulée boueuse.

4.2.3. Caractéristiques climatiques

4.2.3.1. Variations des totaux pluviométriques annuels et mensuels moyens sur le Grand Alger (station météorologique de Bouzaréah)

L'analyse de la variabilité pluviométrique annuelle et saisonnière a été menée à partir d'une série de données climatiques de 111 années d'observations (1891-2001). Les données exploitées sont relatives à la pluviométrie enregistrée à la station de Bouzaréah, l'une des stations météorologiques du Grand Alger (fig. 4.11).

Entre 1891 et 2001, le total pluviométrique annuel moyen est de 691,84 mm, avec des variations de 216 mm (1981) à 1165,3 mm (1936 ; fig. 4.12). Le total pluviométrique annuel moyen de la décennie 1990 est inférieur de 36,57 % à celui de la décennie 1960 et de 15 % à celui de la décennie 1920.

Pour analyser les variations inter- et intra-mensuelles, nous avons choisi la période automnale du fait qu'elle reçoit plus de 45 % de la totalité des précipitations annuelles et qu'elle est la saison la plus touchée (plus de 60 %) par les événements pluviométriques de forte intensité. La distribution des cumuls pluviométriques mensuels (fig. 4.13), montre une grande variabilité inter- et intra-mensuelle. Les cumuls d'une même année décroissent entre octobre et décembre. On observe aussi des valeurs qui sortent clairement de la tendance générale. Des pics dévoilent souvent la présence d'un événement de caractère intense. Ces événements de courte durée et de forte intensité font partie intégrante du comportement météorologique du climat méditerranéen.



Fig. 4.11. Localisation des stations météorologiques du Grand Alger et dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (fond d'image Google Earth).

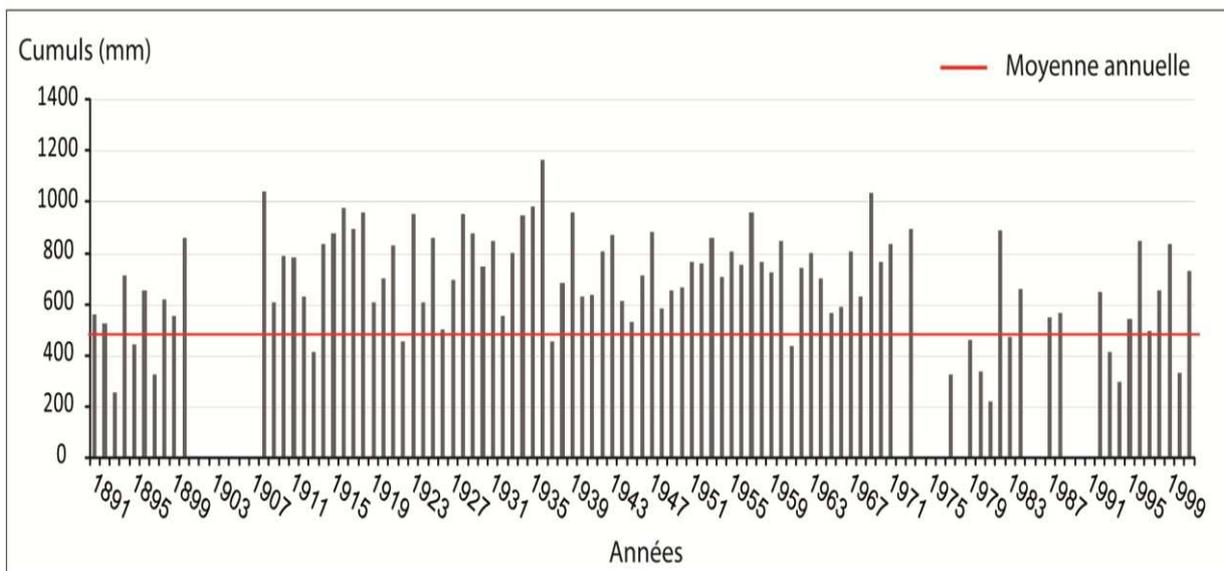


Fig. 4.12. Variation interannuelle des pluies entre 1891 et 2001 (données lacunaires 1901-1907, 1972, 1974-1976, 1978, 1985-1986, 1989-1991).

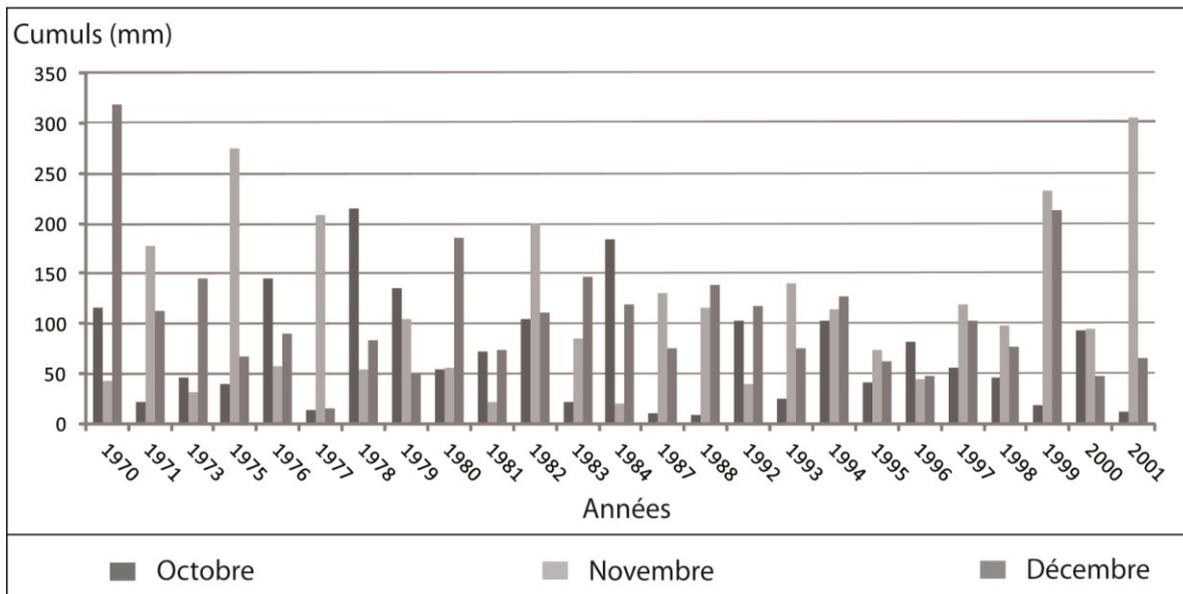


Fig. 4.13. Variations des totaux inter- et intra-mensuels des mois d'octobre, novembre et décembre.

4.2.3.2. Événements météorologiques intenses (cumul supérieur à 80 mm/24 h) observés sur le Grand Alger

Les enregistrements durant un siècle (1908-2007) des maxima pluviométriques journaliers (24 h non flottants), à la station de Bouzaréah, renseignent sur plus de 23 événements intenses (80 mm/24 h ; fig. 4.14). Ainsi on peut déduire que la survenance de ce type d'événements semble être fréquente. La totalité du bassin-versant est susceptible être affecté, et ceci quelle que soit la saison. Néanmoins, les caractéristiques intrinsèques des événements restent différentes, du fait qu'en climat méditerranéen, les mécanismes générateurs des perturbations sont distincts selon les saisons.

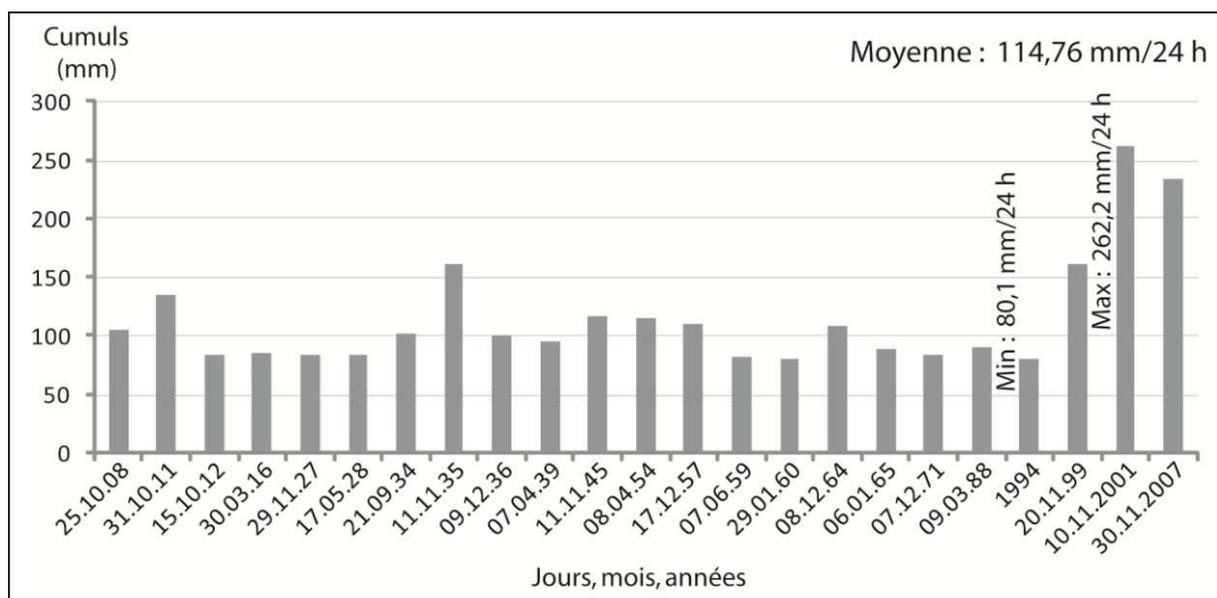


Fig. 4.14. Date et valeur des cumuls pluviométriques en 24 h supérieurs à 80 mm à la station de Bouzaréah (1908-2007 ; données ANRH).

La fig. 4.15 montre que les événements pluviométriques n'ont pas été réguliers entre 1908 et 2007. Les deux décennies (1930-1940 et 1950-1960) sont relativement plus pluvieuses. La récurrence des événements selon les mois de l'année varie également : plus de 60% des événements surviennent au cours de la période automnale, caractérisée par une activité cyclogénétique intense et rapide, d'origine barocline ou orographique. Le reste de l'année, les dépressions thermiques sont d'ampleur beaucoup moins marquée.

L'évènement enregistré les 9-10 novembre 2001, inclus dans la série analysée, reste le plus exceptionnel en terme de cumul pluviométrique (263 mm/24 h). Les précédents records n'ont pas dépassé 154 mm (1999) ou 152 mm (1935). On utilisant des méthodes d'ajustement graphique, on peut attribuer aux cumuls pluviométriques journaliers (ou d'autres : en 30 mn, en 1 h, etc.) mesurés en un endroit donnée des périodes de retour (T). L'ensemble des méthodes sont conçues pour assurer la symétrie autour de la médiane. L'ONM d'Alger a fait le choix d'utiliser la loi de Gumbel pour estimer les périodes de retour correspondant aux précipitations journalières observées sur trois stations du Grand Alger, à savoir les stations de Dar El Beida, de Bouzaréah et de Bir Mourad Rais.

Tableau 4.1. Les cumuls pluviométriques journaliers correspondant aux différentes périodes de retour (données ONM).

Périodes de retour	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
Station de Dar El Beida	52 mm	76 mm	91,7 mm	111,3 mm	125,8 mm	140,3 mm
Station de Bouzaréah	61 mm	83 mm	97,8 mm	116,5 mm	130,3 mm	144,1 mm
Station de Bir Mourad Rais	65 mm	95,5 mm	107,6 mm	128,6 mm	144,4 mm	160,1 mm

4.2.4. Conditions hydrologiques

Une brève précision terminologique pour commencer. Le « bassin-versant » reste l'unité spatiale de référence en hydrologie. Il s'agit d'un « système ouvert à processus réponse » (Schumm, 1977) dans lequel les eaux reçues à la surface du bassin, à l'exception de la partie qui s'infiltré dans le sol ou celle qui s'évapore, s'écoule sur des chemins préférentiels déterminés principalement par la topographie, pour rejoindre en aval un même point de convergence appelé exutoire. Le fonctionnement du système « bassin-versant » est rendu complexe par son mode de réaction hydrologique, les emboitements de sous-unités et la structuration de son réseau hydrographique. Le comportement hydrologique du bassin-versant est principalement caractérisé par les vitesses d'écoulement, les débits maximaux et les temps de concentration des écoulements. Les valeurs d'intensité, de vitesse et de temps de concentration des écoulements des différents bassins versants du Massif de Bouzaréah seront calculés, avec des outils appropriés dans le chapitre 8 (cf. *infra*).

4.2.4.1. Géométrie du bassin-versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin-versant jouent un rôle déterminant dans son comportement hydrologique. Les caractéristiques géométriques des sous-bassins-versants sont présentées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Superficie et périmètre des différentes sous-unités hydrologiques contributrices du Massif de Bouzaréah

Paramètres Bassins versants (bv)	Surface (S ; km ²)	Périmètre (km)	K_G Gravelius	K du limes- cate	Rectangle équivalent	
					Longueur	Largeur
Sbv côtier 1	0,6	3,8	1,4	2,7	1,5	0,4
Sbv côtier 2	0,5	3,2	1,3	1,9	1,1	0,4
Sbv côtier 3	0,8	5,2	1,6	4,6	2,2	0,4
Sbv côtier 4	0,7	5	1,6	4,8	2,2	0,3
Sbv côtier 5	0,6	4	1,4	3	1,6	0,4
Sbv côtier 6	0,6	4	1,4	3,3	1,6	0,4
Sbv côtier 7	0,5	4,3	1,6	3,8	1,8	0,3
Sbv côtier 8	0,6	3,5	1,3	2,6	1,3	0,4
Sbv côtier 9	0,6	3,7	1,4	3,1	1,4	0,4
Sbv côtier 10	1,4	6,5	1,5	2,6	2,7	0,5
Sbv côtier 11	0,3	3,5	1,8	5,4	1,6	0,2
Sbv côtier 12	0,4	3,5	1,6	4,3	1,5	0,3
Sbv côtier 13	0,4	3,2	1,5	3,4	1,3	0,3
Sbv côtier 14	0,2	2,7	1,6	4,9	1,1	0,2
Sbv côtier 15	0,2	2,8	2	8,2	1,3	0,1
Sbv côtier 16	2,6	9,6	1,6	2,7	4,1	0,6
Sbv côtier 17	0,4	3,1	1,4	2,7	1,2	0,3
Sbv côtier 18	1,1	6,4	1,7	3,57	2,8	0,4
Sbv côtier 19	0,7	4,3	1,4	2,9	1,7	0,4
Sbv côtier 20	0,6	3,8	1,4	3,4	1,5	0,4
Beni Messous	31,5	40,7	2	2,9	18,7	1,7
Oued Koriche	9	19,9	1,9	2,2	8,9	1

A. Surface

La surface (en km²) des bassins versants a été numériquement délimitée à partir des lignes de crête ou de partage des eaux, les résultats sont présentés dans le tableau 4.2 ci-dessus.

B. Forme

La forme d'un bassin-versant se décrit à partir de la forme de son périmètre. Selon qu'il s'agit d'une forme allongée ou circulaire, l'allure de l'hydrogramme de crue calculé à l'exutoire du bassin-versant sera très différente. Par exemple, les bassins de forme allongée produisent des pics de crue moins marqués et ont un temps de réponse hydrologique plus long que ceux de forme plus trapue. Dans notre étude, nous avons fait le choix de ne pas calculer automatiquement les indices de forme en ayant recours aux formules intégrées dans les systèmes SIG afin de minimiser le plus possible les erreurs liées à l'échelle et la taille des images utilisées. Nous avons cependant calculé quelques paramètres élémentaires (surface, périmètre) utilisés dans le calcul des indices (compacité, développement ; cf. *infra*), mais chacun de ces paramètres élémentaires a fait l'objet d'un calcul établi simultanément avec deux outils numériques différents (ArcGis et MapInfo) et en prenant en compte des résolutions d'image différentes. On a pris soin également de comparer les grandeurs obtenues avec d'autres données établies par l'ANRH d'Alger sur la base de méthodes de calcul traditionnelles. Afin de décrire et comparer la forme des trois bassins versants étudiés, nous avons fait le choix d'utiliser deux indices, à savoir, l'indice de compacité de Gravelius et le *Lemniscate ratio* de Chorley *et al.* (1957) :

- Indice de compacité de Gravelius (K_G) : il est calculé en rapportant le périmètre d'un bassin-versant donnée au périmètre d'un cercle de surface équivalente, selon l'équation :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equation 1})$$

avec A = surface du bassin-versant et P = périmètre du même bassin. Plus K_G est proche de 1, plus le bassin-versant tend vers une forme circulaire. K_G est toujours supérieur à 1 pour les formes de bassin allongées ou compactes. Les bassins versants côtiers ont une forme plus au moins allongée : le sous-bassin versant côtier 2 ($K_G = 1,26$) s'approche de la forme carrée alors que le sous-bassin versant côtier 15 ($K_G = 1,97$) est presque deux fois plus long que large, ainsi il présente une forme allongée. Le bassin-versant de l'Oued Koriche a une forme trapue ($K_G = 1,87$) et le bassin-versant de Beni Messous est de forme allongée ($K_G = 2,04$), il est deux fois plus long que large. Ainsi, la réponse hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche va être plus rapide que celle du bassin-versant de Beni Messous dont les parties éloignées de l'exutoire (les amonts) tardent à réagir sur les avals.

- *Lemniscate ratio* de Chorley *et al.* (1957)

Partant de l'observation que la forme d'une grande partie des bassins versants peut être assimilée à un ovoïde ou à une morphologie de « poire renversée », plus qu'à un cercle (Gray et Wigham, 1972 ; Bendjoudi et Hubert, 2002), Chorley *et al.* (1957) ont comparé la forme du bassin-versant à une lemniscate (fig. 4.15), en proposant l'équation suivante :

$$k_{\text{lemniscate}} = (l^2\pi)/4A \quad (\text{Equation 2})$$

ou l = longueur du bassin et k = facteur de forme.

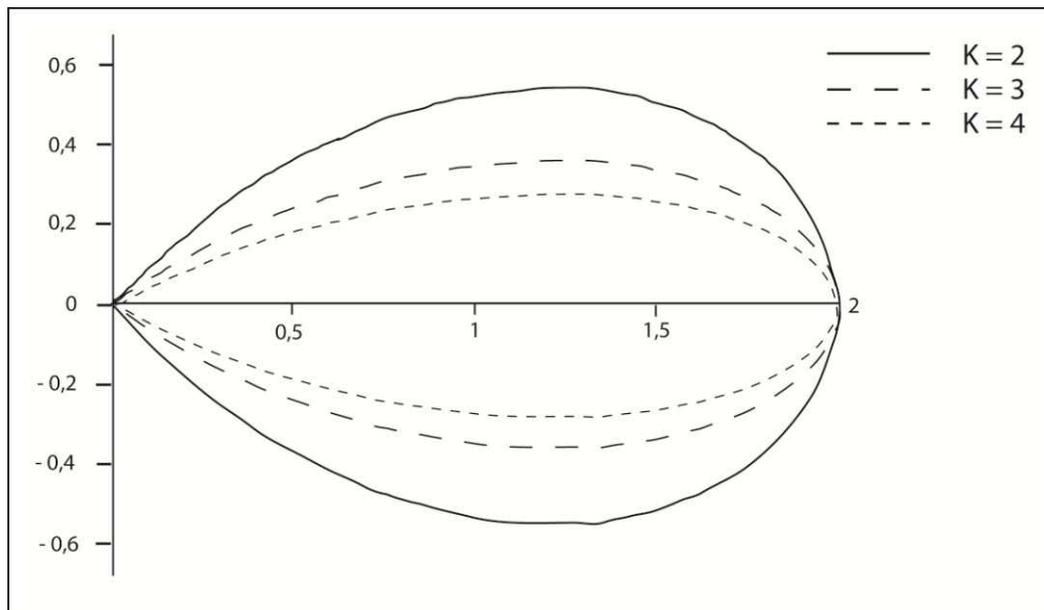


Fig. 4.15. Représentation du lemniscate ratio proposé par Chorley *et al.* (1957).

Le bassin-versant de l'Oued Koriche avec un $k_{\text{lemniscate}} = 3$ a une forme moins allongée que celle du bassin-versant de Beni Messous dont on mesure un $k_{\text{lemniscate}} = 2$; ainsi le temps de concentration des écoulements dans le bassin-versant de l'Oued Koriche va être plus court que celle du bassin-versant de Beni Messous. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux déduits à travers le calcul de l'indice de compacité de Gravelius (K_G) présentés auparavant.

C. Relief et pente

Le relief est l'un des facteurs clés contrôlant la réponse hydrologique d'un bassin-versant car les pentes influencent à la fois les vitesses et les puissances spécifiques des écoulements ainsi que le temps de réponse hydrologique. Nous l'avons caractérisé en utilisant les techniques de la courbe hypsométrique et du rectangle équivalent :

- Courbe hypsométrique : elle représente la distribution spatiale des classes d'altitude dans le bassin-versant. Plusieurs paramètres peuvent être déduit de cette courbe : altitude moyenne, altitude la plus fréquente, altitude de fréquence 50 %, etc. La courbe hypsométrique du bassin-versant de l'Oued Koriche (fig. 4.16) montre que l'altitude moyenne du bassin est égale à 195,5 m, avec une médiane légèrement supérieure à la moyenne (199,5 m). Plus de 60 % de la surface du bassin-versant se trouve à une altitude supérieure à la moyenne, il existe donc par endroit de forte pente, élément favorable à la génération des écoulements rapide.

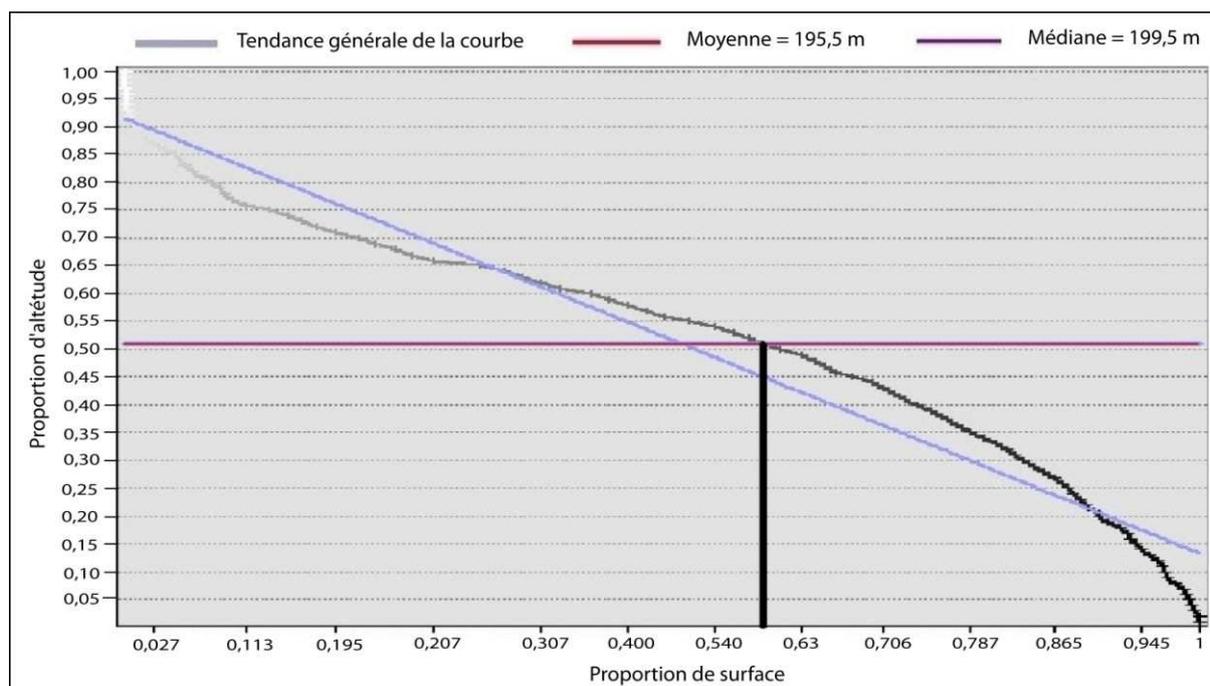


Fig. 4.16. Courbe hypsométrique du bassin-versant de l'Oued Koriche.

Dans le bassin-versant de Beni Messous, l'altitude moyenne est de 191,5 m, la médiane de 193,4 m, et 46 % de la surface du bassin-versant se trouve à une altitude supérieure à la moyenne. La forme de la courbe hypsométrique peut être largement assimilée à celle de bassins-versants en équilibre (répartition équilibrée des pentes dans le bassin-versant ; fig. 4.17) ; de ce fait le risques de développer des crues rapides dans ce bassin-versant reste faible.

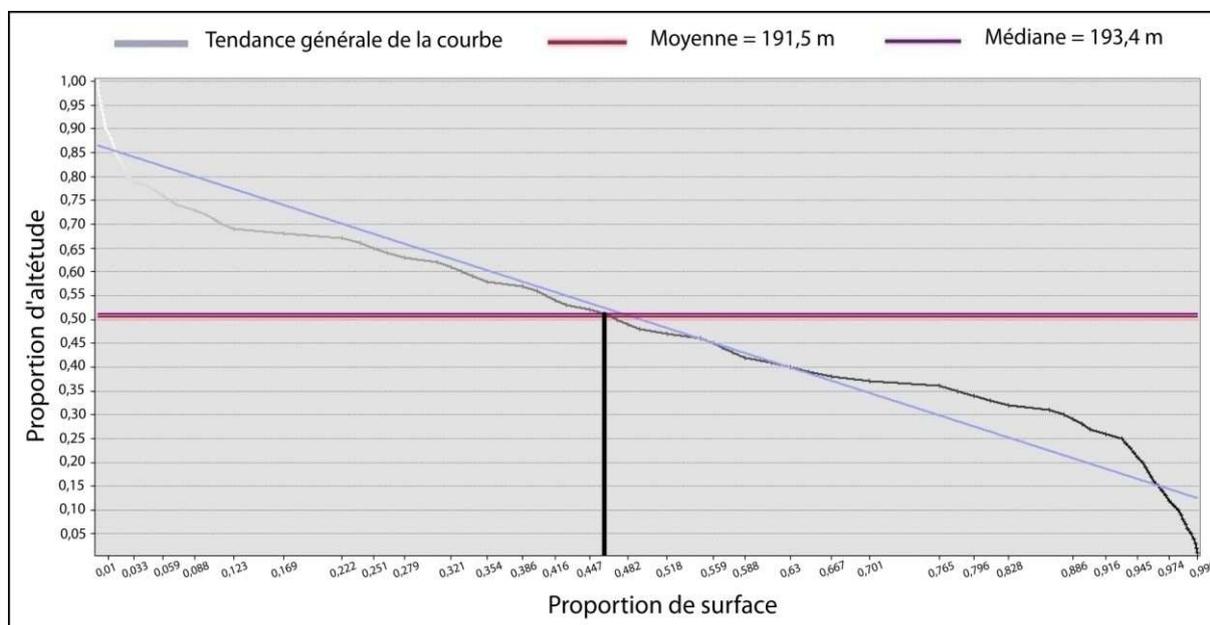


Fig. 4.17. Courbe hypsométrique du bassin-versant de Beni Messous.

- Rectangle équivalent : il s'agit d'une transformation géométrique du bassin-versant, assimilé à un rectangle de même surface, périmètre et indice de compacité, donc de même distribution hypsométrique. Le rectangle équivalent est calculé comme suit : soit P et A respectivement le périmètre et la surface du bassin-versant, et L et l respectivement la longueur et la

largeur du rectangle équivalent. Comme les valeurs P et A sont connus et égales à celles du rectangle équivalent, on déduit que :

$$P = 2(L + l) \quad (\text{Equation 3})$$

$$A = L \cdot l \quad (\text{Equation 4})$$

En se servant des équations 1 (cf. *supra*), 3 et 4, on obtient un polynôme de second degré, dont la solution permet d'obtenir la longueur et la largeur du rectangle équivalent.

$$L = \frac{1}{2} K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G} \right)^2} \right) \quad \text{Pour } K_G \geq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{Equation 5})$$

$$l = \frac{1}{2} K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G} \right)^2} \right) \quad \text{Pour } K_G \geq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{Equation 6})$$

Le bassin-versant de l'Oued Koriche peut être assimilé à un rectangle équivalent d'une longueur égale à 8,96 km de longueur et 1 km de largeur. Le rectangle équivalent du bassin-versant de Beni Messous présente une longueur de 18,66 km et une largeur de 1,69 km. Le bassin-versant de Beni Messous est beaucoup plus long que le bassin-versant de l'Oued Koriche ; il est aussi un peu plus large. Par conséquent le temps de concentration des écoulements sera sans doute beaucoup plus court sur le bassin versant de l'Oued Koriche en comparaison avec le bassin-versant de Beni Messous.

La pente correspond à l'inclinaison des surfaces topographiques. Elle contrôle la cinématique des écoulements (vitesse, puissance, temps de réponse) mais peut aussi être évaluée comme critère de comparaison des bassins versants. Nous l'avons utilisée pour comparer les bassins versants du Massif de Bouzaréah :

- Bassin-versant de l'Oued Koriche : les pentes sont fortes (maximum : 42° ; fig. 4.18), notamment sur la rive gauche de l'oued. En tenant compte de ces fortes pentes et de la petite surface du bassin-versant, la réponse hydrologique et les vitesses d'écoulement seront rapides en cas d'épisodes pluvieux intenses.

- Bassin-versant de Beni Messous : les plus grandes valeurs de pente ($12-25^\circ$; fig. 4.19) s'observent dans la partie nord-est du bassin-versant, ainsi que sur certains versants (d'extension spatiale limitée) situés à l'exutoire. La rive gauche du bassin-versant ainsi qu'une grande partie du bassin médian/aval sont dotées de pentes faibles (voire nulles). Ce bassin-versant ne présente pas une prédisposition naturelle à générer des réponses hydrologiques rapides. Dans ce genre de configuration topographique (pentes faibles et bassin-versant allongé), le paramètre « pente » ne joue pas un rôle déterminant concernant la cinématique des écoulements.

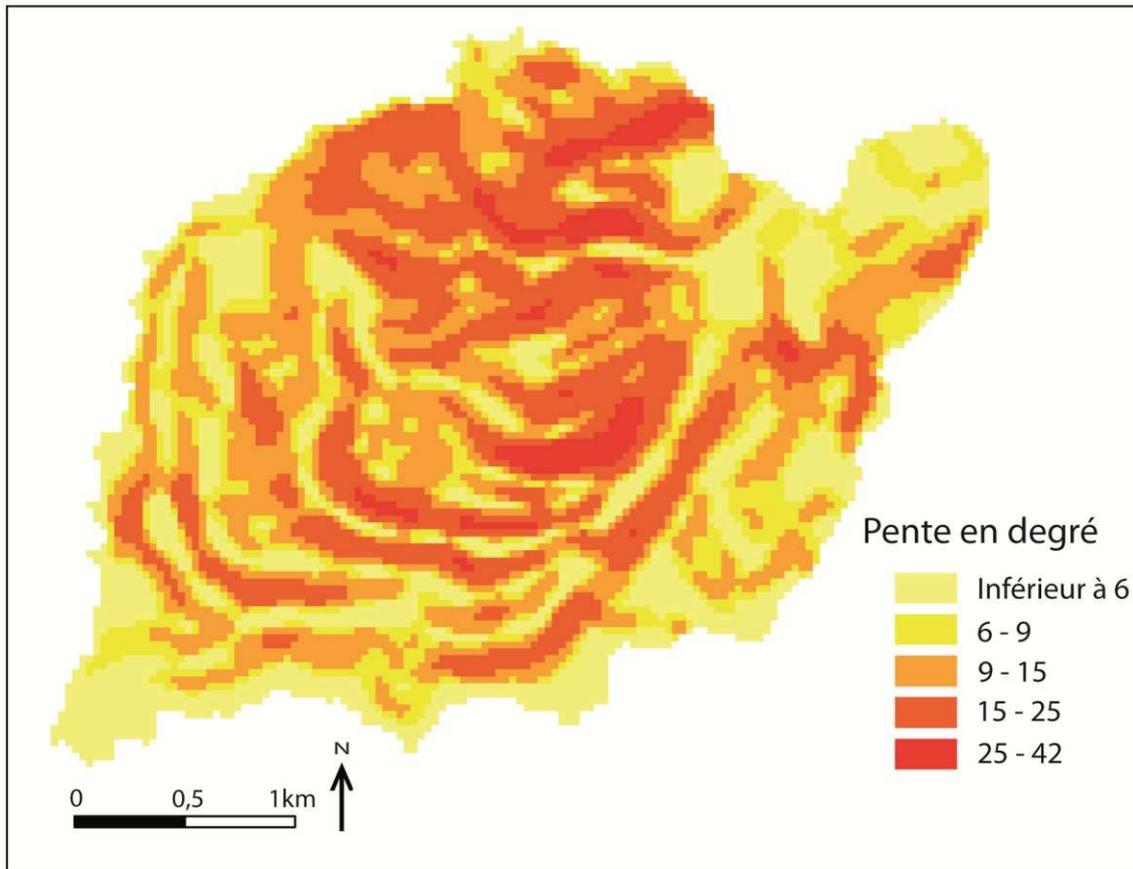


Fig. 4.18. Carte des pentes dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

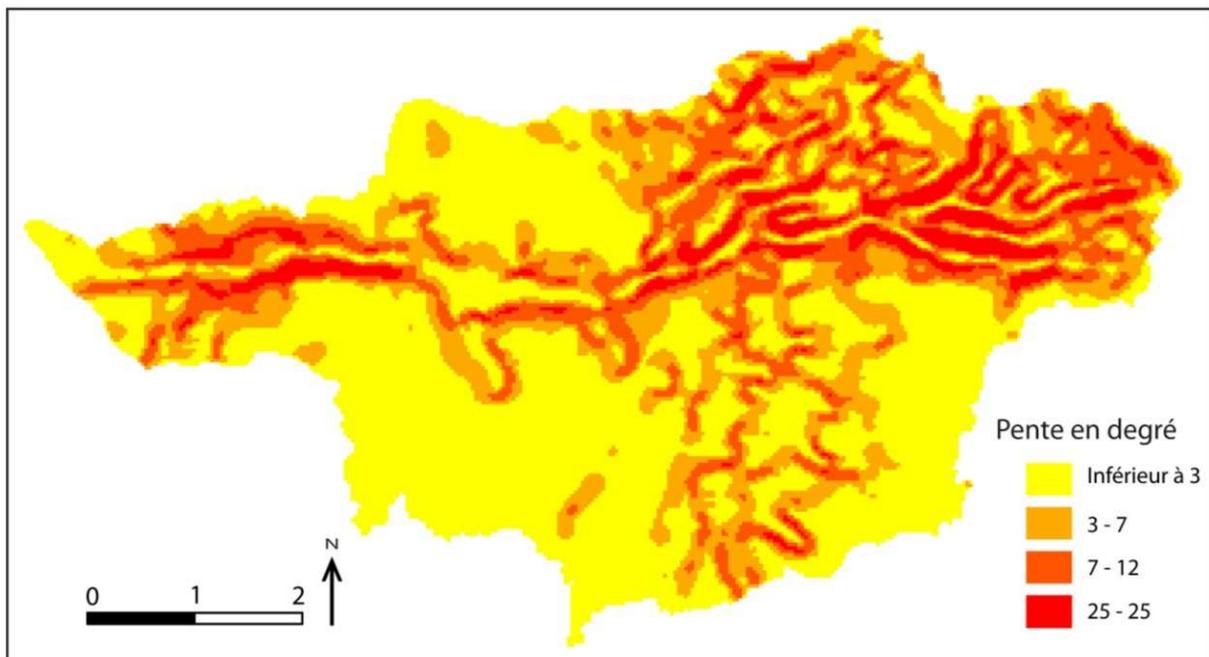


Fig. 4.19. Carte des pentes dans le bassin-versant de Beni Messous.

- Sous-bassins versants côtiers : on y trouve de fortes pentes (maximum : 32° ; fig. 4.20), avec une tendance à la décroissance vers l'ouest. Ces bassins versants favorisent des réponses hydrologiques et des vitesses d'écoulement rapides. Néanmoins, ces caractéristiques hydrolo-

giques ne peuvent pas conduire à des situations catastrophiques de part la petite taille de ces bassins versants.

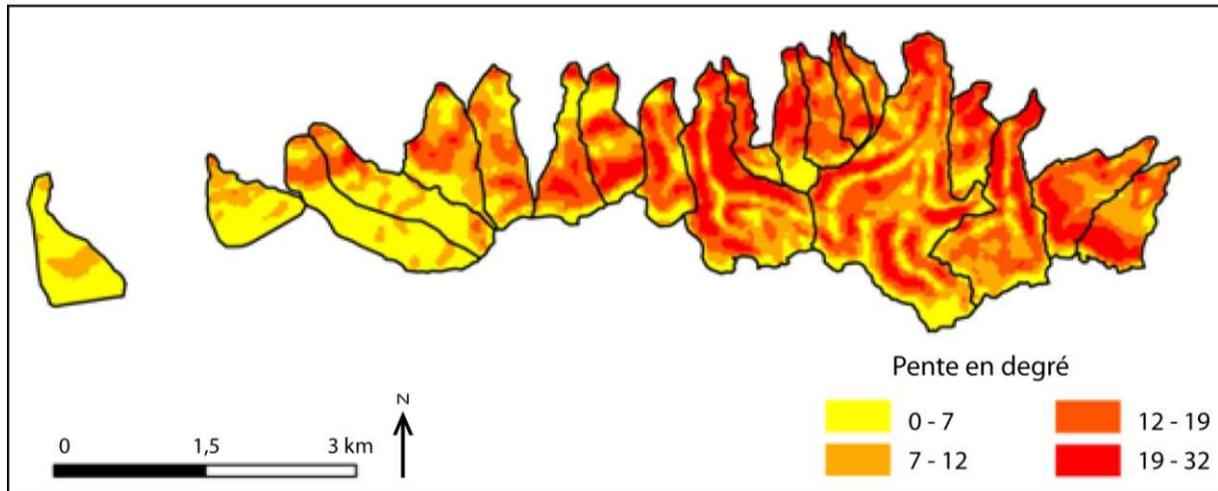


Fig. 4.20. Carte des pentes des sous-bassins versants côtiers.

4.2.4.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique représente l'élément de caractérisation le plus important de l'analyse hydrologique d'un bassin-versant. Il est constitué par un drain (chenal) principal relié à un ensemble hiérarchisé et organisé de drains (chenaux) secondaires (affluents). Ce complexe s'organise et fonctionne de manière à assurer l'acheminement de la totalité des eaux ruisselantes de surface vers l'exutoire du bassin-versant. Les drains constitutifs d'un réseau hydrographique peuvent être d'origine naturelle ou artificielle, en activité permanente ou temporaire. Le schéma structural d'un réseau hydrographique est le résultat d'une réaction accommodée par quatre principaux facteurs, à savoir : 1) la géologie (l'orientation, la forme et la profondeur du réseau hydrographique sont fortement influencées par la sensibilité du substratum à l'érosion et les différents accidents tectoniques) ; 2) le climat ; 3) la pente (l'orientation, l'inclinaison et la direction des pentes déterminent l'orientation, l'organisation et le travail d'érosion accompli par le réseau hydrographique) ; 4) l'eustatisme (influence sur le potentiel érosif des cours d'eau à moyen terme) ; 5) l'anthropisation (endiguement, artificialisation et canalisation souterraine en ville, drainage des terres agricoles, barrages, etc.).

Nous avons caractérisé et hiérarchisé le réseau hydrographique théorique des trois sous-unités hydrologiques du Massif de Bouzaréah : bassins versants de l'Oued Koriche et de Beni Messous, petits bassins versants côtiers (fig. 4.21). Cette démarche dite « topologique » (description d'ordre qualitative) a été menée dans le but de définir la dynamique des eaux superficielles et le temps de réponse hydrologique des bassins versants. L'analyse topologique que nous avons effectuée s'appuie sur la classification des réseaux hydrographiques proposée par Howard (1967), sur la hiérarchisation du réseau hydrographique dérivée des méthodes de Strahler (1957) et Shreve (1966) et sur les calculs du rapport de confluence (pente de la régression linéaire du logarithme décimal du nombre de segments), du rapport de longueur de segments (pente de la régression linéaire du logarithme décimal des longueurs moyennes des segments), de la longueur moyenne des drains et de la densité de drainage.

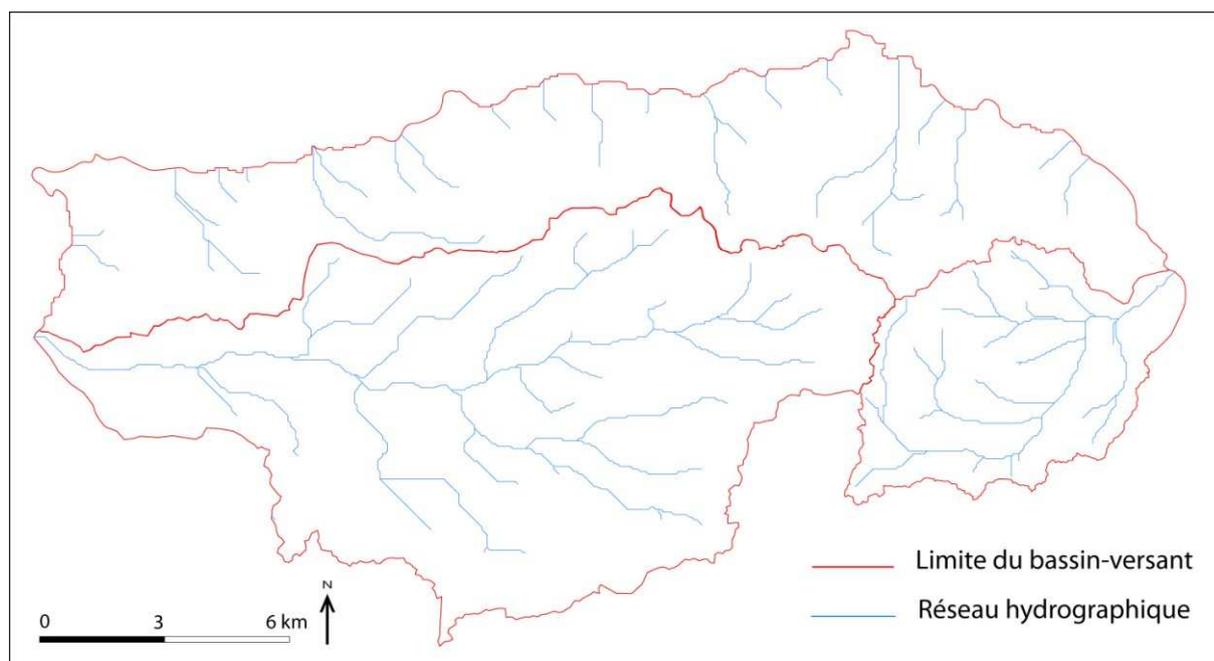


Fig. 4.22. Réseau hydrographique théorique du Massif de Bouzaréah.

A. Classification

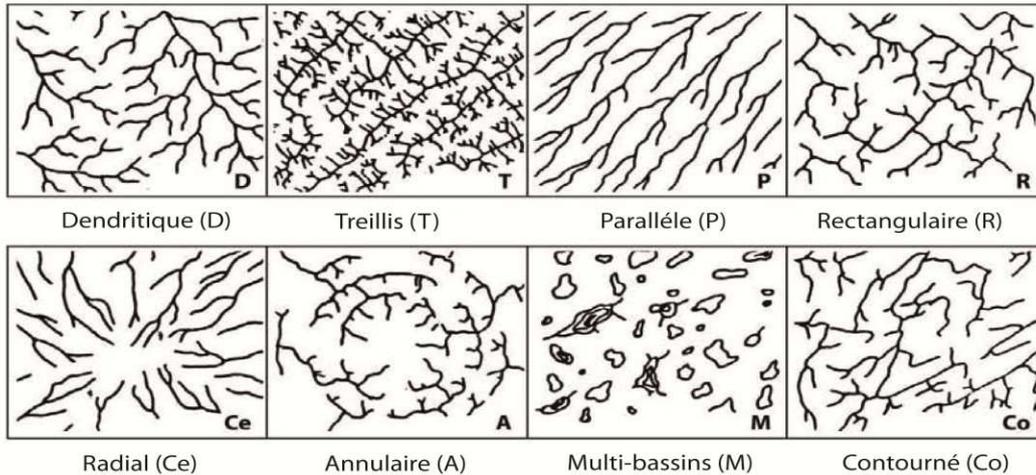
Les bassins versants de l'Oued Koriche et de Beni Messous présentent un réseau hydrographique que l'on peut qualifier respectivement de « sub-dendritique » et de « dendritique », ils se développent généralement en climat semi-humide sur un milieu érosif uniforme, ils sont connus par leur transmission rapide des crues vers l'aval. La grande majorité des petits bassins-versants côtiers présentent un réseau hydrographique « parallèle », une forme qui se développe sur du substrat rocheux souvent doté de pentes relativement homogènes, ainsi défavorable à la formation des crues rapides (fig. 4.22).

C. Hiérarchisation

Le réseau hydrographique des trois sous-unités hydrologique du Massif de Bouzaréah va être hiérarchisé à la fois avec la méthode Strahler et la méthode de Shreve ; Nous avons fait le choix d'utiliser ces deux méthodes car elles sont établies selon des logiques différentes, largement utilisées dans les travaux hydrologiques régionaux et disponibles *via* les systèmes d'information géographique utilisés. Les résultats obtenus vont être présentés respectivement dans les fig. 4.23 et 4.24.

La méthode de Strahler (1957) propose de hiérarchiser le réseau hydrographique en attribuant le numéro 1 aux drains sans affluent ; deux drains d'ordre n s'agrègent pour former un drain d'ordre $n + 1$; lorsqu'il s'agit d'un drain en aval de deux confluences d'ordre différent, ce dernier prend le nombre du plus grand.

A) Classifications de base



A) Classifications modifiées

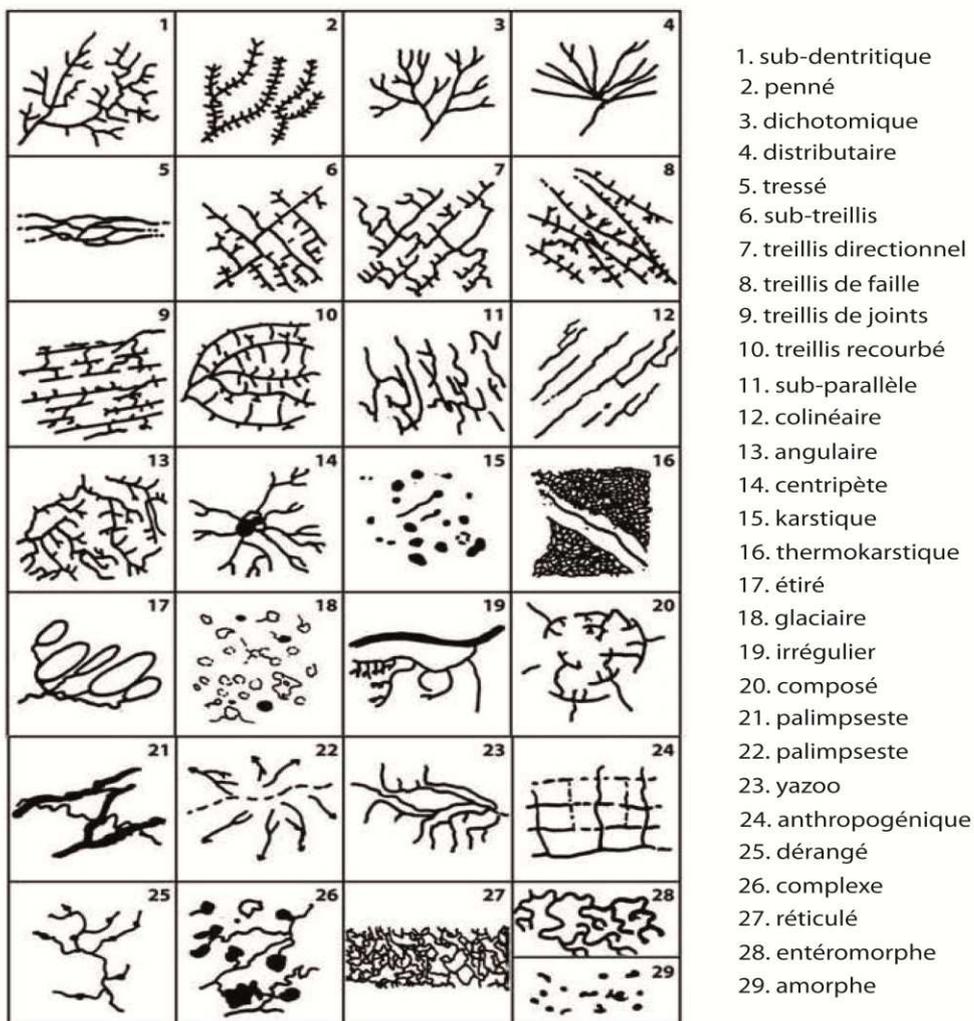


Fig. 4.22. Classification descriptive du réseau hydrographique proposée par Howard (1967) : A) types de base de réseaux hydrographiques ; B) types modifiés de réseaux hydrographiques.

La méthode de Shreve (1966) assimile le réseau hydrographique à une arborescence formée de segments disposant d'une « magnitude » ; elle attribue une magnitude 1 aux premiers drains ; un drain résultant de la confluence de deux drains de magnitude n et aura une magnitude $n + n'$

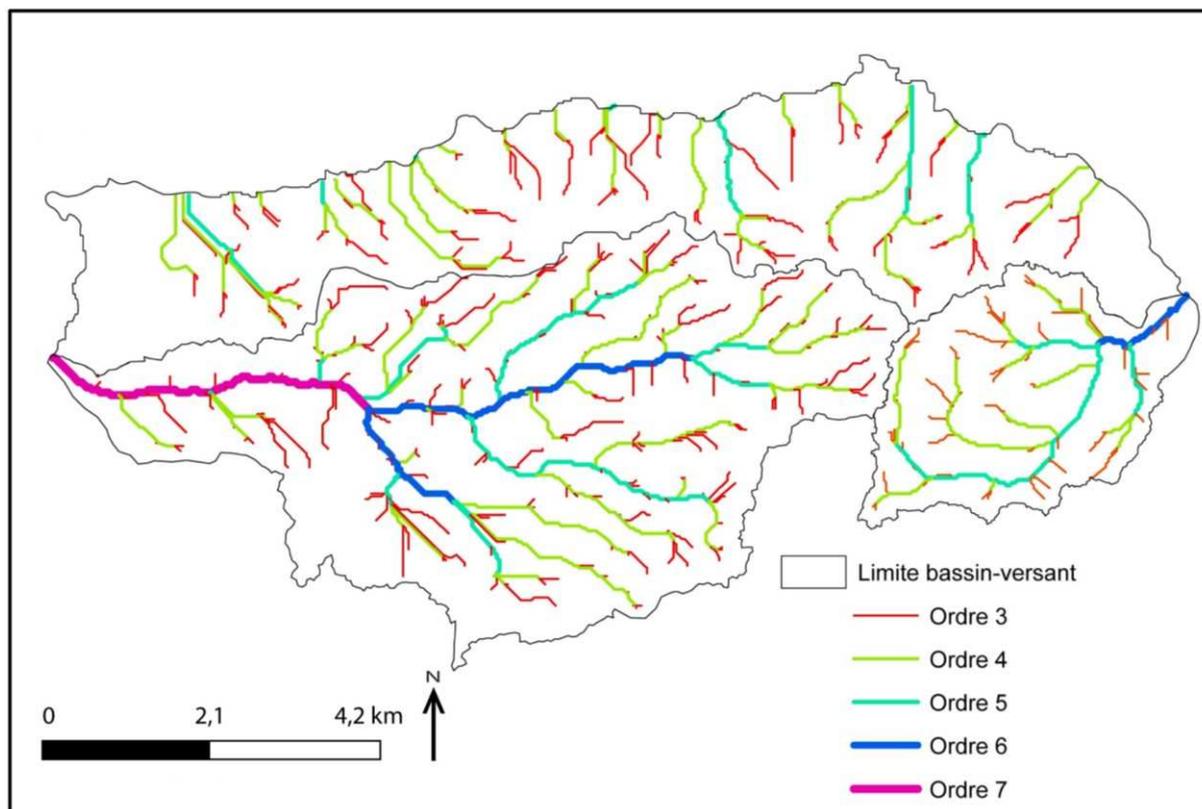


Fig. 4.23. Hiérarchisation de réseau hydrographique dans les bassins versants de l'Oued Koriche, de Beni Messous et côtiers selon les lois de Strahler.

Nous présentons ci-dessous les modèles de drainages correspondants aux bassins versants de l'Oued Koriche et de Beni Messous (fig. 4.24). Concernant les bassins versant côtiers, il s'agit de petits bassins constitués d'un réseau hydrographique très peu ramifié.

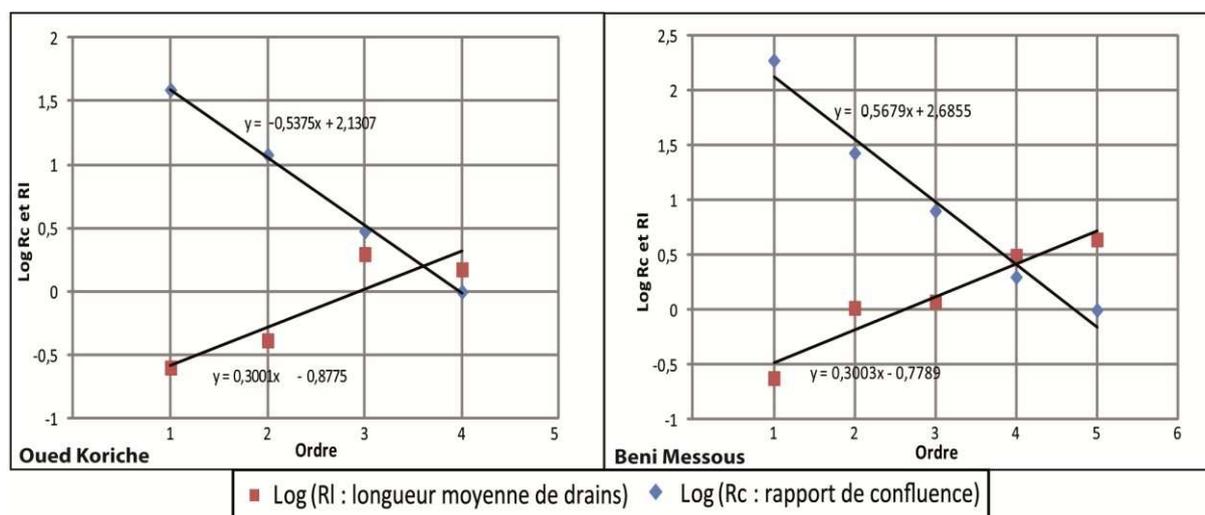


Fig. 4.24. Modèle de drainage.

Dans les deux bassins versants (Oued Koriche, Beni Messous), le nombre de segments croît vers l'aval, formant ainsi une progression géométrique inverse. Le bassin-versant de l'Oued Koriche totalise 55 segments dont 39 appartiennent à l'ordre 2 (Strahler), ce qui représente une valeur élevée pour un si petit bassin-versant (9,01 km²). Un grand nombre de segments d'ordre inférieur favorise des réponses hydrologiques rapides lors des épisodes plu-

vieux de forte intensité. Le bassin-versant de Beni Messous totalise 228 segments dont 188 segments (80 %) appartiennent à l'ordre 2 (Strahler).

C. Rapports de confluence, longueurs moyennes des drains et rapports de longueur

Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, le rapport de confluence (R_c) est égal à 3,45. On n'enregistre pas de grandes différences d'un niveau de confluence à l'autre ($R_{c2} = 3,25$; $R_{c3} = 4$; $R_{c4} = 3$). Le rapport de longueur de drains (R_L) est égal à 2. La valeur de R_{L3} (4) est deux fois plus élevée que celle de R_L . La longueur moyenne des segments d'ordre 4 ($L_{m4} = 2$ km) est largement supérieure à celle des segments d'ordre 3 ($L_{m3} = 0,41$ km). On conclut donc au caractère torrentiel que présente les segments élémentaires (ordre ≤ 4) dans le bassin-versant de l'Oued Koriche dont la partie aval est exposé à un risque de crue important.

Dans le bassin-versant de Beni Messous : R_c est égal à 3,70 ; R_{c2} (rapport du nombre de segments d'ordre 2 sur celui d'ordre 3) est deux fois plus important que R_c . R_{c3} chute à 2,95. Ces résultats mettent en évidence le caractère torrentiel que présente les segments élémentaires d'ordre 2. R_L est égal à 2. R_{L3} , avec une valeur égale à 2,96, est supérieur à R_L , confirmant ainsi que le bassin-versant est doté d'une forme allongée. L_{m2} est égal à 239 m, une valeur bien inférieure à celle de L_{m3} (1044 m), signifiant la possibilité de formation de crues brutales à ce niveau de confluences. Dans ce bassin-versant, les segments élémentaires jouent également un rôle primordial dans l'organisation spatio-temporelle de la réponse hydrologique.

D. Densité de drainage

Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, la densité de drainage moyenne est égale à 3 km/km². La valeur est élevée et confirme que le réseau hydrographique est dense. Dans le bassin-versant de Beni Messous, on relève également une densité de drainage moyenne élevée, égale à 1,46 km/km², dont 78 % (1,13 km/km²) est drainée par des segments d'ordre 2 ou 3, confirmant ainsi l'importance que représente ces segments élémentaires à la fois dans la structure du réseau hydrographique et la nature de sa réponse hydrologique dans le bassin-versant de Beni Messous.

4.2.4.3. Régime d'écoulement

Il s'agit de comprendre les modes d'écoulement, leur évolution spatio-temporelle ainsi que leur probable effet érosif. On a coutume de placer les écoulements dans trois classes possibles :

1) Fleuves et rivières : les régimes d'écoulement sont permanents et les eaux couvrent de large étendue spatiale (lit mineur, lit moyen, lit majeur).

2) Torrents et oueds : les écoulements sont permanents (torrents) ou temporaires (oueds) suite à un événement météorologique de caractère intense. Ce dernier cas est observé principalement sous climats aride et semi-aride. Dans tous les cas, les différents niveaux de lit (mineur, moyen, majeur) sont inexistant, l'oued ou le torrent possédant un seul lit qui est réactif suite à un épisode hydrométéorologique donné ou lors de la saison des pluies.

3) Ecoulements diffus : le lit de concentration des crues est absent, les eaux ruisselant en surface en prenant de multiple directions (*rill wash*). Dans le cas où l'épisode pluvieux se

prolonge dans le temps et augmente en intensité, un ruissellement en nappe de faible profondeur (quelques centimètres ; *sheet wash*) peut être observé. L'état le plus agressif que peut prendre un écoulement diffus est le *sheet flood* qui se manifeste par des écoulements fortement chargés (crues boueuses) dotées d'une forte énergie cinétique capable d'entraîner des blocs sur de longues distances.

Dans le Massif de Bouzaréah coexiste les types d'écoulement 2 et 3 (cf. *supra*). Le réseau hydrographique est formé principalement d'oueds à régime hydrologique saisonnier (climat méditerranéen) et c'est au cours des hivers humides et doux, en plus du printemps et de l'automne que les oueds deviennent actifs. Selon l'intensité des épisodes pluvieux et le secteur affecté, l'écoulement peut être de type oued, torrent ou ruissellement diffus. Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche peut coexister les trois types d'écoulement (cf. *supra*). Le relief accidenté, la lithologie défavorable aux phénomènes d'infiltration génèrent des réactions hydrologiques rapides. Les premiers écoulements (écoulement diffus, oued) surviennent dès les premières minutes du déclenchement des pluies.

Conclusion

Le Massif de Bouzaréah est un massif primaire constitué de roches cristallophylliennes ; il se structure en plusieurs unités tectoniques qui se superposent et se séparent par des contacts anormaux orientés est-ouest. Le Tertiaire a vu la mise en place d'un complexe de formations sédimentaires (calcaires, grés, marnes, argiles) plus ou moins sensibles à l'érosion (glissement de terrain, ravinement, érosion fluviale). La présence de nombreux remblais sauvages exacerbent les conditions propices à l'érosion.

Le Massif de Bouzaréah comprend trois unités hydrologiques, le bassin-versant de Beni Messous, le bassin-versant de l'Oued Koriche ainsi qu'une vingtaine de petits sous-bassins versants côtiers. On retiendra : un relief de forme allongé ou compact ; des pentes moyennes à fortes ; des plaines agricoles exclusives au bassin-versant de Beni Messous ; un réseau hydrographique théorique dense. Ce dernier présente une prédisposition naturelle à générer des phénomènes de crue rapide à certaines confluences, de par les caractéristiques climatiques de la région (climat méditerranéen). Les formes les plus agressives de ces épisodes hydro-météorologiques sont les cyclogenèses à développement rapide, observées particulièrement en automne et en hiver. Malgré la prédisposition naturelle du Massif de Bouzaréah au risque hydrologique (ruissellement superficiel, coulée boueuse, crue, inondations) et de glissement de terrain, son territoire est marqué par une conquête urbaine en continue croissance. Cette urbanisation a connu des périodes de développement sauvage (après l'Indépendance par exemple) et continue à être menée en absence totale de politique de gestion intégrée du risque.

Synthèse de la deuxième partie

L'analyse du contexte social dans lequel le Massif de Bouzaréah s'est développé nous a permis de mettre en évidence sa grande richesse architecturale et culturelle. Mais l'analyse sociale a également révélée que cette région souffre de nombreux problèmes : 1) d'ordre législative : la présence d'une partie de la ville en zones à haut risque s'explique en partie par la longue absence de textes de lois gérant le développement territorial en zone à risque ; 2) d'ordre politique : l'Algérie a connu de nombreuses périodes de stress politiques (après l'indépendance algérienne en 1962, la décennie noir algérienne entre 1990 et 2000) durant ces périodes d'instabilité souvent le tissu urbain s'est développé d'une manière complètement sauvage ; 3) d'ordre urbaniste : le Grand Alger présente dans certains de ces quartiers une apparente anarchie urbaine. Cette anarchie est le résultat de la mauvaise gestion, d'un manque de planification à moyen et à long terme mais aussi d'un manque de contrôle et de suivi sur le terrain. De ce fait on déduit que la ville du Grand Alger telle qu'elle est aujourd'hui (anarchie urbaine, manque d'ordre qualitatif et quantitatif d'infrastructures, ...) ne peut assurer correctement son rôle de capitale du pays (pôles économique, politique et culturel).

Un travail de cartographie diachronique nous a permis de reconstruire l'évolution du tissu urbain de 1960 à 2011. Tenant compte des objectifs fixés dans ce travail, on a utilisé différentes méthodes pour reproduire l'évolution du territoire, et on a pu démontrer, qu'à partir d'une donnée gratuite et facilement accessible, des documents de grand intérêt pour la gestion des risques hydrométéorologiques ou la gestion territoriale d'une manière générale peuvent être reproduits.

L'analyse du contexte physique régional dans lequel s'intègre le relief de Bouzaréah, a relevé la prédisposition naturelle du Massif de Bouzaréah au développement de phénomène de crue et de ruissellement superficiel (climat méditerranéen connu pour ses cyclogenèses à développement rapide, forme de relief, formations sédimentaires plus ou moins sensibles à l'activité érosive, remblais sauvages très propices à l'érosion hydrique, la densité du réseau hydrographique, zones de confluence, ...). Une prédisposition naturelle aggravée par une conquête urbaine massive du territoire. L'anthropisation du milieu et leur effet amplificateur sur les phénomènes de crue et de ruissellement superficiel est souligné presque dans tous les travaux qui traitent la question, cependant il reste jusqu'ici non quantifié.

Troisième partie

Contribution de la thèse à l'étude du risque hydrométéorologique à Alger

Introduction

Chapitre 5 : Détermination et choix des événements de référence

Chapitre 6 : Simulation numérique

Chapitre 7 : Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

Chapitre 8 : Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

Synthèse de la troisième partie

Introduction de la troisième partie

Cette partie a comme but de pousser plus loin l'analyse des phénomènes de crue et de ruissellement superficiel qui se développent dans le Massif de Bouzaréah. En adoptant une conception systémique de la problématique et en utilisant des outils de simulation numérique, on compte apporter de nouvelles informations, qui peuvent aider à instaurer les techniques de gestion les plus adéquates à la nature du terrain.

En premier lieu, il a fallu choisir un événement météorologique qui servira plus tard à implémenter les simulations numériques. L'exploitation d'archive montre que l'événement des 9-10 novembre 2001 est, d'un point de vue de cumul pluvieux, le plus important sur une série de données qui dépasse cent ans d'enregistrement. Mais pas seulement car d'un point de vue dégâts occasionnés cet événement reste sans précédent dans le bassin méditerranéen.

A l'aide d'un outil de simulation numérique (l'automate cellulaire *Ruicells*) on a tenté d'analyser et d'évaluer l'efficacité du système morphologique, comprendre la structure interne des unités hydrographiques, reproduire et cartographier l'évolution spatio-temporelle de la réponse hydrologique, détecter de probables anomalies à l'échelle locale, quantifier l'impact de l'anthropisation du milieu sur le comportement hydrologique.

En se basant sur les différentes analyses et simulations effectuées antérieurement, une analyse systémique est ensuite menée, dans le but de produire un document de synthèse capable de faire cerner, aux lecteurs, les différents éléments de la problématique de crue et de ruissellement superficiel dans le Massif de Bouzaréah.

Au final, on a voulu proposer un document d'aide à la décision. Pour cela on a cartographié le risque (carte d'aléa, carte de vulnérabilité et carte de risque), puis à la lumière des constats et de résultats obtenus le long de notre travail, on a proposé, à l'échelle du bassin-versant voire du sous-bassin-versant, des interventions privilégiant une gestion intégrée et préventive du risque.

Chapitre 5

Détermination et choix des événements de référence

Introduction

5.1. L'événement de référence pris en compte dans l'étude, celui des 9-10 novembre 2001

5.2. Impacts socio-économiques et politiques de l'événement

Conclusion

Introduction

Le risque de crue et d'inondation a toujours été présent dans le Grand Alger ; selon Conesa (1970), « *presque tous les ans, lors des grosses pluies d'automne, quand les cadavres [d'animaux] de l'été obstruent caniveaux, buses et gouttières, l'Oued M'Kacel déborde et inonde les bas quartiers du Pont* ». La prise de conscience de ce risque est « très ancienne » ; le 23 janvier 1937, le maire de la capitale envoie un courrier au Préfet d'Alger pour l'avertir du risque qu'encourt la ville : « (...) *Des quantités considérables de terres dont une grande partie vient de se déposer dans la section couverte de l'Oued M'Kacel provoquent, chaque hiver, son ensablement. C'est ainsi qu'à la suite des pluies torrentielles de 1935, l'obstruction de l'ouvrage a été presque complète, la quantité de terres déposées s'étant élevée à 5 000 m³ environ. (...) On peut donc craindre une obstruction complète de la partie couverte de l'oued et l'inondation des quartiers bas de Bab-el-Oued qui en serait la conséquence. En vous signalant la gravité de cette situation, j'ai l'honneur de solliciter votre intervention auprès des services compétents, afin que les mesures nécessaires soient prises sur les communes d'El Biar et de Bouzaréah (...)* ». En fait, depuis 1894, ce risque d'inondation est bien présent et s'est accru avec l'augmentation progressive de la vulnérabilité.

Grâce à l'exploitation de différentes sources d'archives tels les articles de presse (bulletin municipal, 1953), les écritures littéraires (Conesa, 1970), les documents officiels des communes, les grands programmes d'aménagement de la région (du document d'orientation urbanistique de 1920 au GPU de 1996), les documents juridictionnels (décret du 6 novembre 1937, décret n° 85-231 de 1985, la loi n° 89-26 de 1990, la loi n° 01-20 de 2001, la loi n° 03-10 de 2003, la loi n° 04-20 de 2004), l'exploitation des bases de données et les travaux de nature climatologique (base de donnée ONM et fiches techniques publiées en 2002 et 2006 ; Hamadache *et al.*, 2002) et les travaux de nature hydrologique (AHRH, 2001, 2008), on a pu recenser un certain nombre d'événements qui ont touché le Grand Alger (tableau 5.1).

Tableau 5.1. Principaux événements hydrométéorologique intenses qui ont frappé la région du Grand Alger par le passé.

Date de l'événement	Cumul pluviométrique
31 octobre 1911	134 mm
31 septembre 1934	101,40 mm
11 et 12 novembre 1935	161,5 mm à Bouzaréah
20 décembre 1953	Introuvable
17 et 18 décembre 1957	112,6 mm à Alger-Dar el Beida
29 et 30 mars 1974	86,7 mm à Alger Dar El Beida.
9 et 10 novembre 2001	262 mm à Bouzaréah
25-29 novembre 2007	233,5mm à Bouzaréah

5.1. L'événement de référence pris en compte dans l'étude, celui des 9-10 novembre 2001

L'événement des 9-10 novembre 2001, qui a frappé la partie occidentale du Grand Alger, aura marqué l'histoire des métropoles méditerranéennes, tant par la gravité des pertes en vie humaines que par l'ampleur des dégâts matériels (GECOTEC, 2002). L'événement météorologique à l'origine du déclenchement de la catastrophe a souvent été décrit comme exceptionnel notamment dans les articles publiés par les médias, dans les discours politiques et dans certains rapports techniques. Une qualification d'« exceptionnel » justifiée par la valeur du cumul pluviométrique jamais enregistrée auparavant (fig. 4.10), dont on a mesuré plus de 263 mm en moins de 24 h (cumul du 9 novembre à 19h30 au 10 novembre à 10 h), enregistrant ainsi un surplus pluviométrique de 132 % par rapport à la moyenne mensuelle habituelle du mois de novembre.

Vu son caractère dévastateur et en raison de l'absence de stations de jaugeages hydrologiques, l'événement des 9-10 novembre 2001 a fait l'objet de nombreuses études. La forme de ces études varie en fonction de leur objectif, du cadre d'intervention et de la discipline concernée. Ces études ont été : des travaux descriptifs et généralistes (présentations destinées au grand public, comme la communication faite le 14 juin 2005 à Alger par Mr M. Smail, Directeur du logement de la Wilaya d'Alger, qui est également le responsable du projet « *Réduction de la vulnérabilité des zones urbaines de la wilaya d'Alger aux catastrophes naturelles* », ou encore les travaux de Djellouli et Saci (2003). Dans le même temps, des études plus spécialisées et approfondies ont vu le jour, n'abordant souvent qu'un seul aspect de la catastrophe. Les premiers travaux réalisés directement après la catastrophe ont été ceux menés par les services de l'ANRH d'Alger, qui se sont focalisés sur le fonctionnement hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche, lieu de la catastrophe. Les travaux de l'ANRH ont fourni les premières estimations concernant les débits (débit de pointe : 730 m³/s) et les volumes d'eau écoulés (2.600.000 m³ d'eau et sédiments charriés) le jour de la catastrophe (Behlouli, 2001). Machane *et al.* (2008) ont proposé une méthode permettant d'estimer l'épaisseur et le volume de la coulée boueuse déclenchée le jour de l'événement. Il s'agit d'une estimation basée sur le couplage de la méthode des enregistrements H/V-bruit de fond et celle de la vitesse *down-hole* des ondes S. Il est à noter que les mesures qui ont « alimenté » les différents calculs réalisés ont été effectuées uniquement au niveau du stade Frehani de Bab-el-Oued.

La configuration atmosphérique, le premier facteur moteur de cette catastrophe, a suscité l'intérêt de nombreuses équipes de recherche. Elle a fait l'objet de plusieurs analyses, par les services de l'ONM d'Alger, dont les travaux ont été publiés en 2001, 2002 et 2006 sous forme de fiches techniques, par les météorologues Hamadache *et al.* (2003) et par Argence (2008), ce dernier précisant à propos du choix d'étudier la configuration atmosphérique de 2001 : « (...) l'une d'elles a plus particulièrement retenu notre attention du fait de ses conséquences dramatiques pour les populations touchées mais aussi en raison de son caractère inhabituel au vu de la zone géographique concernée ».

5.1.1. Cinématique

Au préalable, il convient de rappeler brièvement les faits marquants ayant conduit à la catastrophe des 9-10 novembre 2001 (El Kadi, 2001; Bousbara, 2008). Durant toute la nuit, des pluies diluviennes associées à des vents violents se sont abattus sur la métropole algérienne et sur les contreforts du Massif de Bouzaréah. Au petit matin, heure à laquelle de nombreux travailleurs se rendent sur leur lieu de travail, le réseau routier était dense, les pluies ont redoublé d'intensité, déclenchant de conséquents phénomènes de ruissellement, notamment sur l'autoroute du Frais Vallon qui se métamorphosa, entre 8 h et 9 h du matin, en un véritable torrent. Cette structure routière étant d'ordinaire déjà saturée, bon nombre de personnes se sont retrouvées piégées dans leur propre véhicule, d'autant que les flots de crue étaient fortement chargés en sédiments mélangés à des débris en tout genre (arbres, tôles, poteaux de signalisation, véhicules...).

Lors du passage des écoulements en contrebas du carrefour Triolet, à l'emplacement du marché populaire organisé tous les samedis, les dégâts ont pris une ampleur catastrophique. Une couche de boue de 3 m d'épaisseur y sera observée, celle-là même qui a enseveli plus d'une centaine de personnes (Mohamed, 2001). En déferlant ensuite sur Bab-el-Oued, le flot torrentiel s'est heurté aux immeubles, créant par effet de compaction plusieurs vagues boueuses qui ont atteint à certains endroits près de 4 m de hauteur, selon plusieurs témoins oculaires. A 10h30, la pluie a cessé et Bab-el-Oued s'est retrouvé terrée sous près de 2 m de boue. A 16h30, l'armée était réquisitionnée pour entamer le déblaiement des décombres et les premières recherches de victimes (Menad *et al.*, 2011). Le plan ORSEC n'a quant à lui pas fonctionné. Ce plan ORSEC n'existe qu'en théorie à Alger et M. El-Habiri, directeur de la Protection Civile, déclare à ce propos au Jeune Indépendant du 29 novembre 2001: « *Je vais être franc avec vous. Il y a un plan ORSEC, seulement, concrètement, celui-ci n'existe ni au niveau de la commune, ni au niveau de la daïra, ni à celui de la wilaya. En dépit du fait que la wilaya d'Alger dispose de cinq walis (le wali et les quatre walis délégués), le plan n'a pas été mis en œuvre. Je comprends la difficulté du moment, mais on aurait pu sauver des gens si on avait mis en œuvre le plan ORSEC. Il contient quatorze modules qui doivent être pris en charge au niveau des communes. Or, celles-ci ne savent pas ce qu'est un plan ORSEC. D'ailleurs, c'est pour cela que nous avons été pris au dépourvu* ».

5.1.2 Description de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001

Les pluies diluviennes des 9-10 novembre 2001 ont été provoquées par une configuration synoptique de vaste étendue spatiale dont les conséquences, variables, ont été observées sur les deux rives du bassin méditerranéen. Bien que cet événement météorologique ait duré plusieurs jours, dans le cadre de notre étude, on ne décrira que les configurations atmosphériques observées les 9 et 10 novembre 2001. Cette période correspond à l'arrivée et la stationnarité de la dépression au-dessus de l'ouest algérien.

Le 9 novembre, veille de l'événement, un profond talweg d'altitude engendrant une circulation méridienne rapide traverse la France. Le 10 novembre, ce bas géopotential se retrouve isolé au sud des Baléares et engendre une cyclogenèse très active jusqu'au nord de l'Algérie. Sur ces régions littorales, la pression en surface est aux alentours de 1015 hPa mais

elle diminue rapidement (1006 hPa le 9/11 à minuit). Plusieurs amas convectifs vont dès lors se former sur les côtes méditerranéennes, du Maroc à l'Algérie.

En surface, les températures sur le littoral algérois ont été de l'ordre de 18-22°C dans l'après-midi du 9/11, ces températures étant relativement chaudes par rapport à celles enregistrées sur la rive nord du bassin méditerranéen. La déperdition énergétique terrestre a été contrainte par une vaste perturbation nuageuse (de 10 à 13°C à 0 h UTC sur la cote algérienne), ce qui a permis le maintien des valeurs de températures élevées tout au long de la nuit du 9 novembre (fig. 5.1).

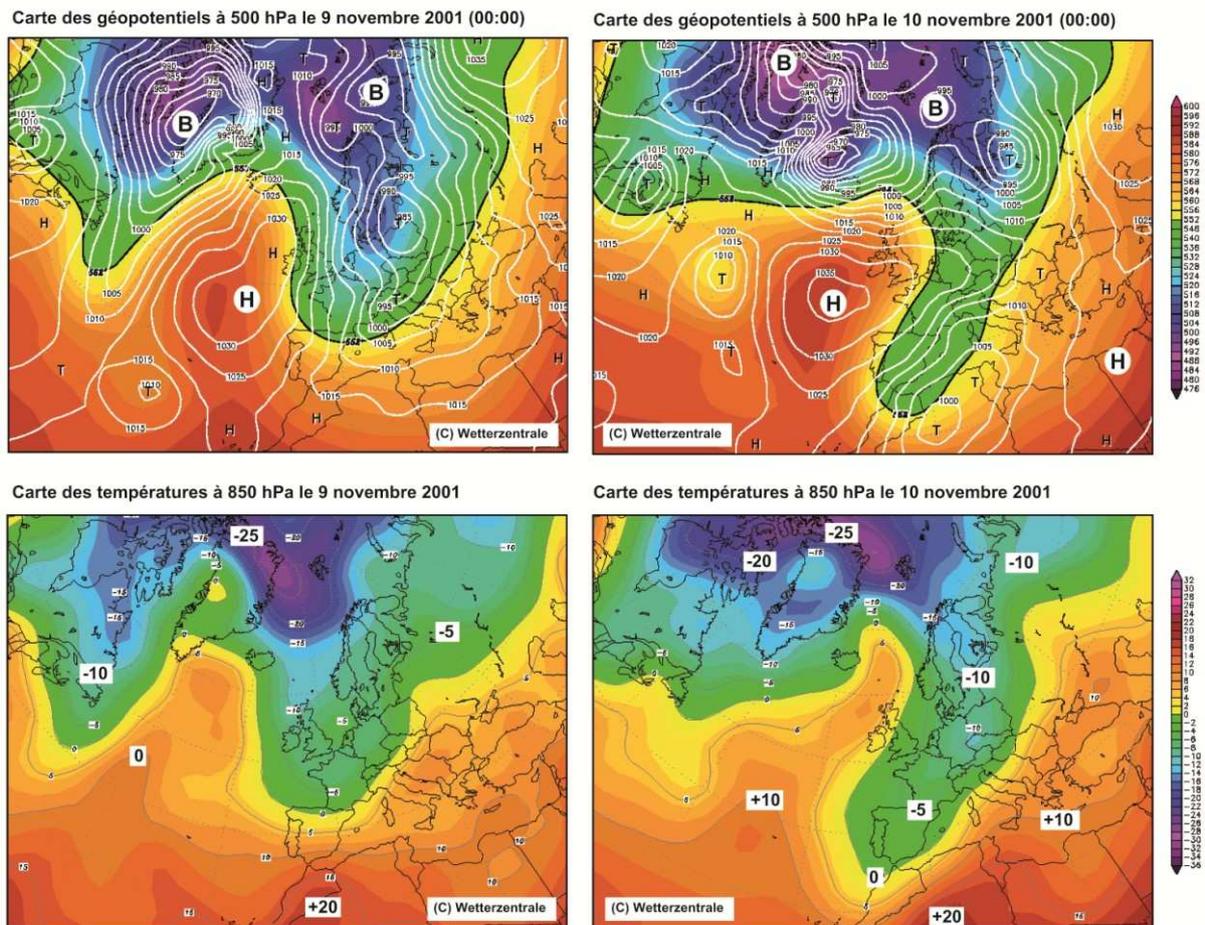


Fig. 5.1. Carte des géopotentiels matérialisant le talweg d'altitude dans la nuit des 9-10 novembre 2001 (d'après les cartes du site www.wetterzentrale.de/topkarten). B : bas géopotentiels ; H : hauts géopotentiels.

Associée au front froid des basses couches de la troposphère, la cellule convective s'est divisée en deux. On retrouve ainsi la temporalité des précipitations relevées : les premières pluies dans la soirée du 9 novembre sont liées au passage d'un premier front tandis que la seconde partie active de la perturbation a affecté l'agglomération d'Alger dans la matinée du 10 novembre jusqu'aux alentours de midi (Menad *et al.*, 2011).

5.1.2.1. Répartition spatio-temporelle des pluies

Alors que la plupart des études précédentes (Hamadache *et al.*, 2002 ; ONM, 2002) font référence aux relevés de la station de Bir-Mourad-Rais, dans le cas de l'événement de no-

vembre 2001, c'est à la station de Bouzaréah, située au sud du bassin-versant de l'Oued Koriche (site de l'événement), que le cumul le plus important a été enregistré, avec 263 mm entre 19h30 (heures locales) le 9/11 et 10h30 le 10/11, pour 208 mm à Bir-Mourad-Rais sur la même période (fig. 4.2).

L'épisode pluvieux se décompose en deux séquences (fig. 5.2) : des pluies régulières dans la soirée du 9/11 (avec un cumul de 114 mm en 5 h) suivies par deux pics d'intensité (55 mm en 30 min) dans la matinée du 10/11 entre 8 h et 8h30 puis de 9h30 à 10 h. Ce cumul, enregistré sur un laps de temps de 15 h, correspond à un écart de 132 % par rapport à la moyenne mensuelle de cette station (le précédent record était de 135 mm le 2 février 1954) ; un tel montant n'avait jamais été enregistré auparavant (fig. 4.10), même sur des stations situées à proximité d'Alger où des relevés sont pourtant effectués depuis plus d'une centaine d'années (Behlouli, 2001 ; Menad *et al.*, 2012).

La spatialisation du phénomène pluvieux à échelle fine n'est pas envisageable à partir des données mesurées au sol par les postes pluviométriques car la variabilité spatiale de ce type de phénomène est particulièrement importante. La station du port d'Alger n'a enregistré qu'un cumul de 159 mm (entre le 9/11 à 6 h et le 10/11 à 18 h) alors qu'elle se situe à 10 km au nord-est de la station de Bouzaréah (Behlouli, 2001). Les pluviographes installés près des barrages de Hamiz et de Keddara, situés à 45 km au sud d'Alger, n'ont recueilli que 23 mm et 26 mm sur le même intervalle de temps et, à Réghaïa, le cumul n'a été que de 53 mm.

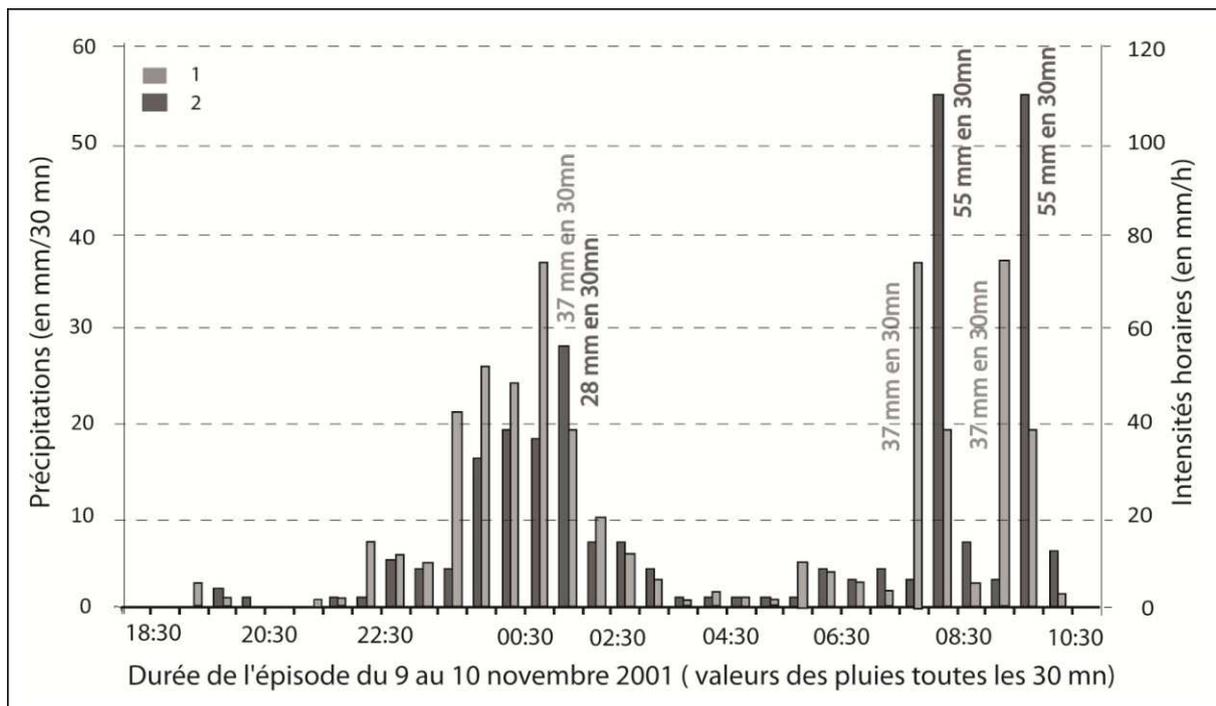


Fig. 5.2. Intensités des pluies relevées lors de l'épisode pluviométrique du 9 au 10 novembre 2001. Hyéto-gramme reconstitué à des unités de temps de 30 minutes, aux deux stations de Bir-Mourad-Rais et la station de Bouzaréah (d'après les données du rapport ISL-BRGM, 2006).

Les pluies de la matinée du 10 novembre (de 4 h à 10h30) sont les plus hétérogènes : 103 mm à la station du Port Alger et 94 mm à Bouzaréah, mais le pluviographe a enregistré deux pics de 19 mm en 30 min à Bir-Mourad-Rais, tandis que, dans le même laps de temps, le

cumul pluviométrique n'a guère dépassé 1,4 mm à la station de Dar el Beida, signalant ainsi un arrêt local de la pluie.

Afin de mieux comprendre la distribution spatio-temporelle de l'événement des 9-10 novembre 2001 à l'échelle du Grand Alger, l'épisode a été périodisé par intervalles de 12 h (tableau 5.2). Les données des quatre stations météorologiques les plus proches d'Alger ont permis de suivre la propagation des pluies (tableau 5.2). Les deux stations situées le plus à l'est (Dar-El-Beida et Bir-Mourad-Rais) ont été les premières à enregistrer des pluies. La station de Bouzaréah et celle du port d'Alger ont enregistré des pluies 12 h plus tard par rapport à Dar-El-Beida : la (les) cellule (s) convective (s) s'est (se sont) donc déplacée (s) très lentement vers l'ouest (12 h pour parcourir 16 km). En l'absence de données à échelle plus fine (images radar par exemple), cette analyse ne peut aller plus loin et la localisation exacte de l'épicentre de la perturbation reste à ce stade inconnue (Menad *et al.*, 2012).

Tableau 5.2. Cumul des précipitations du 10/11/01 pour quatre stations du Grand Alger (ANRH ; ONM, 2001).

Hauteur des pluies relevées sur des périodes de 6 h	Bouzaréah (P ; en mm)	Bir Mourad Rais (P ; en mm)	Port d'Alger (P ; en mm)	Dar El Beida (P ; en mm)
9/11 (6 h-18 h)	0	26	26,9	21,7
9/11-10/11 (18 h-6 h)	129,2	82,9	72	8,1
10/11 (6 h-18 h)	132,4	50	109	1,4
Cumul pluviométrique (en mm)	261,6	158,9	207,9	31,2
Latitude (degrés décimaux)	36,48 N	36,75 N	36,46 N	36,41 N
Longitude (degrés décimaux)	03,01 E	03,05 E	03,06 E	03,13 E
Altitude des stations	354 m	140 m	8 m	25 m

ISL-BRGM (2006) a toutefois reconstitué deux hyétogrammes en combinant plusieurs informations : 1) les relevés de 12 h mesurés à la station de Bouzaréah ; 2) les intensités des pluies extrapolées pour Bir-Mourad-Rais (pas de 30 min) ; 3) les enquêtes de terrain. Partant du constat que le cumul enregistré à la station de Bouzaréah dépasse d'environ 40 % celui enregistré à la station de Bir-Mourad-Rais, ainsi le premier hyétogramme a été obtenu en multipliant par 1,62 chacun des cumuls enregistrés au pas de temps de 30 min à Bir-Mourad-Rais ; le second hyétogramme recalibre les heures de début et de fin d'événement pour cette deuxième station (fig. 5.3). Ce second graphique sera utilisé par la suite car il constitue la donnée d'entrée pour les calculs hydrauliques effectués par ISL-BRGM (2006) et la reproduction de ces intensités semble la plus conforme à nos observations de terrain.

5.1.2.2. Précisions topo-climatique et historique

Les reliefs bordant le bassin méditerranéen constituent une barrière physique face aux masses d'air instables, chaudes et humides. L'orographie du bassin de l'oued Koriche (site où les impacts de l'événement ont été maximums) pourrait avoir amplifié l'instabilité en forçant, par ascendance orographique, les masses d'air provenant de la Méditerranée. Cet effet oro-

graphique a bien été observé le long de l'Atlas tellien car des cumuls tout aussi remarquables ont été observés en 24 h sur des régions du centre et de l'ouest algérien : 147 mm à Mostaganem, 198 mm à Arzew ou 195 mm à Oran (Djellouli et Saci, 2003).

Dans le cadre de la présente recherche, le nombre d'événements pluviométriques (pluies ≥ 80 mm/24 h) a été comparé aux cumuls moyens observés sur une série de données de 50 ans pour les stations de Bouzaréah, Bir-Mourad-Rais et Dar-El-Beida, aux caractéristiques physiographiques distinctes (fig. 4.3). Ces trois stations ont enregistré respectivement 11, 12 et 15 événements, avec des intensités moyennes très comparables (113, 101 et 111 mm en 24 h ; tableau 5.3). Les instabilités s'étendent rarement sur l'ensemble de ces trois stations, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle les pluies observées dans cette région résultent surtout de situations météorologiques spatialement localisées (Menad *et al.*, 2012).

Tableau 5.3. Répartition spatio-temporelle des événements intenses qui ont frappé Alger entre 1891 et 2004.

	Bouzaréah	Bir Mourad Rais	Dar El Beida
Intervalle des valeurs des cumuls enregistrés (en mm)	[80-263]	[80 – 145]	[80 - 155]
Nombre d'événements	11	12	15
Intensité Moyenne (en mm)	113,11	101,84	111,21
Coefficient de corrélation	Bouzaréah/Dar El Beida : 0,33	Bouzaréah/ Bir Mourad Rais : 0,75	Dar El Beida/Bir Mourad Rais : 0,94

5.1.3. Réponse hydrologique

La description de la réaction hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche, engendrée par l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 et présentée ici, n'est pas exhaustive. On se contentera d'exposer ici certains travaux dans lesquels cet événement hydrométéorologique a été décrit ; une analyse plus détaillée concernant la réponse hydrologique sera effectuée dans le chapitre 8 (cf. *infra*).

L'un des plus importants travaux réalisés juste après la survenue de la catastrophe, est celui mené par les services de l'ANRH, et présenté à plusieurs reprises par Behlouli (2001, 2002, 2006). Ce travail s'est basé principalement sur des méthodes de calculs hydrauliques. Les relevés des laisses de crues, effectués en trois endroits différents dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (un dans la partie moyenne du bassin-versant, les deux autres sont effectués plus vers l'aval à l'entrée du quartier de Bab-el-Oued; fig. 5.3), ont été utilisés pour estimer les vitesses et les volumes d'eau écoulés le long de la voie rapide Chevalley-Triolet (une voie qui raccorde l'amont du bassin-versant à son aval). Les résultats sont présentés dans le tableau. 5.4.

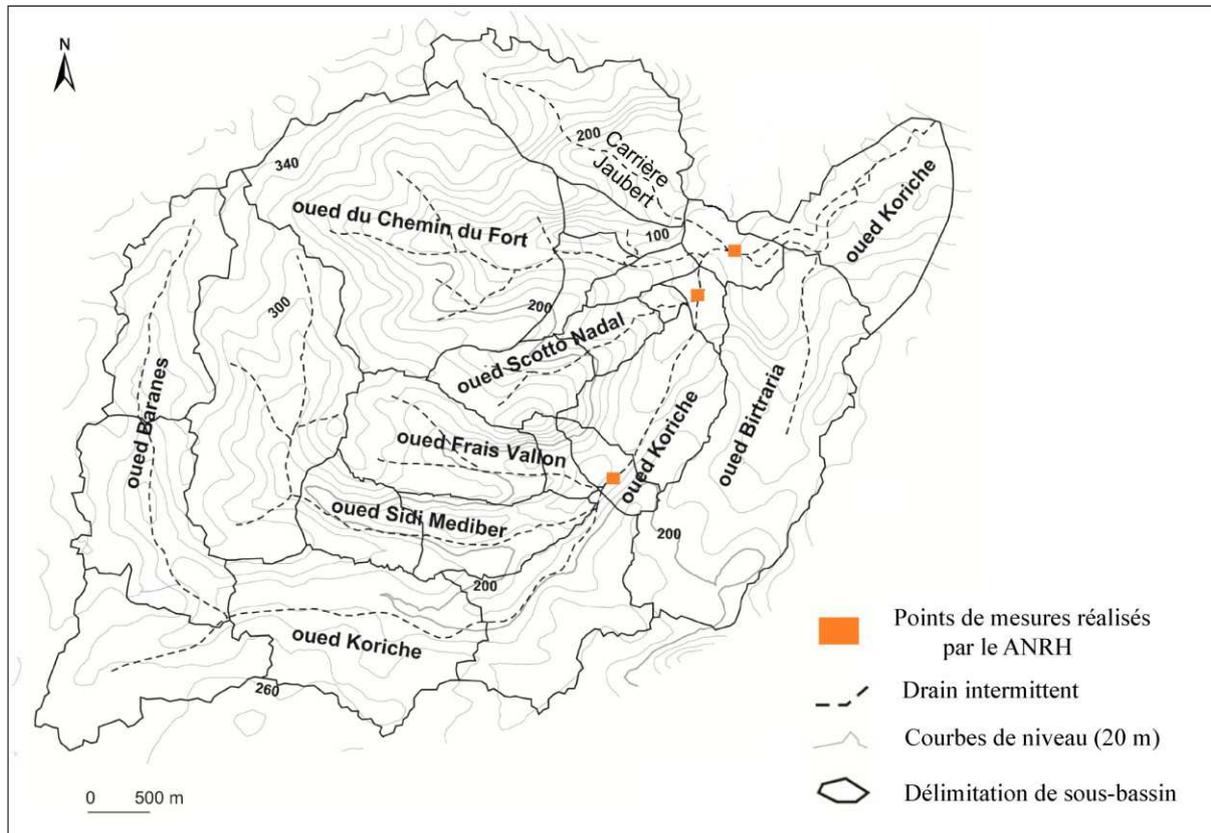


Fig. 5.3. Localisation des relevés effectués par les services de l'ANRH.

Tableau 5.4. Estimation des débits maximums instantanés qui ont eu lieu le 10 novembre au niveau de la Passerelle Scotto et Triolet.

Site	Hauteur d'eau (en m)	Section mouillée (en m ²)	Pente (en %)	Vitesse d'écoulement (en m/s)	Débit (en m ³ /s)
Passerelle Scotto	2,2	37	0,05	3,87	143
Triolet	2,45	113	0,036	6,47	730

Les valeurs présentées ci-dessus ont été qualifiées d'exceptionnelles par les services de l'ANRH, arguant que les eaux acheminées vers l'aval se sont concentrées au niveau de Triolet (réponse hydrologique concomitante à Triolet). En revanche, l'étude ne détaille pas la répartition spatio-temporelle de l'événement, utilisant plutôt des valeurs instantanées. Il n'y a pas eu non plus de comparaison entre la répartition spatio-temporelle de l'événement météorologique et celle de la réponse hydrologique. Les chiffres proposés par les services de l'ANRH sont donc à prendre avec une certaine prudence, compte tenu des limites exposés plus haut. Dans le rapport de l'ANRH, n'est pas décrit clairement quel type de calcul hydraulique a été utilisé, or toute estimation de débit *via* les formules de Manning-Stickler est très difficile. En raison de la présence d'un grand nombre de débris et d'obstacles acheminés le jour de l'événement et ayant formé des embâcles en différents points de la voie rapide (en particulier au niveau des passerelles de Frais Vallon, Scotto Nadal et Triolet), il est quasiment impossible dans de telles conditions de pouvoir définir avec précision un coefficient de Stickler (El kadi Abderrezzak *et al.*, 2007).

Un deuxième travail intitulé “*Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles*” dans lequel l’événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 a été analysé est celui mené par les deux bureaux d’étude ILS et BRGM (ISL-BRGM, 2006). Leur analyse est basée sur l’hypothèse suivante : « *Les inondations survenant sur le bassin versant de l’oued Koriche proviennent des débordements ou des dysfonctionnements de ses collecteurs et ouvrages dus à des pluies engendrant des débits supérieurs à leur capacité* ». Afin de pouvoir localiser et faire face à ces dysfonctionnements, ISL-BRGM (2006) ont procédé avec un modèle hydrologique/hydraulique, construit grâce au logiciel SWMM 5.0 développé par l’US « *Environmental Protection Agency* ».

Les débits de pointe ont été évalués *via* les sections et les vitesses d’écoulement. Les vitesses en question ont été estimées d’une manière visuelle à partir des vidéos filmées le jour de l’événement. Les estimations ont eu lieu en trois endroits différents, à la passerelle Scotto et en amont de la rue Rachid Kouache et de l’avenue du Colonel Lofti. Les résultats obtenus sont respectivement : 140-180 m³/s, 60 m³/s et 75 m³/s. Le débit au carrefour Triolet était de 120-160 m³/s, une valeur obtenue en additionnant les débits estimés en amont de la rue Rachid Kouache et de l’avenue du Colonel Lofti ; cette démarche est justifiée par le fait que l’ensemble des écoulements qui passent par le carrefour Triolet se déversent en totalité par ces deux voies de circulation.

La valeur des débits au niveau du carrefour Triolet est à prendre avec précaution, compte tenu du comportement très complexe des écoulements au niveau des carrefours hydrauliques, dont plusieurs paramètres entre en jeu, à savoir : la profondeur d’eau en amont de l’intersection, la pente, le type et la position des ressauts hydrauliques formés au niveau du carrefour (Desbordes, 1995; Chocat 1997 ; Hingray, 1999 ; Paquier, 2003 ; Rivière *et al.*, 2005 ; El kadi Abderrezzak *et al.*, 2007). On constate également que les deux issus présentent des caractéristiques physique et géométrique différentes (pente et section d’écoulement). Ainsi, le fait d’additionner simplement les débits estimés au niveau de l’aval d’un carrefour pour obtenir le débit en amont de ce dernier, peut donner des valeurs erronées. Autre constat (d’après nos propres observations), sur le terrain, il existe trois voies de circulation et non deux, à savoir, la rue Hammadi Nacer, l’avenue du Colonel Lofti et le boulevard de Touati Said. Il faut ajouter à cela les apports du sous-bassin-versant Jaubert dont l’exutoire coïncide avec le carrefour ; certes ses apports sont minimes en comparaison avec ceux de la voie rapide, mais ses effets sur la formation de ressauts hydrauliques ne peut être négligé.

Sur les plans actuels et sur les plans cadastraux de 2005 (à cette date le projet “*Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles*” était en cours), la rue de Rachid Kouache mentionnée dans l’étude n’existe pas (fig. 5.4). A ce stade, on n’a pas compris le détail de la démarche ni quelle a été la logique suivie par les auteurs de ces calculs hydrauliques, d’autant qu’aucun plan de localisation n’a été joint aux études consultables.

L’ensemble des valeurs de débits estimés avec la méthode expliquée ci-dessus seront utilisées par les deux bureaux d’étude ILS et BRGM comme unique valeurs de validation les résultats des simulations hydraulique/hydrologique réalisées dans un deuxième temps dans le

cadre du projet “*Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles*”.

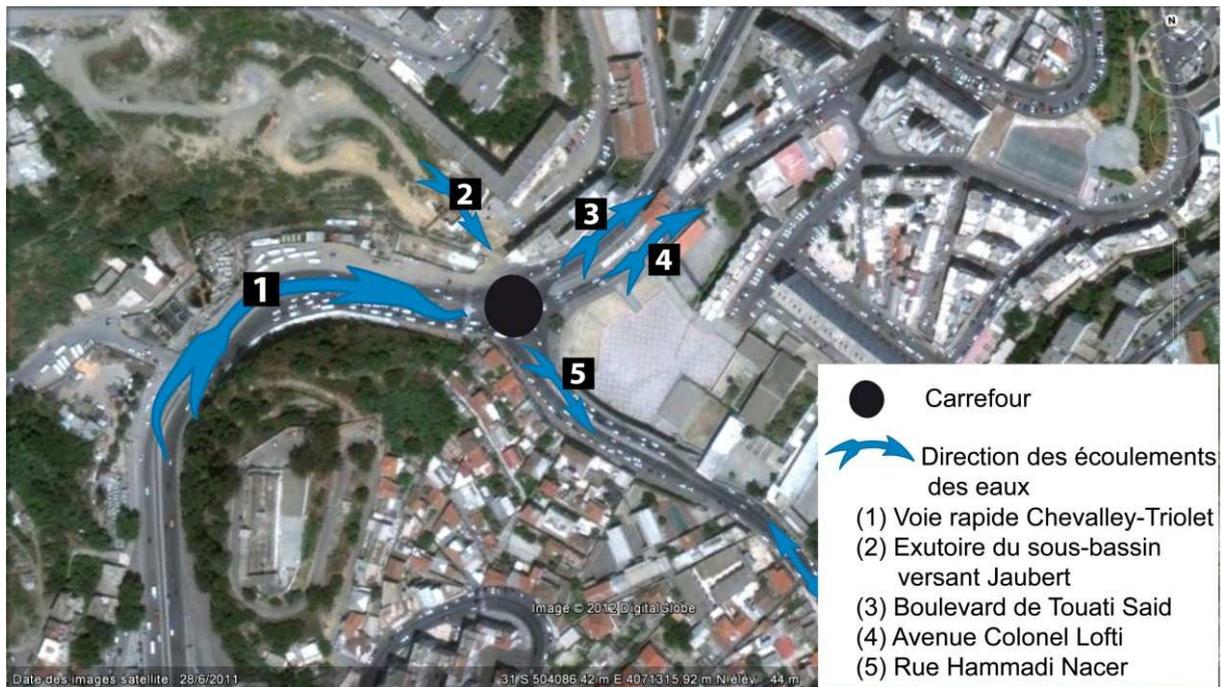


Fig. 5.4. Configuration du carrefour Triolet.

On ne peut pas s’empêcher d’émettre également quelques réserves sur le fondement même du travail (cf. *infra*). Les ruissellements superficiels observés le jour de l’événement ne peuvent pas être expliqués uniquement par un dysfonctionnement ou un dépassement de la capacité d’évacuation des collecteurs. Le bassin-versant de l’Oued Koriche présente une prédisposition naturelle à produire des ruissellements superficiels, il suffit de se rendre sur le terrain au moment d’un épisode pluvieux fréquent pour s’en rendre compte (fig. 5.5).

On s’aperçoit rapidement que les eaux reçues par le bassin-versant ne rejoignent pas toutes le réseau d’assainissement : la structure du réseau d’assainissement (géométrie interne ; géométrie des ouvrages hydrauliques ; localisation des points d’accès aux eaux) doit être mise en cause. Il est fort probable que la structure du réseau soit inadaptée pour évacuer les écoulements à caractère rapide produits dans ce genre de bassin-versant (Gomez *et al.*, 1998) ; c’est plutôt à ce niveau là qu’il faut chercher à expliquer pourquoi le jour de l’événement, les écoulements de surface ont préférentiellement circulés sur les nombreux linéaires construits en accompagnement de la croissance urbaine, des linéaires qui étaient autrefois les talwegs naturels des vallons secs, en particulier dans les oueds Scotto-Nadal, Chemin-du-Fort et Oued Koriche.



Fig. 5.5. Image des ruissellements superficiels formés dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (clichés : W. Menad, octobre 2010).

5.2. Impacts socio-économiques et politiques de l'événement

Les dégâts provoqués par l'événement hydrométéorologique furent dramatiques, en matière de pertes en vies humaines, dont on compte 781 et près de 350 disparus (des chiffres qui diffèrent plus au moins selon les sources). Côté matériel, les dégâts furent également très lourds, estimés à plusieurs milliards de dinars (*i.e.*, plusieurs millions d'euros).

Les dégâts les plus graves ont été observés au niveau du quartier de Bab-el-Oued (fig. 5.6), d'où l'expression « *les inondations de Bab-el-Oued* » qui est communément utilisée pour nommer l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001. Le quartier de Bab-el -

Oued s'est installé dans la partie aval du bassin-versant de l'Oued Koriche. D'ailleurs Bab-el-Oued, qui signifie « la porte de l'oued » en arabe, indique bien l'emplacement du quartier à l'exutoire du bassin-versant.



Fig. 5.6. Les dégâts observés dans le quartier de Bab-el-Oued suite à l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 (A, B et C : disponibles sur internet mais les auteurs de ces clichés sont inconnus ; D et E : Behlouli, 2001).

Le Conseil National Economique et Social (CNES) a publié en 2003 un rapport intitulé « *L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie : inquiétudes actuelles et futures* », dans lequel les dégâts matériels et économiques directs, provoqués par l'événement 09-10 novembre 2001, ont été répertoriés (CNES, 2003 ; tableau 5.5).

L'ampleur des dégâts provoqués par cet événement a incité les autorités à prendre une série de mesures immédiates, à moyen et à long termes et dans les différents secteurs concernés. Les interventions menées immédiatement après l'événement ont eu comme but principal l'assurance de la reprise du fonctionnement des secteurs vitaux (la circulation routière, l'alimentation en électricité, en gaz et en aliments) dans les endroits les plus paralysés par la catastrophe. Les mesures à moyen et long termes sont entreprises dans le but de prévenir et de réduire la vulnérabilité de ces lieux envers de futurs événements probables. Selon les secteurs d'intervention, les principaux travaux réalisés (ou planifiés) sont les suivants :

- *Secteur hydraulique* : c'est un secteur clé dans la genèse de la réponse hydrologique. Immédiatement après la catastrophe, plusieurs opérations ont été entreprises ou programmées à moyen et long termes, dont les principales sont résumées dans le tableau 5.6.

Tableau 5.5. Evaluation des impacts de l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 qui a frappé la partie ouest du Grand Alger (en millions de Dinars algériens ; i.e., milliers d'euros ; CNES, 2003).

Secteur	Perte d'actifs fixes
Habitat	4601 (7543 sinistrés)
Santé	220
Education	418
Formation professionnelle	760
Jeunesse et sports	130
Culture	6
Culte	30
Sous-total : secteur social	6165
Hydraulique	10600
Infrastructure administrative	84
Port	200
Travaux publics	3000
Autres (PCD)	500
Télécommunications	700
Gaz, électricité et éclairage public	215
Sous-total : Infrastructures	15299
Agriculture	64
Pêche	7
Forêt	150
Industrie	1570
Commerce et artisanat	1191
Tourisme	100
Sous-total : Secteur productif	3082

Tableau 5.6. Principales interventions (immédiats, à long et à moyen termes) programmées au niveau du secteur hydraulique immédiatement après la catastrophe (DRHEE, 2001)

- Travaux de déblaiement, enlèvement des terres et vases et pompage des eaux au niveau des communes sinistrées, notamment Boulevard Mira à Bab el Oued et les artères principales.
- Curage des Oueds et têtes d'ouvrage à travers les communes de la zone du massif de Bouzareah.
- Travaux d'aménagement de l'Oued chemin du fort, commune de Oued Koriche.
- Travaux d'aménagement de l'Oued Scotto Nadal commune de Oued Koriche.
- Travaux de réalisation d'un système d'évacuation des eaux pluviales vers la mer au niveau du Boulevard Mira et réfection du déversoir d'orage, commune de Bab el Oued.
- Curage du collecteur Oued M'KACEL partie aval, commune de Bab el Oued
- Aménagement de l'Oued Frais Vallon, commune de Bouzareah.
- Aménagement de l'Oued Baranes, commune de Bouzareah.
- Travaux de réhabilitation du collecteur Lazhar (à l'intérieur du tunnel sur 7 kms)
- Réalisation du collecteur d'assainissement au niveau de l'autoroute Frais Vallon communes de Oued Koriche et Bouzareah.
- Réfection du réseau d'AEP au niveau de l'autoroute Frais Vallon, commune de Bouzareah.
- Travaux de réhabilitation du tronçon du collecteur Lazhar endommagé (cratère), Frais vallons, commune de Bouzareah.
- Dédoublage du collecteur M'KACEL sur 750 ml en DN 2000 au niveau du cratère, Frais Vallon, commune de Bouzareah.
- Réfection de réseau d'AEP et assainissement au niveau de Trois horloges commune de Bab el Oued.

- *Secteur de forêts* : suite à une prise de conscience que la déforestation qu'a connue la région ces dernières années est l'un des éléments aggravants de la catastrophe. La présence d'un couvert végétal (particulièrement la forêt) peut atténuer l'impact de l'aléa hydrométéorologique (maintenance des sols, diminution des vitesses d'écoulement et des coefficients de ruissellement). Ainsi, un grand projet (budget : 23,5 millions de Dinars algériens ; *i.e.*, 238 milles d'euros; durée : 2 mois) d'entretien des forêts d'Alger a été mené sous la gestion et le suivi de la Conservation des Forêts de la wilaya d'Alger, la Conservation des Forêts d'Alger et le bureau d'études BNEDER. Les travaux ont été réalisés principalement au niveau des sous-bassins versants de Sidi Madjbeur et de Beau Fraisier dans lesquels les oueds ont subi un curage et les berges ont été nettoyées puis fixées notamment avec des gabions (des techniques de fixation mécanique et biologique ont été également utilisées).

- *Secteur des travaux publics* : les interventions en ce domaine ont été immédiates, entamées dès le lendemain de la catastrophe par le biais de travaux de réhabilitation des voies et des réseaux routiers endommagés. D'autres interventions à moyen terme ont été également programmées dont les principales sont : la remise en état du Chemin de wilaya 119 (coût : 800 millions de Dinars algériens ; *i.e.*, de 8 millions d'euros), la reconstruction du Pont de Ain Benian (coût : 67 millions de Dinars algériens; *i.e.*, 680 milles d'euros), et la réhabilitation de l'ensemble de la voirie urbaine dégradée (1 million de Dinars algériens; *i.e.*, 10 milles d'euros).

- *Secteur de la recherche* : suite à ces dégâts considérables, l'Etat algérien a fait une demande de prêt auprès de la Banque Mondiale dans le but de mener un grand projet qui permettra d'atténuer la vulnérabilité des zones urbaines face aux inondations, aux séismes et autres catastrophes naturelles. Ce prêt de 6,6 milliards de Dinars algériens (*i.e.*, 66,7 millions d'euros), a été accordé le 8 août 2002, réparti sur quatre ans : « *il s'inscrit dans le cadre de la stratégie intérimaire d'aide de la Banque à l'Algérie, qui s'attache à combattre la pauvreté en s'attaquant aux problèmes du logement social, de l'insalubrité de l'habitat, de l'insuffisance des ressources en eau, et du chômage urbain* ». Le projet en question s'est terminé fin 2006.

- *Secteur juridictionnel* : les travaux à caractère scientifique, réalisés dans le but d'atténuer la vulnérabilité de la région du Grand Alger face aux risques majeurs, ont été accompagnés et appuyés, dans le domaine législatif, par une série de lois dont les principales sont : la loi n° 01-20 de décembre 2001, la loi n° 03-10 du 13 juillet 2003 et la loi n° 04-20 de 2004 (*cf. supra*, partie 3.2 du chapitre 3).

Conclusion

La région du Grand Alger a été affectée à plusieurs reprises par des aléas hydrométéorologiques à caractère intense dont certains ont été catastrophiques. L'exploitation des différentes sources d'archives témoignent que l'événement le plus remarquable, à la fois par son cumul pluviométrique et par ses dégâts engendrés, est celui observé les 9-10 novembre 2001. Ainsi, on a choisi ce dernier pour être l'événement de référence sur lequel va se baser 1) l'analyse systémique que nous proposons et 2) l'ensemble des simulations hydrologiques réa-

lisées dans le cadre de cette thèse. Ce choix s'est imposé car 1) les événements ne sont pas assez renseignés pour permettre une analyse systémique (en particulier l'identification des facteurs déclenchants et aggravants, *sensu* Arnaud-Fassetta et Fort, 2011 ; Menad *et al.*, 2011) et 2) en absence de hyétogrammes avec des unités fines de temps, ce qui est indispensable pour pouvoir effectuer des simulations hydrologiques. Le choix de l'événement récent de 2001 permet aussi de proposer une évaluation de risque concordante avec les conditions qui règnent actuellement sur le terrain (occupation du sol, changement climatique...).

L'analyse de la configuration météorologique observée les 9-10 novembre 2001 (cf. *supra*), démontre que cette dernière n'a rien d'exceptionnelle et qu'elle s'inscrit dans le contexte général du climat méditerranéen connu par ses épisodes cyclogéniques très actifs. Les dégâts qui en ont résulté ont été tout de même exceptionnels et sans précédent dans le bassin méditerranéen, d'où l'intérêt de l'analyse systémique qui va suivre pour décrypter le scénario qui a conduit cette catastrophe de grande ampleur.

Chapitre 6

Simulation numérique : évaluation du risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah *via* l'automate cellulaire *Ruicells*

Introduction

- 6.1. Principe de fonctionnement théorique de l'automate cellulaire *Ruicells*
- 6.2. Analyse de l'efficacité morphologique et de l'évolution spatio-temporelle de la réponse hydrologique dans le Massif de Bouzaréah
- 6.3. Evaluation de la vulnérabilité : Simulation dynamique des écoulements en intégrant le paramètre d'occupation du sol

Conclusion

Introduction

Ce chapitre évalue le risque hydrologique dans le Massif Bouzaréah en ayant recours aux techniques de la simulation numérique.

Les différents paramètres physiques et géométriques des différents bassins versants du Massif de Bouzaréah ont été analysés dans le chapitre 4, mettant en évidence la structure interne des sous-unités hydrographiques ainsi que la nature de leur réponse hydrologique globale. Néanmoins, ces paramètres ont été considérés avec des méthodes d'analyses classiques, ces dernières présentant l'inconvénient d'être sectorielles puisque les paramètres sont étudiés séparément sans pouvoir être mis directement en interaction. C'est en partant de ce constat qu'on a décidé de recourir aux outils de simulation numérique qui vont permettre :

1) d'analyser et de comprendre la structure interne des trois unités hydrographiques constitutives du Massif de Bouzaréah et cela à travers principalement la matérialisation de l'emboîtement de leurs sous-bassins versants et la distance qui sépare ces derniers à l'exutoire final (Douvinet *et al.*, 2008), ce qui permettra de définir la part de la contribution de chacune de ces sous-unités dans la réponse globale du bassin-versant ; d'établir et de cartographier l'évolution spatio-temporelle de la réponse hydrologique en tout point du bassin-versant et de détecter les probables anomalies existantes à l'échelle locale.

2) de développer des simulations encore plus poussées pour les bassins versants où le danger de crue rapide est le plus évident. A ce niveau, on va intégrer un paramètre de l'hydrosystème supplémentaire, à savoir le mode d'occupation du sol. Le but de cette démarche est d'abord l'analyse des impacts de l'évolution spatio-temporelle de l'emprise urbaine sur le comportement hydrologique du bassin-versant considéré ; l'impact de l'emprise urbaine pourra donc être quantifié, chose jamais faite jusqu'ici sur ce terrain.

Dans le cadre de cette étude, et pour pousser plus loin la caractérisation physique et géométrique menée dans le Massif de Bouzaréah (cf. chapitre 4) et pouvoir atteindre les objectifs fixés ci-dessus, on a choisi de travailler avec l'un des outils de simulation numérique développés dans notre discipline, à savoir l'automate *RuiCells*. Sa structure et son principe de fonctionnement (Delahaye, 2002 ; Langlois et Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al.*, 2008) font de lui l'un des outils le plus proches de nos attentes, permettant d'étudier l'influence de l'organisation morphologique du bassin-versant, entendue comme étant l'association des effets joués par la forme du bassin, la hiérarchie des réseaux hydrographiques et le système de pentes, avec les effets liés à l'agencement spatial des surfaces ruisselantes ou infiltrantes (Menad *et al.*, 2012). D'autres paramètres de l'hydrosystème, tel les modes d'occupation du sol et les épisodes pluvieux du passé, peuvent également être implémentés.

6.1. Principe de fonctionnement théorique de l'automate cellulaire *Ruicells*

Le logiciel *RuiCells* appartient à la famille des automates cellulaires géographiques (ACGs). Il est développé sous le principe fonctionnel d'un automate cellulaire classique tout

en apportant de nombreuses applications complémentaires adaptées aux processus étudiés en géographie. Il convient d'abord d'expliquer le principe de fonctionnement de la famille des automates cellulaires pour pouvoir comprendre par la suite le fonctionnement d'un ACG dont fait partie l'automate *RuiCells*.

6.1.1. Principes des automates cellulaires

Stanislaw Ulam et John Von Neumann sont les fondateurs de l'automate cellulaire. L'idée au départ reprenait le principe de l'autoreproduction de Von Neumann : mettre en œuvre une machine capable d'aller puiser dans un bac de composants simples les constituants élémentaires nécessaires à la reproduction d'une machine semblable. Le projet d'autoreproduction de Neumann était tout simplement irréalisable avec les moyens technologiques existants dans les années 50 car dans la pratique, la conception d'une telle machine nécessitait un processeur très puissant et des techniques de mouvement, d'articulation et de visualisation sophistiquées. Pour résoudre ce problème, Ulam lui suggère de travailler dans un espace mathématique simple où l'univers sera formé d'une grille bidimensionnelle, où chacune des cellules est dotée d'un nombre fini d'états possibles et obéit à des règles de fonctionnement dites locales. Un système rendu formel par une combinaison d'outils mathématiques et informatiques, dans lequel les théories mathématiques sont traduites par des algorithmes maniables avec les outils informatiques. Conway (1970) invente le célèbre *Jeu de la vie* et fait ainsi sortir les automates cellulaires des laboratoires pour les faire découvrir au grand public. La description détaillée du fonctionnement de ce dernier est présenté *in* fig. 6.1 (Gardner, 1971 ; Hatlan, 2011).

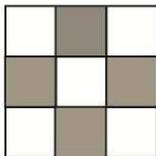
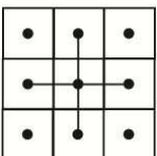
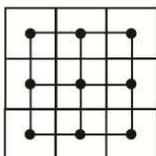
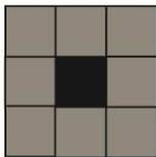
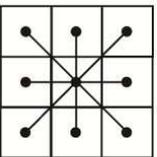
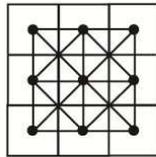
	Représentation classique	Graphe de voisinage	Graphe de relations
Voisinage de Von Neumann			
Voisinage de Moore			

Fig. 6.1. Représentation d'un automate cellulaire et graphes associés ; 1) Von : deux cellules sont voisines si elles partagent au moins une frontière commune ; 2) Moore : deux cellules sont voisines si elles partagent au moins un point commun (Badariotti *et al*, 2006).

Selon Rucker et Walker (1997), l'ensemble des automates cellulaires possède trois propriétés fondamentales de fonctionnement, à savoir :

1. Le *parallélisme* : il signifie que les mises à jour de cellules individuelles s'effectuent simultanément mais de façon indépendante ;

2. La *proximité* : appelée également *localité*, elle désigne la valeur future d'une cellule, qui dépend à la fois de son état actuel et de celui de ses voisins les plus proches ;

L'*homogénéité* : elle signifie que les règles de mises à jour sont communes pour l'ensemble des cellules de la grille.

Le physicien Wolfram (1984) fut parmi les premiers à constater que la cinématique d'un système dit complexe (ex. : le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant) peut être mis en avant par certaines applications des automates cellulaires. L'arrivée concrète des automates cellulaires en géographie date de 1979 suite à un article intitulé « *Cellular Geography* » dans lequel Tobler (1979) présente cinq modèles qui permettent de reproduire l'évolution de l'occupation du sol ; depuis, l'utilisation des automates cellulaires en géographie n'a cessé d'évoluer (Couclelis, 1985 et 1988 ; Phipps 1989 et 1992 ; Langlois et Delahaye, 2002 ; Ménard *et al.*, 2004 ; Gaillard *et al.*, 2006 ; Douvinet et Delahaye, 2010). En géographie urbaine, les avancements sont particulièrement de taille (Langlois, 1994 ; Phipps et Langlois, 1997 ; White *et al.*, 1997 ; Dubos-Paillard et Guermond, 2003 ; Antoni, 2006 ; Badariotti *et al.*, 2006 ; Lajoie et Hagen-Zanker., 2007a).

Cette large utilisation est encouragée par les nombreux avantages que présentent ces outils (Ménard *et al.*, 2004 ; Douvinet, 2008 ; Lajoie *et al.*, 2007b) :

1. Ils permettent un traitement explicite de plus en plus détaillé des systèmes spatiaux complexes (*i.e.*, l'augmentation de la capacité des processus des ordinateurs donne accès à de hauts niveaux de résolution analytique) et deviennent ainsi compatibles avec les autres outils spatiaux utilisés en géographie, notamment les outils SIG ;

2. Les résultats obtenus avec les automates sont aisément compréhensibles, les sorties de modèle facilement interprétables et les liens entre ces derniers et les processus étudiés facilement établis ;

3. Ils permettent d'économiser du temps et des moyens matériels et financiers car on peut tester différents scénarios sans passer par des expérimentations physiques lourdes ; il s'agit en quelque sorte de construire un « laboratoire virtuel » (Batty, 2001).

Néanmoins, la structure de base des automates cellulaires présentait de nombreuses limites vis-à-vis des processus étudiés en géographie et afin que l'outil « automate » soit adapté aux besoins de cette discipline. Un certain nombre de modifications ont donc été apportées aux modèles de base (Ménard *et al.*, 2004) :

1. En géographie, la grille de structure régulière dans un espace infini est souvent remplacée par un maillage irrégulier étendu dans un espace fini. Cette délimitation de l'espace provoque en pratique des problèmes techniques tel les traitements des effets de bordure en simulation ;

2. les limites entre deux cellules de traitement sont souvent formées par un nombre considérable de cellules (une centaine), l'état de chacune étant défini par rapport à la distance à la cellule traitée, ce qui assure le respect du principe de l'« auto-corrélation spatiale » ;

En géographie, afin que les processus simulés soient le plus possible représentatifs des systèmes naturels complexes, les chercheurs ont été amenés à contraindre les règles de transitions, autrefois soumises à des lois probabilistes, par des « sous-modèles externes » qui impo-

sent, selon le système en question, des règles supplémentaires de différents ordres (économique, social, politique, démographique).

Autant de modifications introduites dans les modèles des automates cellulaires de base afin que ces derniers puissent assumer plus au moins la complexité intrin- et extrinsèque des processus étudiés en géographie.

6.1.2. Présentation de l'automate *RuiCells*

L'automate *RuiCells*, ou RUICELL (Gaillard *et al.*, 2006), appartient à la famille des ACGs développé par Langlois (2002) sous langage Pascal. Conçu initialement pour simuler des ruissellements érosifs dans des bassins versants ruraux, l'automate *RuiCells* permet : « *de répondre à une veille cartographique en assimilant les changements de conditions de sensibilité au ruissellement ; la transposabilité à l'ensemble des bassins versants d'une méthode visant à définir les zones sensibles ; de quantifier des volumes et débits ruisselés ; de prendre en compte les dynamiques hydrologiques de l'espace (interaction, diffusion)* ».

6.1.2.1. Structure et fonctionnement de l'automate *RuiCells*

Pour décrire la structure et le mode de fonctionnement de l'automate *RuiCells*, on commence tout d'abord par décrire les différentes données (*input*) qui peuvent d'être implémentées sous *RuiCells* ; on explique ensuite comment ces *inputs* sont traitées et mises en interaction entre elles ; enfin, on présente les différentes sorties possibles du système (*output*) ou, autrement dit, les résultats de l'ensemble des simulations qui peuvent être effectuées sous *RuiCells*.

6.1.2.1.1. Données d'entrée

Pour effectuer une simulation sous *RuiCells*, tout d'abord le terrain doit être représenté sous une forme topologique (cellules topo-ponctuelles, topo-surfaciques et topo-linéaires ; Langlois, 2002), on introduit habituellement un « modèle numérique de terrain » (MNT) ; des vues aériennes et des fonds topographiques peuvent également être utilisés. Selon la finalité du travail, d'autres données d'entrée viennent compléter la donnée topologique initialement implémentée. Il peut s'agir de cartes d'occupation du sol introduites sous format “.gen“, qui peuvent contenir des informations sur la nature des parcelles existantes sur le terrain, les coefficients d'infiltration du sol, leur taux de refus d'infiltration, etc. Les épisodes pluvieux, représentés sous la forme de hyétogrammes, sont introduits sous forme de tableaux au format “.txt“ ; ici, le cumul total est divisé, par pas de temps fixes, en plusieurs cumuls de pluie plus fins (généralement en mm).

6.1.2.1.2. Principes et mode de fonctionnement

Après avoir implémenté le MNT, plusieurs traitements ont lieu et selon leur occurrence temporelle, ces traitements peuvent être de type :

A. **Maillage** : il s'agit d'un maillage topologique de forme triangulaire régulière, construit d'une manière automatique à partir des données topologiques implémentées. Un maillage triangulaire est préféré ici à un maillage carré (classiquement reproduit à partir d'un MNT),

du fait qu'il répond mieux aux objectifs de notre thématique (comportement hydrologique). Les formes triangulaires permettent non seulement de reproduire plus fidèlement les flux et les ruissellements de surface mais elles présentent aussi l'avantage d'être moins « gourmandes » en temps de calcul. Ce dernier représente un point crucial dans le choix du type de maillage, en particulier quand on manipule de grosses bases de données. Chaque carré est alors divisé selon l'une de ses diagonales en deux triangles. La diagonale qui favorise la direction des écoulements vers l'aval est systématiquement choisie (Langlois, 2007 ; Douvinet, 2008). Chacun des trois arcs constitutifs du triangle est connecté aux triangles avoisinants *via* les deux pôles de ses extrémités et mis en commun avec un autre triangle adjacent (fig. 6.2).

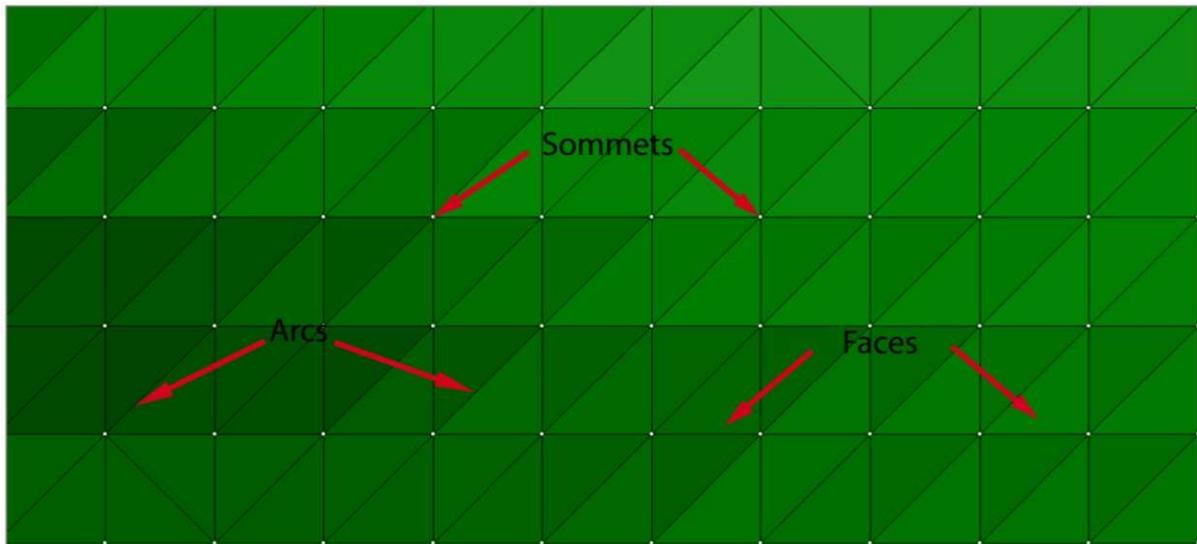


Fig. 6.2. Configuration du maillage triangulaire effectué sous *RuiCells* à partir d'un MNT.

B. **Simulation** : l'automate *RuiCells* fonctionne selon un mouvement itératif discret et synchronique. En fonction de la finalité du travail, deux types de simulation sont possibles sous *RuiCells*. La première s'effectue dans un environnement bidimensionnel (2D) dans lequel les pentes ne sont pas prises en compte dans la circulation des surfaces ; ce genre de simulation est utilisé principalement pour analyser la forme du bassin-versant, faire apparaître la structure interne de son réseau d'écoulement et évaluer son efficacité structurelle. La seconde simulation possible sous *RuiCells* s'effectue dans un espace en trois dimensions (3D), dans lequel le paramètre pente est considéré (« règles de transition avec contrainte » ; Douvinet *et al.*, 2009) et où il est également possible d'implémenter d'autres paramètres de l'hydrosystème (hyétogrammes, coefficients de ruissellement, taux de refus d'infiltration, cartes d'occupation du sol). A ce niveau de la simulation, l'efficacité morphologique du bassin-versant peut être évaluée.

Une simulation numérique dans cet environnement s'effectue principalement en trois étapes :

Etape 1 (t_0) : l'ensemble des cellules sont initialisées avec leur propre surface, du fait qu'aucune transition (de surface ou d'écoulement) n'ait eu lieu entre les cellules à t_0 , elles seront toutes dotées de la même valeur,

Etape 2 (t_1) : les mailles se mettent en communication synchronique, une cellule n « se vide » dans les cellules en aval et reçoit dans le même temps les apports de celles qui se trouvent en amont. A noter ici que les cellules qui se trouvent tout en amont de la grille (pas de voisin amont), vont se trouver « à sec » en t_1 et le resteront ainsi jusqu'à la fin de la simulation. Le triangle d'une cellule donnée est connecté par l'aval et par ses côtés (triangles adjacents) et ses sommets à plusieurs triangles, la répartition des écoulements dans les triangles de voisinage étant gérée par des « règles de transition », fixées de manière à assurer que les apports soient répartis proportionnellement « aux angles des plus grandes pentes » (fig. 6.3).

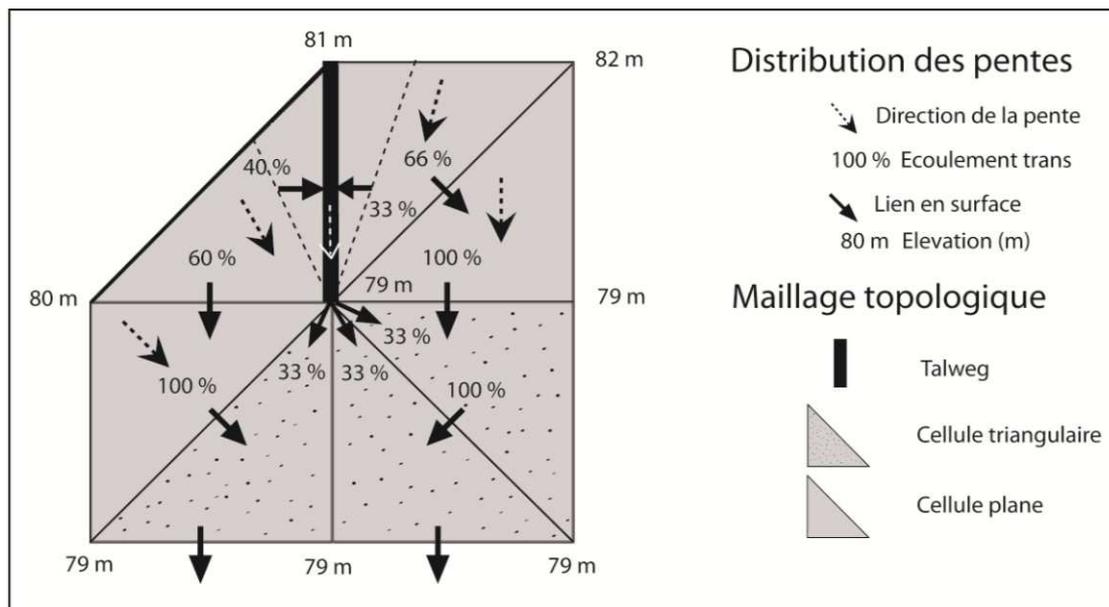


Fig. 6.3. Coefficient de transition pour la répartition des écoulements vers l'aval (Douvinet, 2008).

Etape 3 (t_2) : en fonction de son état initial et de ce qu'elle a reçue des cellules en amont, un nouvel état est attribué à chaque cellule de la grille. La simulation continue ainsi jusqu'à ce que toutes les eaux reçues par le bassin-versant rejoignent l'exutoire, autrement dit jusqu'à ce que ce dernier se vide de ses eaux ou de ses surfaces (quand on simule des cumuls d'eau surfaciques).

6.1.2.1.3. Sorties du système (outputs)

Grâce à sa structure et à son principe de fonctionnement, l'automate cellulaire *RuiCells* met les cellules en relation à la fois sur le plan topologique et hydrologique, donnant ainsi accès à une riche palette de produits de sorties possibles. Langlois (2002) les résume ainsi :

- Cartes hydro-topographiques : courbes de niveau, pentes, expositions, altitudes, talwegs, crêtes, cuvettes, cols, zones inondées ; Graphes de ruissellement, lignes d'écoulement ; Délimitation et calcul des surfaces de bassin ;
- Cartes des niveaux d'emboîtement des bassins ;
- Cartes de simulation du ruissellement (fixe, dynamique, 3D) ;
- Hydrogrammes aux points de mesure (tables exportables).

Après avoir présenté le principe de fonctionnement de l'automate *RuiCells* ainsi que la grande richesse de ses *outputs* possibles, cet outil sera utilisé pour analyser les différentes sous-unités hydrographiques du Massif de Bouzaréah. L'analyse sera menée dans le but de compléter et pousser plus loin les analyses physiques et hydrologiques entreprises auparavant (cf. chapitre 4). Ces dernières présentaient l'inconvénient d'être menées avec des méthodes sectorielles. *RuiCells* vient donc combler ce point lacunaire à travers la mise en interaction des différents paramètres de l'hydrosystème.

6.2. Analyse de l'efficacité morphologique et de l'évolution spatio-temporelle de la réponse hydrologique dans le Massif de Bouzaréah

Sous l'automate *RuiCells*, en passant d'une simulation dans un espace 2D à un espace 3D, les composantes de l'hydrosystème sont progressivement implémentées, ce qui nous permet à la fin de la simulation de faire ressortir la structuration interne du réseau hydrographique latent (absent en période normale), de cartographier les isodistances et l'évolution spatio-temporelle des écoulements (surfaces, débits) en tout point de l'espace ainsi que l'édition des surfaçogrammes, des distançogrammes et des morphogrammes correspondants. A travers ces *outputs*, de nombreuses informations peuvent être déduites dont les principales sont (Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al.*, 2008 ; Menad *et al.*, 2011) :

- Identification de la nature des mécanismes qui gèrent les interactions entre les composantes morphologiques (forme des unités hydrodologiques, structure spatiale du réseau hydrographique, systèmes des pentes) ainsi que leur inscription spatiale et temporelle dans le bassin-versant ;
- Quantification de l'effet exercé par chacune des composantes morphologiques sur la réponse hydrologique théorique, à travers des indices morphosynthétiques ;
- Analyse de la réponse hydrologique, en étudiant son évolution en tout point de l'espace, ce qui fait ressortir certains comportements locaux (anomalies) masqués à l'échelle globale.

Le Massif de Bouzaréah est formé de trois unités hydrographiques principales à savoir : l'Oued Koriche, Beni Messous et les bassins versants côtiers. D'un point de vue hydrologique, ces bassins présentent des unités fonctionnelles indépendantes et autonomes : de fait, ils seront traités sous *RuiCells* de façon totalement séparée.

6.2.1. Limites d'utilisation

La principale limite que présente l'utilisation de l'automate *Ruicells* consiste dans sa sensibilité à la nature du MNT implémenté (méthode d'interpolation, niveau de résolution). Ainsi, pour que les valeurs des paramètres morphosynthétiques (*i.e.*, paramètres utilisés dans la comparaison entre les bassins versants de tailles différentes) aient du sens, on doit utiliser tout au long du travail exactement le même MNT (méthode d'interpolation, résolution). Cette sensibilité limite plus au moins l'universalité du logiciel et la comparaison entre des bassins versants analysés avec des MNT différents peut être discutable. En réalité, cet inconvénient n'est pas propre à l'automate *RuiCells* puisqu'il est également observé lors de l'utilisation d'autres outils SIG. Par exemple, la délimitation des bassins versants, la ramification et la

structure de leur réseau hydrographique, la classification du système de pente ainsi que de nombreux autres paramètres « travaillés » avec des logiciels de SIG ont également tendance à être sensibles à la nature du MNT à partir duquel ils sont calculés.

En utilisant des MNT IGN à pas de 50 m, des paramètres morphosynthétiques et des seuils d'efficacité (faible, moyen et fort) ont pu être développés dans des travaux antérieurs (Douvinet, 2008). Malheureusement, les MNT IGN à pas de 50 m ne sont pas disponibles pour le Massif de Bouzaréah. Ainsi, toute comparaison éventuelle entre les bassins versants analysés dans notre étude et ceux étudiés dans le passé reste délicate et les conclusions sujettes aux critiques.

Afin d'illustrer la sensibilité de l'automate *RuiCells* et argumenter les critiques émises ci-dessus, on a effectué plusieurs tests de simulation sur des MNT de niveaux de résolution allant de 10 à 100 m. Cette démarche a été menée également dans le but d'observer comment les principaux paramètres de l'hydrosystème évoluent en fonction de l'évolution du niveau de résolution du MNT. Pour parvenir aux buts cités ci-dessus, on a reconstruit dans un premier temps la topographie du bassin-versant de l'Oued Koriche avec des MNT de 10 à 100 m de résolution. On a effectué des simulations sur l'ensemble de ces derniers puis on a étudié l'évolution de deux paramètres morphosynthétiques de base (cf. *infra*), à savoir le « débit moyen de surface » (Q_{moy}) et le « débit maximum de surface » appelé également « pic de réponse » (Q_{max}).

Une évolution croissante du Q_{moy} se reproduit fidèlement (coefficient de corrélation près de 1) en passant d'un niveau de résolution plus bas à un autre plus haut (fig. 6.4). Cette évolution peut être présentée avec l'équation de croissance suivante :

$$y = 1,0576 x - 0,0233 \quad (\text{Equation 7})$$

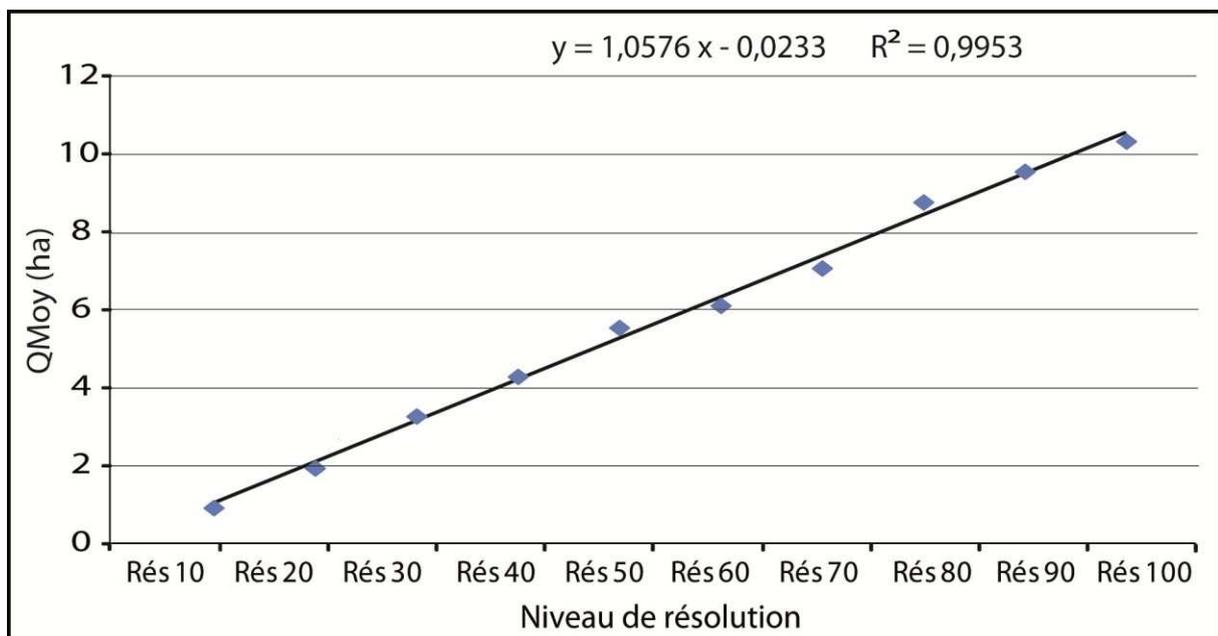


Fig. 6.4. Evolution du débit moyen de surface (Q_{moy}) dans l'Oued Koriche en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous *RuiCells*.

Concernant le Q_{max} , on relève également une évolution croissante concordante avec le niveau de résolution. Néanmoins, en comparaison avec celle du Q_{moy} , l'évolution du Q_{max} est moins linéaire (coefficient de corrélation égal à 0,83). Les niveaux de résolution 10, 50, 60 et 100 ressortent donc clairement de la tendance générale de l'évolution (fig. 6.5). Cette tendance peut être représentée avec l'équation suivante :

$$y = 4,566 x + 5,7767 \quad (\text{Equation 8})$$

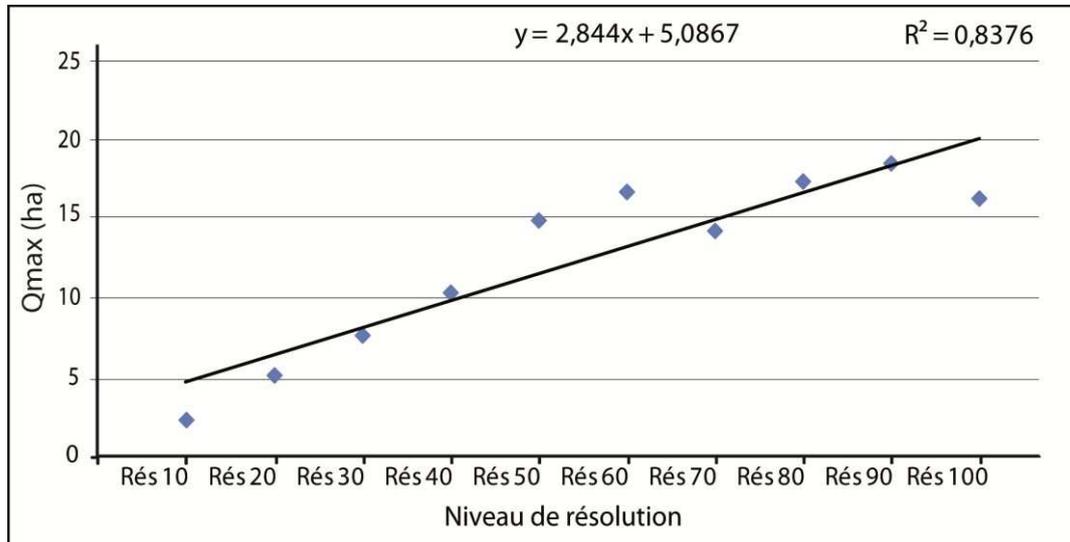


Fig. 6.5. Evolution du débit maximum de surface (Q_{max}) dans l'Oued Koriche en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous *RuiCells*.

Dans un second temps, on a procédé selon la même démarche dans le bassin-versant de Beni Messous (fig. 6.6 et fig. 6.7). Le but ici est de voir si cette évolution change de tendance en fonction des caractéristiques intrinsèques du bassin-versant. Comme on l'a vu dans le chapitre 4, les bassins versants de l'Oued Koriche et de Beni Messous présentent des caractéristiques physiques et fonctionnelles différentes : pour le premier il s'agit d'un petit bassin accidenté drainant un réseau hydrographique sub-dendritique alors que le second, beaucoup plus grand, présente une forme allongé et draine un réseau hydrographique dendritique.

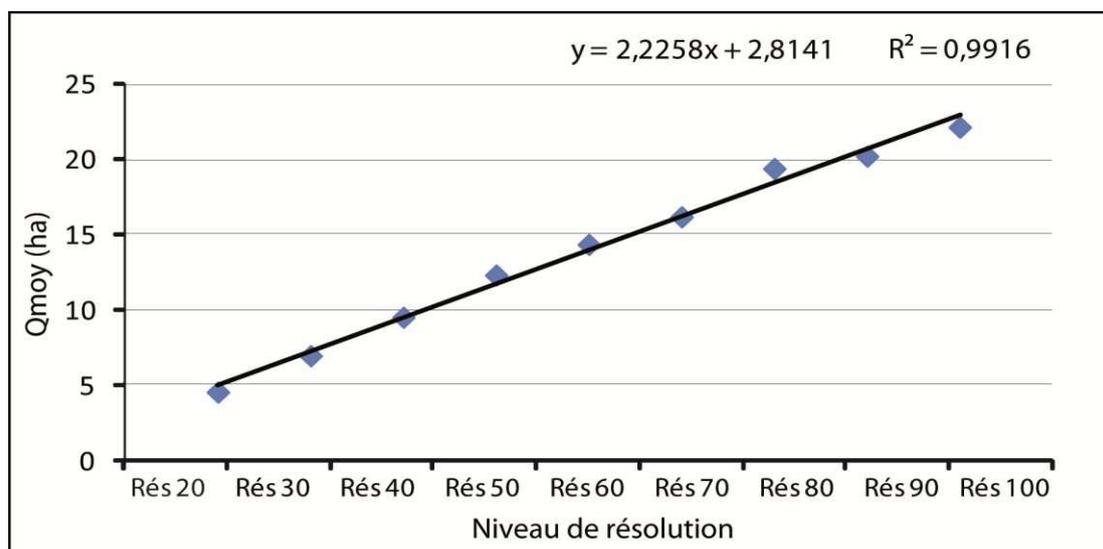


Fig. 6.6. Evolution du débit moyen de surface (Q_{moy}) à Beni Messous en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous *RuiCells*.

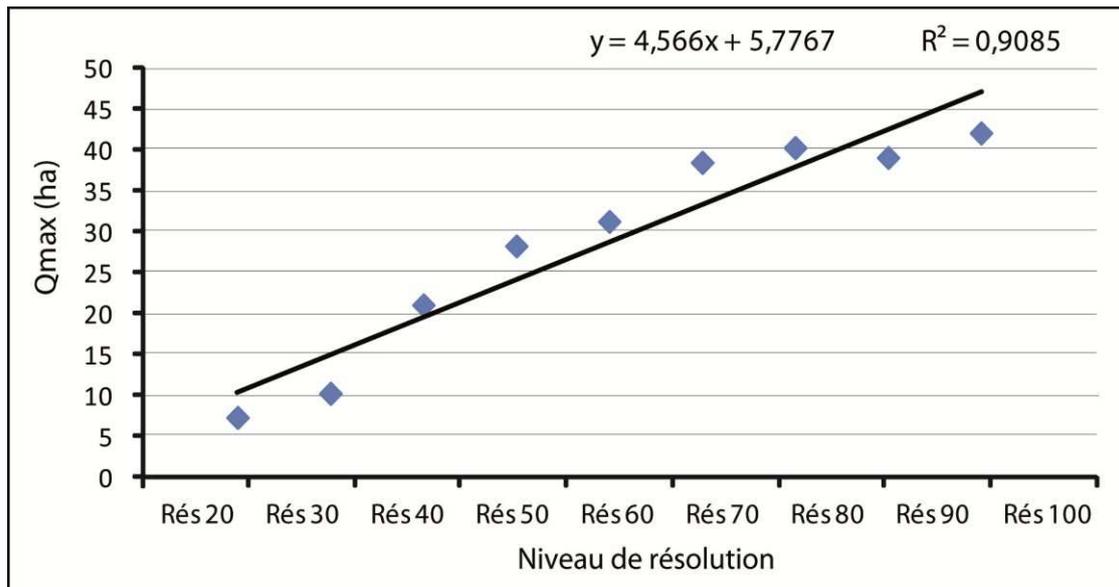


Fig. 6.7. Evolution du débit maximum de surface (Qmax) à Beni Messous en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous *RuiCells*.

La tendance de croissance concernant le Q_{moy} et le Q_{max} relevée au niveau de Beni Messous est très semblable à celle de l'Oued Koriche. Ce constat laisse penser que l'évolution de la réponse en fonction du niveau de la résolution du MNT suit une trajectoire prévisible. Ce résultat préliminaire est très encourageant et mérite d'être poursuivi avec l'ambition de mettre en évidence des fonctions d'évolution universelle qui permettent une comparaison entre les différents bassins versants traités sous *RuiCells*. Un autre point intéressant à observer est celui de l'évolution de la cartographie des résultats en fonction du niveau de résolution. In fig. 6.8, on présente les différentes cartographies de la réponse surfacique obtenues avec des MNT à pas de 20, 50 et 90 m.

Il s'agit ici d'un document qualitatif dont le principal but est de configurer spatialement la réponse surfacique. En comparant la carte produite avec un MNT de 20 m de résolution et celle produite avec un MNT de 100 m de résolution, on remarque que la réponse est plus détaillée sur la première carte. Néanmoins, la configuration générale reste assez similaire et la plupart des zones de concentration hydrologique ressortent clairement. Si on compare les deux cartes produites avec des MNT de résolution proches, les différences sont alors négligeables et l'information qualitative est transmise fidèlement. En attendant, il est nécessaire de travailler au sein d'un même projet avec des MNT de niveaux de résolution et des méthodes d'acquisition (mode d'interpolation) uniques. Les bases de données mondiales gratuites et les SRTM de 30 m de résolution présentent un bon compromis, en particulier dans le cadre de projets d'étude de grande extension spatiale.

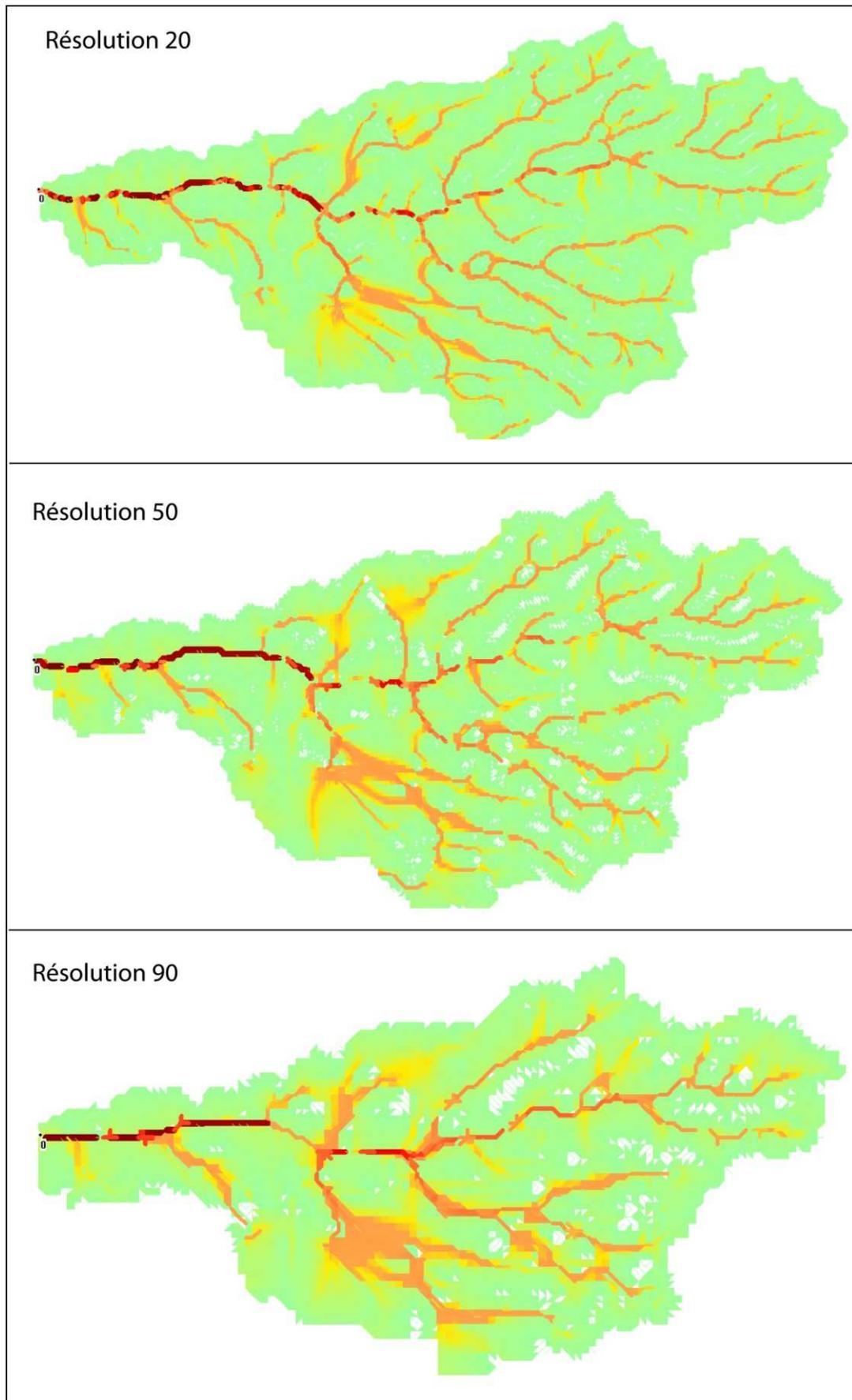


Fig. 6.8. L'évolution de la cartographie de la réponse surfacique en fonction du niveau de résolution du MNT.

Pour le reste de notre analyse, on a fait le choix d'utiliser des MNT de 50 m de résolution interpolés à partir de courbes de niveaux qui elles mêmes sont digitalisées *via* un fond de carte topographique au 1/25 000. Le choix de cette résolution s'explique par le fait que dans les travaux antérieurs (Douvinet, 2008 : travail de référence concernant les travaux appliqués sous *RuiCells*), ce sont des MNT à pas de 50 m qui ont été utilisés. De cette manière, nous pensons que les résultats de nos simulations et les paramètres qui en dérivent se rapprocheront au mieux de ceux établis dans les travaux antérieurs. On a fait ce choix en ayant conscience que les MNT utilisés dans le cadre de notre étude et ceux utilisés dans les études antérieures (MNT IGN) ont été obtenus avec des méthodes d'acquisition des données topographiques et des méthodes d'interpolation distinctes, une différence qui se ressentira au niveau des résultats obtenus.

6.2.2. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

On se servant de l'automate *RuiCells*, on a pu à la fois caractériser certains paramètres physiques du bassin-versant de l'Oued Koriche, l'emboîtement de ses sous-unités hydrographique et l'évolution spatio-temporelle de sa réponse hydrologique (théorique, envers un événement météorologique), pour enfin évaluer son efficacité morphologique.

6.2.2.1. Produits dérivés du MNT

Sous *RuiCells*, plusieurs informations peuvent être déduites directement du MNT, dont les principales sont :

1. *Les courbes de niveau* : elles peuvent être extraites à des intervalles d'espace différents (fig. 6.9). En tout point de l'espace, l'altitude est renseignée : il suffit donc de pointer le curseur sur l'endroit voulu pour que son altitude apparaisse.

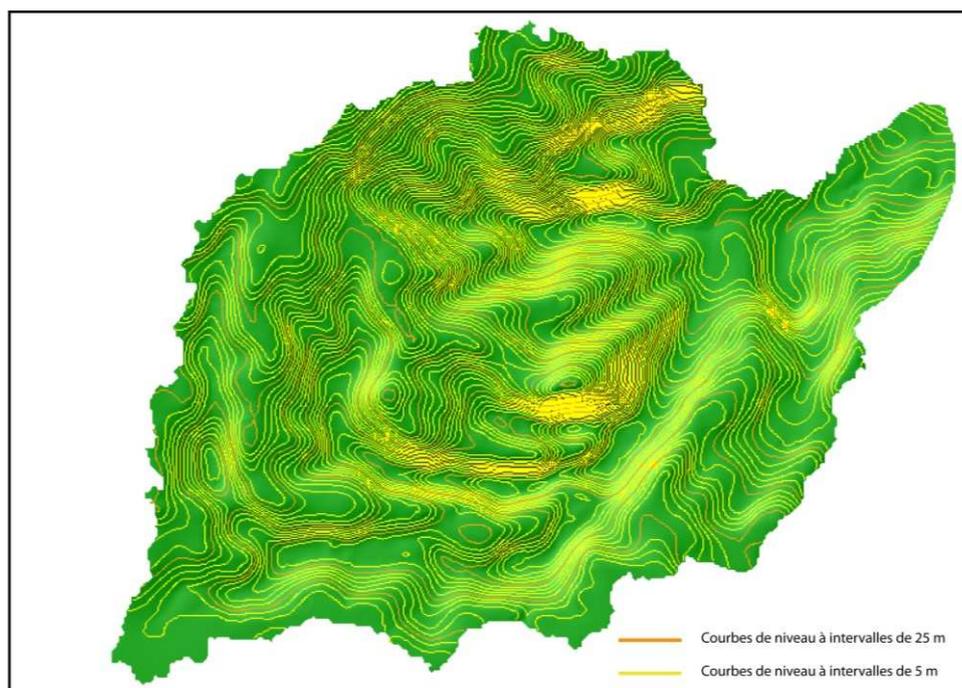


Fig. 6.9. Courbes de niveau extraites d'un MNT *via RuiCells*.

2. *Le réseau hydrographique* : grâce au maillage triangulaire adapté et les règles de transition qui gèrent les liens entre les cellules avoisinantes, la structuration interne du réseau hydrographique latent ressort aisément. Un maillage triangulaire présente l'avantage de pouvoir reproduire les différents types d'écoulement qui peuvent avoir lieu dans le bassin-versant, à savoir les écoulements surfaciques, linéaires et ponctuels (cuvettes ; fig. 6.10).

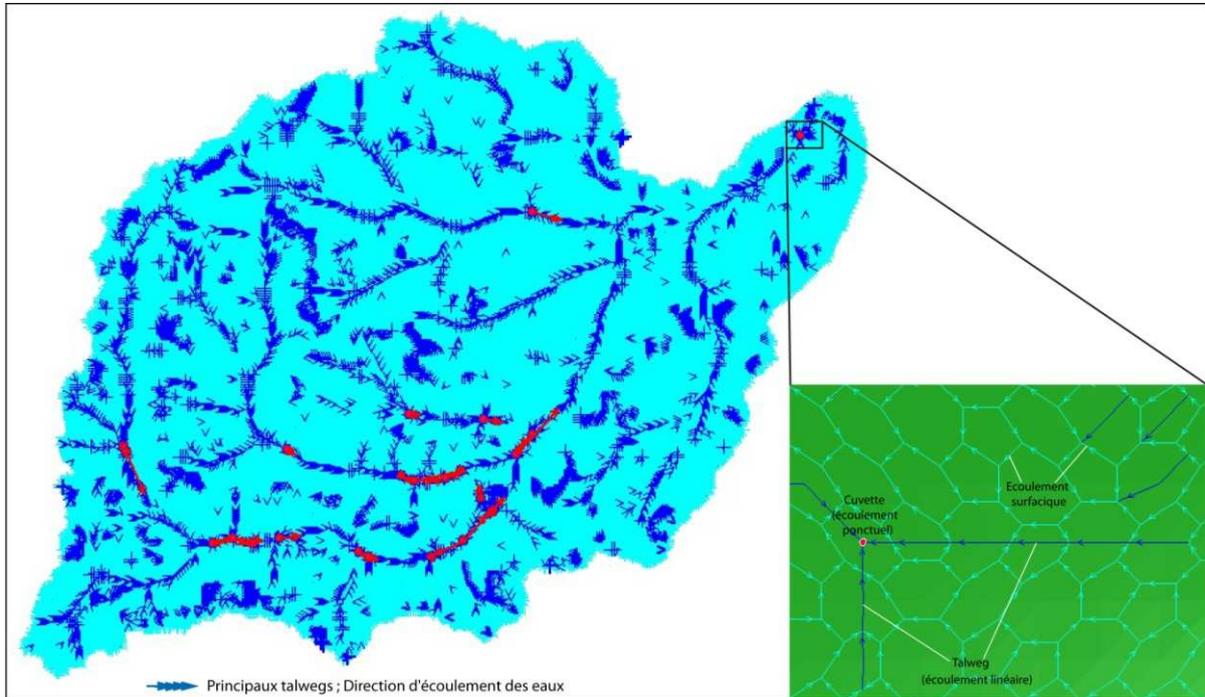


Fig. 6.10. Graphe de ruissellement dans l'Oued Koriche obtenu sous *RuiCells*.

3. *Une délimitation du bassin-versant topographique* : le découpage de ces sous-unités constitutives et le calcul de leur surface (fig. 6.11 et fig. 6.12) sont également possibles sous *RuiCells*.



Fig. 6.11. Délimitation du bassin-versant de l'Oued Koriche et le calcul de sa surface.

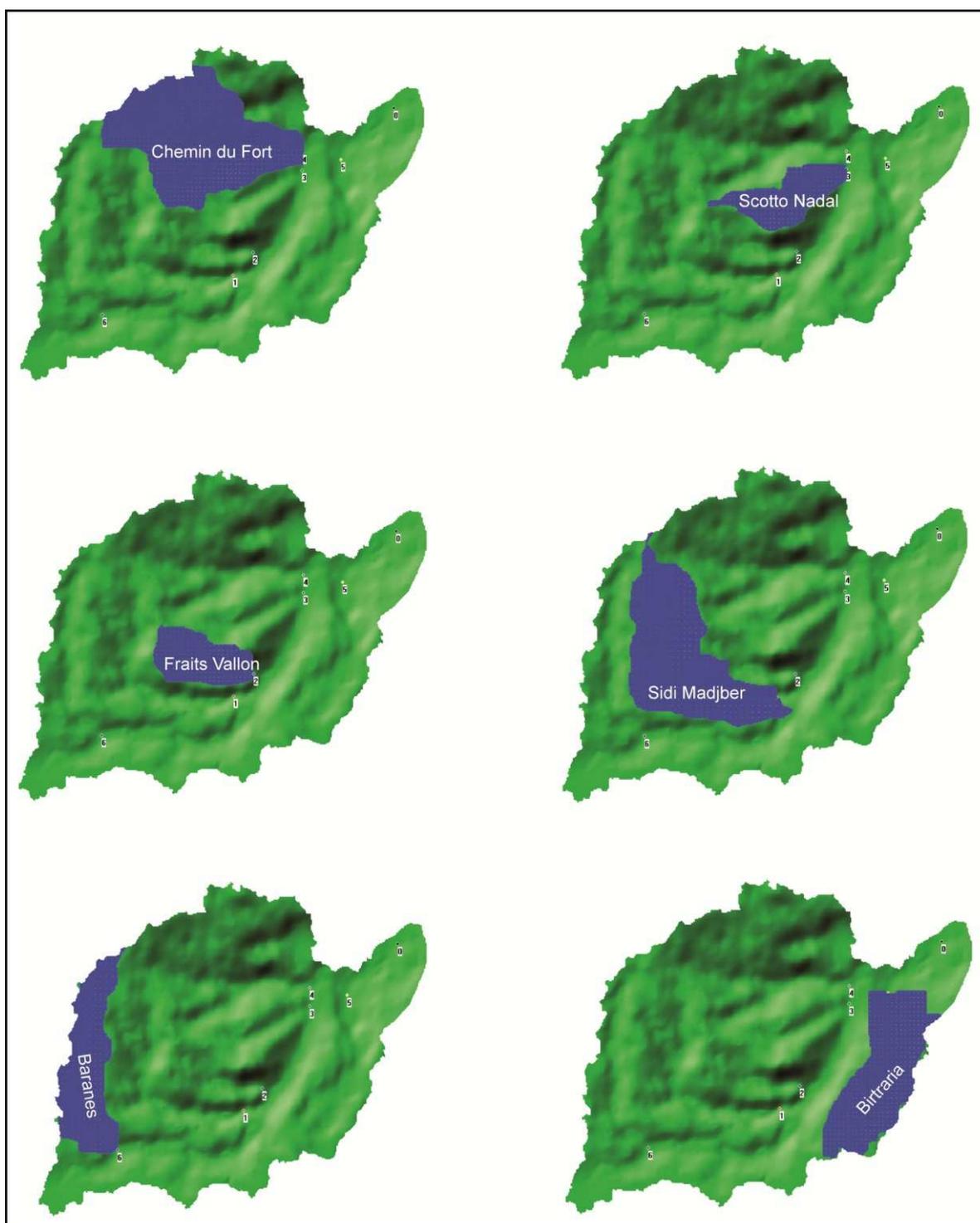


Fig. 6.12. Délimitation des sous-bassins versants de l'Oued Koriche.

6.2.2.2. Simulations numériques

Les simulations effectuées à ce niveau auront pour but principal d'analyser des mécanismes impliqués dans la genèse et le développement spatio-temporel de la réponse hydrologique pour chacun des facteurs : forme, structure spatiale et efficacité fonctionnelle du réseau hydrographique. Les effets du système de pente seront également analysés puis mis progressivement en interaction entre eux, tout en passant d'une simulation 2D à une simulation 3D.

Une fois l'efficacité du système morphologique est évaluée, on complète l'étude par une simulation du comportement hydrologique réel du bassin-versant lors d'un événement météorologique antérieur (événement des 9-10 novembre 2001).

6.2.2.2.1. Evolution spatio-temporelle de la réponse surfacique globale

Grâce à une simulation dans un espace 2D, la cartographie de la réponse théorique des écoulements surfaciques du bassin-versant ainsi que l'édition des surfaçogrammes et distançogrammes correspondants sont possibles. Ces sorties du système nous permettent de matérialiser l'évolution spatio-temporelle de la réponse surfacique théorique en tout point du bassin-versant (fig. 6.13). L'effet du relief est ignoré et par la suite la vitesse des écoulements n'est pas prise en compte car on analyse à ce niveau uniquement l'incidence de la forme sur l'auto-organisation des processus générateurs de la réponse hydrologique.

Carte d'écoulement de surface et surfaçogramme : pour faire apparaître la configuration de la réponse hydrologique interne (« signature surfacique » ; Douvinet, 2008) d'un bassin-versant sous *RuiCells*, on lance une simulation dans un espace 2D, dans laquelle on fait transiter des surfaces. La carte finale présentera le cumul des surfaces passées en chacune des cellules de la grille. La représentation graphique de ces cumuls (« surfaçogramme ») est également possible à la fin de cette simulation (fig. 6.13).

Le cumul des surfaces est présenté avec une palette de couleurs allant du vert clair au rouge foncé voire au grenat ; elles présentent respectivement les moindres et les plus grands cumuls de surfaces relevés. Les couleurs les plus foncées sont observées le long du talweg principal, avec un degré progressant de l'amont vers l'aval. Le plus grand cumul de surface enregistré (Q_{max}) est équivalent à 15 ha : il a eu lieu à l'itération n°68 (DQ_{max}). Le Q_{max} peut être défini comme le plus grand cumul de surfaces équidistantes du point de mesure 0 (ou l'exutoire). Le temps de la réponse totale ($D_v = 150$ itérations) est de 2,2 fois plus grand que DQ_{max} , ce qui laisse penser que la bande des cellules équidistantes à l'origine du pic de la réponse se trouve plutôt dans la partie aval du bassin-versant de l'Oued Koriche. La localisation spatiale exacte des cellules équidistantes dans le bassin-versant est possible *via* une cartographie des isodistances (cf. *infra*). On constate également que le surfaçogramme est marqué par deux réponse remarquables ($P1 = 15$ ha et $P2 = 11,7$ ha) qui se succèdent dans un laps de temps très court (10 itérations), ce qui veut dire qu'il existe deux importantes bandes de cellules équidistantes, peu éloignées dans le temps et probablement proches spatialement puisque elles atteignent successivement l'exutoire. D'un point de vue hydrologique, on déduit donc que le bassin-versant de l'Oued Koriche favorise la génération de deux importants pics (deux vagues) hydrologiques temporellement rapprochés. Ce dernier constat présente une grande importance et il doit être pris en compte dans toute démarche préventive du risque hydrologique dans le bassin.

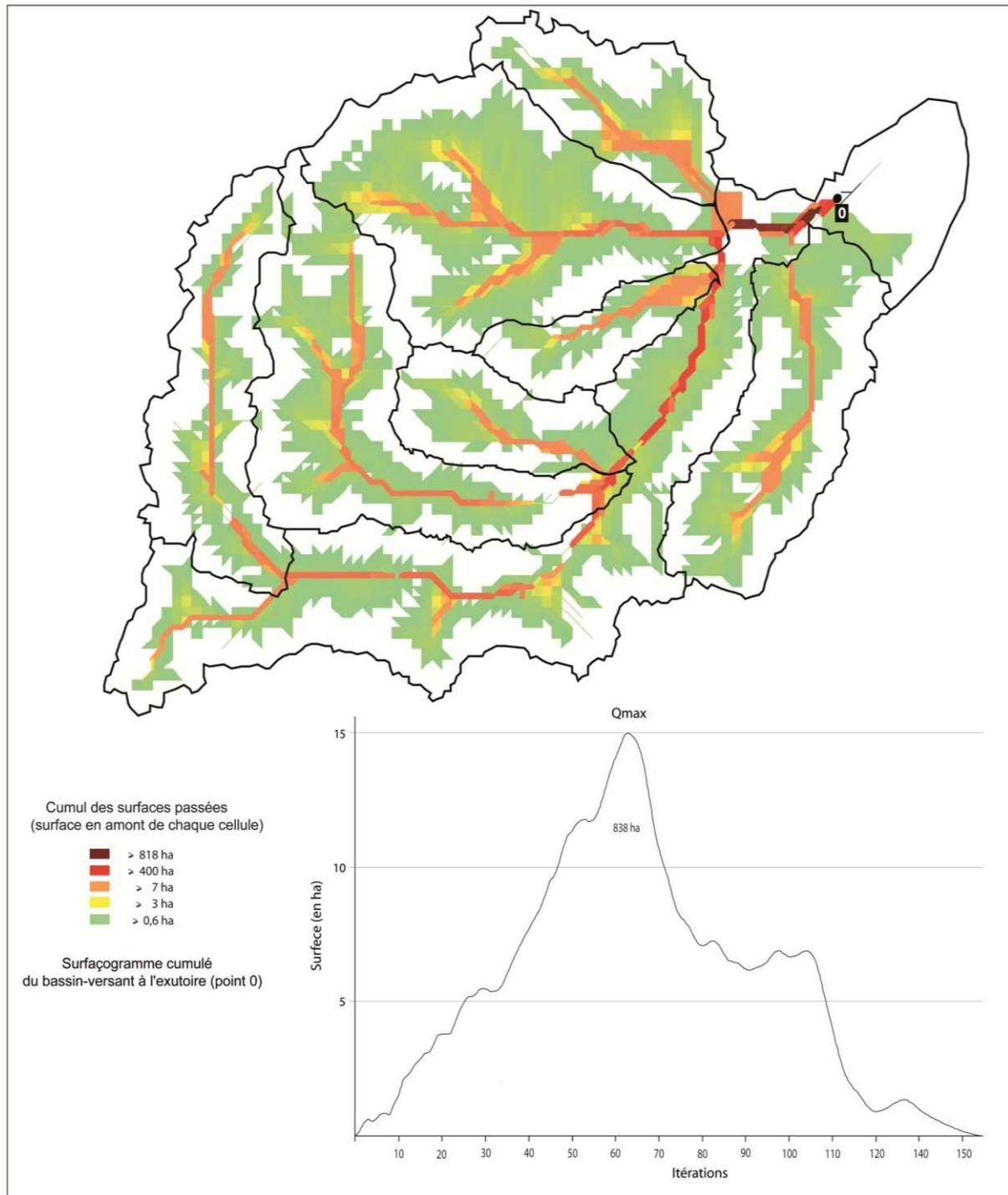


Fig. 6.13. Cartographie de la réponse théorique de surface globale en utilisant l'automate cellulaire *RuiCells*.

En se servant d'un surfaçogramme, plusieurs « indices physiographiques » appelés également « indices morphosynthétiques » (Douvinet, 2008) peuvent être établis. Le plus grand avantage que présentent ces indices est qu'ils permettent de comparer des fonctionnalités, ce qui permet de s'affranchir de la barrière de la taille souvent rencontrée dans une démarche comparative entre des bassins versants de tailles distinctes.

Nous rappelons ci-dessous le calcul du débit moyen de surface (Q_{moy}) :

$$Q_{moy} = S / Dv \quad (\text{Equation 9})$$

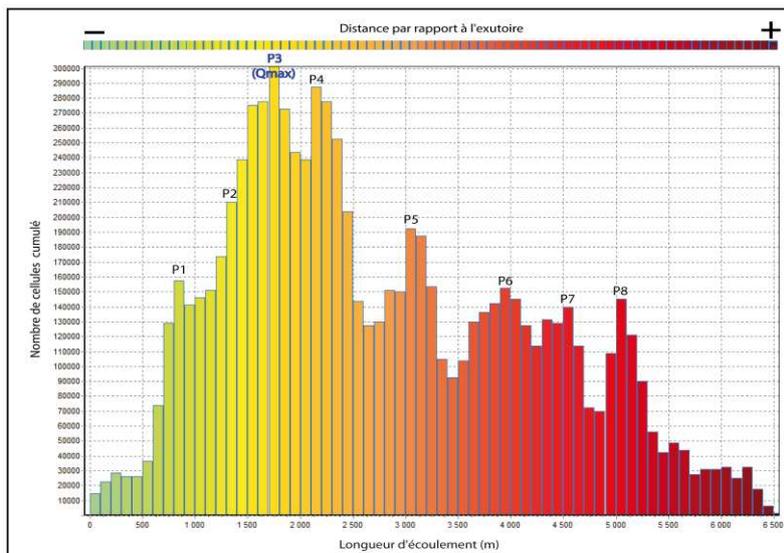
où S est la surface du bassin-versant et Dv la distance nécessaire pour que les apports de la cellule la plus éloignée atteignent l'exutoire. Dans le cas de l'Oued Koriche, $Q_{moy} = 5,56$ ha/itération. DQ_{max} est la distance nécessaire pour atteindre le Q_{max} ; elle est égale à 68 itérations dans l'Oued Koriche. Im est l'intensité de la montée, ou le temps d'atteinte du pic de la réponse :

$$Im = Q_{max} / DQ_{max} \quad (\text{Equation 10})$$

Dans le cas de l'Oued Koriche, $Im = 13,27$ ha/min.

Cartographie des *isodistances* (*distançogramme*) : grâce au calcul des isodistances établies sous *RuiCells* (fig. 6.14), il est tout à fait possible de localiser spatialement la bande de cellules équidistantes de l'exutoire, génératrices du pic de la réponse hydrologique (pic de cumul de surface, pic de crue). Le *distançogramme* correspondant est formé en cumulant à chaque itération le nombre de cellules équidistantes de l'exutoire. Un *distançogramme* est également un bon moyen pour connaître la distance qui sépare tout point du bassin-versant et son exutoire. Ces distances sont calculées en cherchant le plus court chemin qui relie chacun des ces points avec l'exutoire du bassin. A ne pas confondre le *surfaçogramme*, qui est un cumul de surface de cellules équidistantes, avec le *distançogramme* qui est lui un cumul du nombre de cellules équidistantes.

A - Graphe distançogramme



B - Cartographie des cellules qui se trouvent à équidistance de l'exutoire

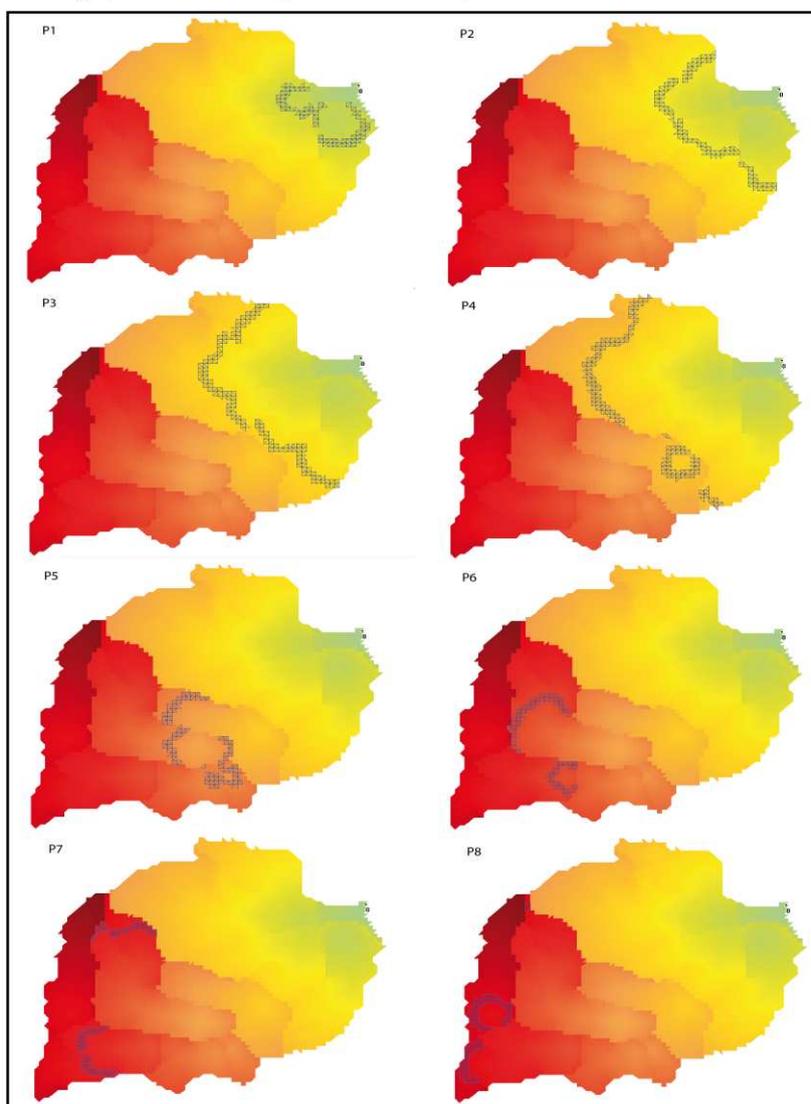


Fig. 6.14. Distançogramme (A) et cartographie des cellules à équidistance de l'exutoire (B). Cartographie des cellules qui se trouvent à équidistance de l'exutoire.

Le distançogramme (fig. 6.14) montre que les cellules équidistantes productrices du pic de la réponse hydrologique se localisent dans la partie aval du bassin-versant, confirmant ainsi le constat précédent déduit à partir du surfaçogramme. Grâce à la cartographie des cellules équidistantes de l'exutoire en tout point de l'espace, on peut identifier les sous-bassins versants les plus impliqués dans la production du pic de la réponse hydrologique. Le plus grand nombre de cellules équidistantes productrices du pic de la réponse (P1) se localise principalement au niveau de la partie moyenne du sous-bassin-versant du Chemin du Fort et à l'amont des sous-bassins-versants de Scotto Nadal et de Bir Traria. Une infime partie de ces cellules coïncide avec le talweg principal de l'oued Koriche qui achemine les apports de l'amont (fig. 6.14). Le P2, présente également une réaction remarquable à prendre en compte en raison de sa grandeur, mais également par la proximité spatiale de ces cellules équidistante avec celles productrices du pic de la réponse (P1), ce qui implique donc une proximité temporelle de la réponse des deux pics P1 et P2. Les cellules génératrices de la réponse P2 se localisent principalement dans la partie amont des deux sous-bassins versants du Chemin du Fort et Birtraria, ainsi qu'au niveau de la confluence des deux sous-bassins de Sidi Madjber et Frais Vallons, incluant le talweg principal du bassin. Le sous-bassin-versant du Chemin du Fort participe à la fois à P1 et à P2, dans l'un par la réactivité de sa partie aval et dans l'autre par la réactivité de sa partie amont. La configuration spatiale des cellules équidistantes est vraisemblablement due à une configuration de type « chou-fleur » qui renseigne souvent sur « *la présence d'un réseau structuré efficace par rapport à la forme du bassin dans lequel il s'insère* » (Hauchard, 2001 ; Douvinet, 2008).

Pour mieux comprendre l'évolution de la réponse théorique des écoulements de surface dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, et pouvoir décrypter et matérialiser l'emboîtement de ces sous-unités fonctionnelles, cinq points de mesures supplémentaires ont été placés aux exutoires des principaux sous-bassins versants constitutifs de l'Oued Koriche. Une cartographie de la réponse surfacique ainsi que le surfaçogramme correspondant ont été établis pour chacun des points de calculs ajoutés précédemment (fig. 6.15).

Les graphes d'écoulement montrent que le pic de la réponse surfacique est provoqué par l'arrivée concomitante des réponses des sous-bassins versants de l'aval en particulier Chemin du Fort et Scotto Nadal, et par l'arrivée des premiers apports du sous-bassin-versant de Sidi Medjber, dont l'exutoire se situe au niveau de la partie moyenne de l'Oued Koriche. Dans ce dernier, les écoulements sont donc rapidement alimentés par les sous-bassins situés en aval, auxquels s'associent les apports de la partie amont arrivant *de facto* plus tardivement à l'exutoire. Les sous-bassins sont rectilignes et leur contribution est désorganisée et plus chaotique que dans la partie aval. Dans l'Oued Koriche, la partie aval est donc très réactive tandis que l'amont sert simplement de « corps d'accompagnement » des écoulements (Menad *et al.*, 2012).

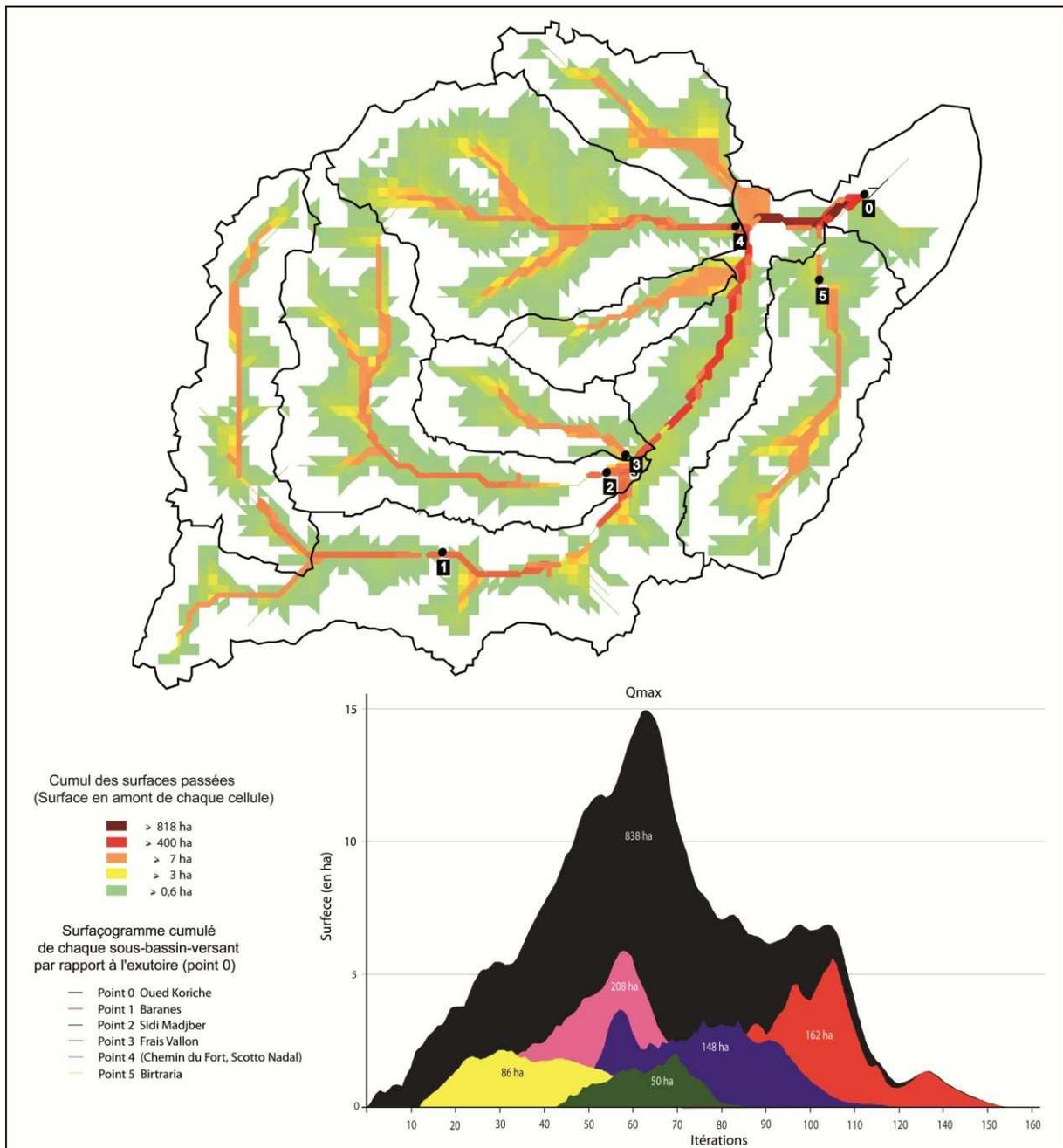


Fig. 6.15. Cartographie de la réponse surfacique des différentes sous-unités hydrographiques de l'Oued Koriche en utilisant l'automate RuiCells.

6.2.2.2.2. Efficacité structurelle du réseau hydrographique

Partant du constat que l'analyse de la réponse hydrologique globale (observé à l'exutoire du bassin-versant) générée par le réseau d'écoulement n'est pas représentative du comportement hydrologique à une échelle plus fine (sous-bassin-versant, en tout point de l'espace) dont certaines configurations *in situ* du réseau peuvent générer d'autres types de réponses (« anomalies » ; Douvinet, 2008) qui vont à l'encontre de la réponse globale, des anomalies qui ne sont souvent masquées dans la réponse globale du bassin-versant. Il faut garder à l'esprit que l'efficacité du réseau est étudié ici par rapport à la forme du bassin dans laquelle il s'insère ; jusqu'ici, le facteur pente n'a pas été pris en compte.

Pour analyser l'efficacité structurelle du réseau de drainage du bassin-versant et détecter les anomalies internes qui peuvent se présenter, Delahaye (2002) a proposé de calculer sous *RuiCells* un indice appelé P , dans lequel la surface globale du bassin-versant est rapportée au pic de la réponse surfacique Q_{max} . L'indice P peut être également calculé en tout point de l'espace en rapportant la surface située en amont de celui-ci à son Q_{max} .

$$P = (Q_{max} / A) \times 100 \quad (\text{Equation 11})$$

Douvinet (2008), après avoir calculé l'indice P pour 189 bassins versants, et analysé leur trajectoire au sein de ces bassins, a remarqué que « L'indice P présente l'inconvénient de chuter très rapidement depuis les zones sources » du fait de l'augmentation de la surface non proportionnelle avec celle du Q_{max} , cette dernière étant beaucoup moins rapide. Ainsi et pour donner un certain équilibre à ce rapport, l'auteur propose un autre indice appelé IE :

$$IE = (Q_{max} / \sqrt{A}) \times 100 \quad (\text{Equation 12})$$

dans lequel le Q_{max} est rapporté à la racine carrée de la surface d'amont, rendant ainsi l'indice IE adimensionnel. Un IE équivalant à 100 renseigne sur une efficacité structurelle maximale du réseau ; la bande des cellules équidistantes coïncidence avec le diamètre moyen du bassin (Douvinet, 2008). L'indice IE sera calculé pour le bassin-versant de l'Oued Koriche ainsi que pour leurs cinq sous-bassins versants délimités auparavant (fig. 6.16).

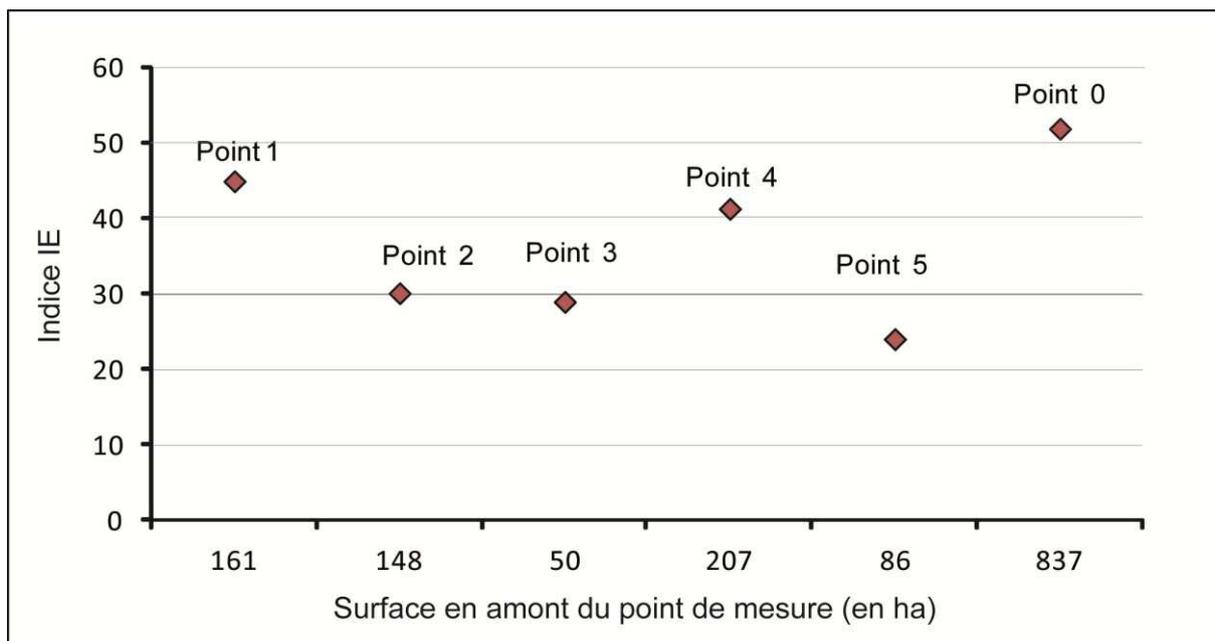


Fig. 6.16. Evolution de l'indice IE en différents points du bassin-versant de l'Oued Koriche.

Avec $IE = 52$, la structure interne du réseau d'écoulement est dotée d'une certaine efficacité fonctionnelle à toutes les échelles. La valeur la plus élevée a été enregistrée à l'exutoire ($IE = 52$) mais des valeurs d' IE remarquables sont également observées dans la partie amont du bassin (Point 1 ; $IE = 45$) et dans sa partie aval, au niveau du sous-bassin-versant du Chemin du Fort (Point 4 ; $IE = 41$). Les autres sous-unités présentent des valeurs plus faibles allant de 24 à 30. En enregistrant des valeurs importantes de l'indice IE dans la partie amont du bassin-versant, on peut s'attendre alors à la formation locale de crues rapides ; il en est de même pour le sous-bassin-versant du Chemin du Fort. Ainsi, ces zones peuvent être considé-

rées comme des zones à risque, à ne pas négliger dans toute démarches d'aménagement et de prévention du risque dans le bassin. Néanmoins, cette efficacité à la fois en amont et en aval du réseau d'écoulement de l'Oued Koriche, qui s'accroît à l'exutoire, ne signifie pas pour autant que le bassin-versant présente une forte homothétie : en réalité, la croissance de l'amont vers l'aval de IE ne suit pas une évolution linéaire, signe de faible homothétie interne.

6.2.2.2.3. Simulation de la réponse hydrologique théorique du bassin-versant de l'Oued Koriche dans un espace 3D

Après avoir simulé la réponse surfacique théorique dans un espace 2D et présenté le surfacogramme correspondant, rendant maintenant notre simulation plus proche de la réalité, nous allons présenter une simulation dans l'espace 3D, dans laquelle un troisième paramètre de l'hydrosystème est intégré, à savoir le système de pente. Ainsi, les liens d'écoulement ne sont plus seulement guidés par la topologie de voisinage du réseau cellulaire mais par les liens structurant la surface, aboutissant à la mise en évidence de trois types d'écoulement : linéaires, ponctuels et surfaciques (Tarboton, 1997 ; Menad *et al.*, 2012).

Pour illustrer l'évolution de la réponse hydrologique (estimation des débits et des volumes écoulés en tout point de l'espace) et son efficacité dans le cadre du système morphologique dans lequel il se développe, on doit procéder à une simulation qui combine trois des principaux paramètres de l'hydrosystème à savoir : la forme, la structure du réseau et les pentes.

Une simulation menée dans l'espace 3D signifie qu'on fait transiter des volumes et non plus seulement des surfaces. De fait, un autre paramètre de l'hydrosystème doit être implémenté, à savoir les précipitations. Comme le but ici est d'analyser l'efficacité du système morphologique de l'Oued Koriche, et non pas de simuler le comportement hydrologique lors d'événements réels, la simulation sera donc implémentée avec une pluie d'1 mm ruissellant sur une surface 100 % imperméable. A la fin de ce calcul sont produites une cartographie de la réponse hydrologique théorique ainsi que le morphogramme correspondant (fig. 6.17).

En premier lieu, les valeurs des débits enregistrées sont moins importantes alors que le temps de la réponse est plus long par rapport à la simulation 2D réalisée précédemment. Le pic de la réponse hydrologique est observé à l'itération 63 : il est égal à 8,9 ha/min pour une pluie théorique d'1mm et une surface parfaitement imperméable. Cette valeur est expliquée principalement par l'arrivée des écoulements du bassin-versant du Chemin du Fort en aval. Le bassin-versant de Birtraria participe également à Q_{max} mais d'une manière beaucoup moins importante que le premier. Les apports de l'amont commencent à arriver à l'exutoire au moment de la formation du Q_{max} , provoquant ainsi une augmentation relative de l'intensité du pic de crue.

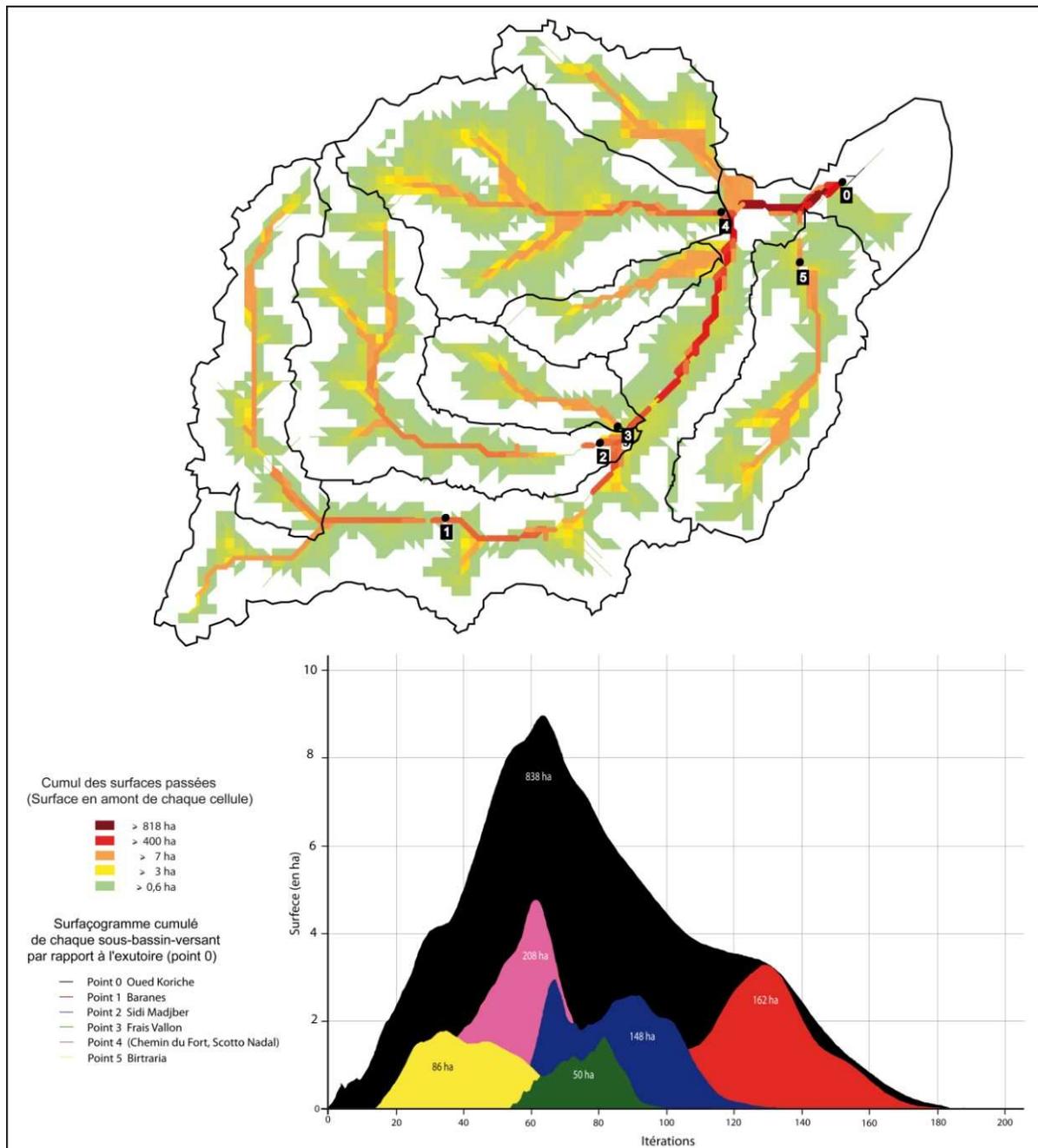


Fig. 6.17. Simulation de la réponse hydrologique de l'Oued Koriche dans l'espace 3D.

En comparaison avec la réponse théorique surfacique, on remarque que les valeurs Q_{max} relevées à la fois à l'exutoire de l'Oued Koriche et au niveau de l'ensemble des exutoires des sous-bassins versants constitutifs sont nettement moins importantes. En intégrant l'effet du paramètre pente, l'intensité des écoulements générés en amont chute et la réactivité des sous-bassins aval est mise plus en avant. Des taux de diminution variant entre 19 et 43 % sont enregistrés entre les Q_{max} du surfaçogramme et les Q_{max} du morphogramme. Ce constat révèle clairement le poids du paramètre pente dans le contrôle de la réponse hydrologique dans l'Oued Koriche. Les plus grandes influences sont ressenties au niveau du sous-bassin-versant amont à l'exutoire final de l'Oued Koriche. L'influence de la pente est moins ressentie dans la partie moyenne et aval du bassin, avec des diminutions variant de 18 et 20 % (fig. 6.18).

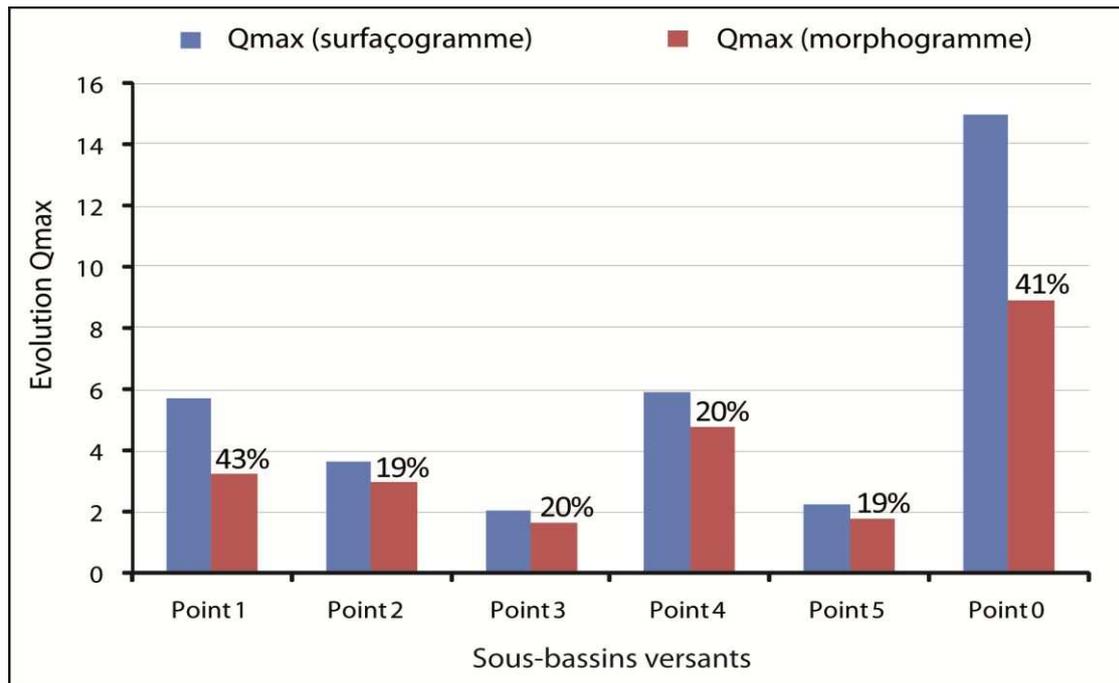


Fig. 6.18. Evolution du Qmax en passant d'une simulation 2D (paramètres forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement) à une simulation 3D (paramètre pente).

L'autre constat relevé est celui de l'organisation de l'arrivée des réponses des différents sous-bassins versants à l'exutoire (la concomitance des réponses), distinctes sur les surfaçogrammes et les morphogrammes. L'exemple des deux sous-bassins Sidi Medjber et Chemin du Fort illustre bien ce propos : au niveau du surfaçogramme, les pics de la réponse hydrologique de ces deux sous-bassins coïncident parfaitement, ce qui n'est pas le cas au niveau du morphogramme où la réponse du premier n'atteint l'exutoire qu'après 10 itérations de l'arrivée du second. Un décalage qui peut être expliqué par le fait que le contrôle de la réponse hydrologique par le système de pentes n'a pas le même niveau dans les deux sous-bassins.

Pour mieux évaluer le poids exercé par le paramètre pente dans le processus de la réponse hydrologique, on a calculé l'« indice d'efficacité des pentes » (*IEP* ; Douvinet, 2008). Les résultats sont présentés in fig. 6.19.

$$IEP = (Q_{max} / \sqrt{A}) \times 100 \quad (\text{Equation 13})$$

Les valeurs d'*IEP* calculées confirment le constat relevé précédemment. Sur la rive gauche de l'Oued Koriche (la rive motrice de la réponse hydrologique), l'efficacité des pentes augmente de l'amont vers l'aval (fig. 6.19). L'*IEP* le plus élevé est enregistré au niveau des sous-bassins versants aval (Chemin du Fort et Scotto Nadal). L'efficacité des pentes y est même supérieure à celle enregistrée à l'exutoire de l'Oued Koriche ; à noter ici que l'*IEP* enregistré à l'exutoire présente en quelque sorte la synthèse de l'ensemble des efficacités enregistrées en tout point du bassin-versant. Le fait d'avoir au niveau du Point 4 un *IEP* plus élevé que celui enregistré à l'exutoire remet en question encore une fois la notion de bassin-versant et sa perception comme une unité hydrologique homogène. Ce constat confirme ainsi que certains comportements locaux peuvent être masqués dans la réponse globale, d'où tout l'intérêt de revisiter le concept de bassin-versant.

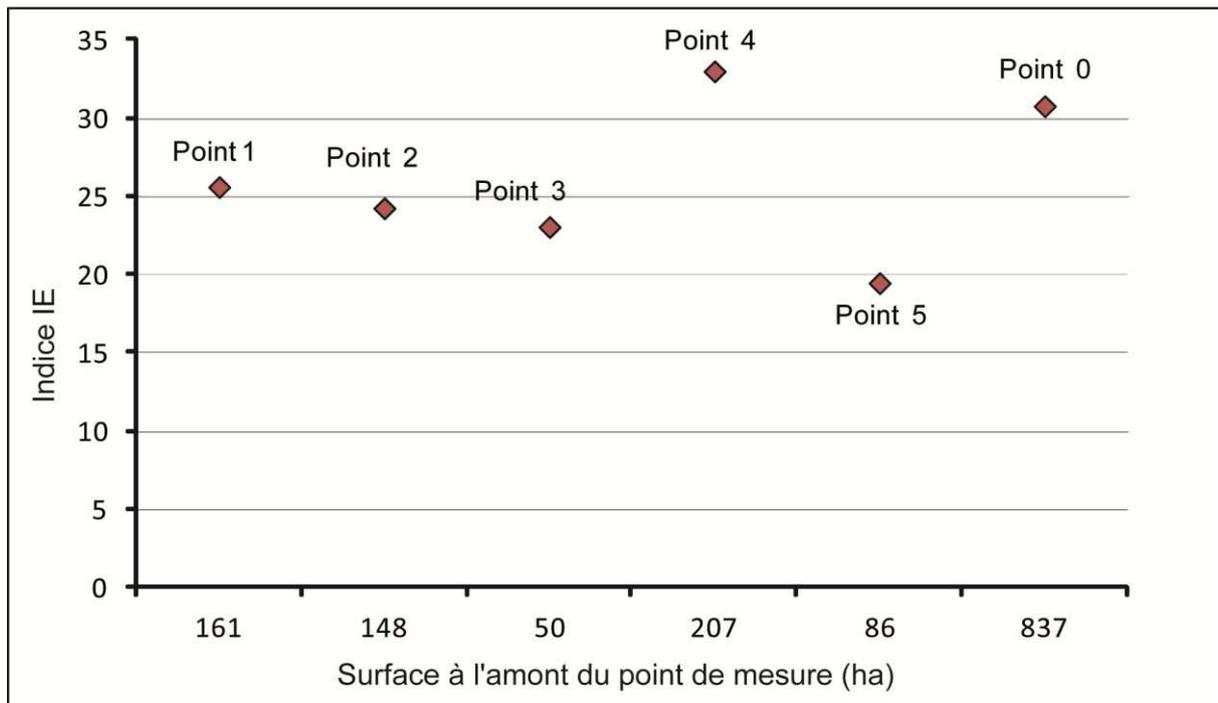


Fig. 6.19. Evolution de l'indice *IEP* en différents points du bassin-versant de l'Oued Koriche.

Une synthèse de l'ensemble des indices morphosynthétiques (surface, Q_{moy} , Q_{max} , longueur d'écoulement), les résultats de différentes simulations et les indices *IE* et *IEP* calculés ci-dessus sont présentés dans le tableau 6.1.

6.2.2.3. Simulation du comportement hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 (événement de référence)

Dans le but d'évaluer l'efficacité du système morphologique de l'Oued Koriche, on a simulé sa réponse hydrologique théorique dans l'espace 3D, en injectant une pluie théorique homogène de 1 mm transitant sur une surface 100 % ruisselante. Dans cette partie et pour que nos simulations soient encore plus proches de la réalité, un autre paramètre de l'hydrosystème a été implémenté dans la simulation, à savoir les événements météorologiques, qui sont considérés comme le premier paramètre déclenchant de la réponse hydrologique. A ce niveau, on a simulé le comportement hydrologique de l'Oued Koriche pour un événement météorologique réel, l'événement choisi ici étant celui des 9-10 novembre 2001 (cf. chapitre 5) qui a affecté la ville d'Alger et dont les dégâts ont été considérables. L'épisode pluvieux a été implémenté sous la forme d'un hyétogramme où les cumuls sont enregistrés tout les 30 min, pour des volumes transitant sur une surface 100 % ruisselante ; les résultats sont présentés dans la fig. 6.20

Tableau 6.1. Les indices morphosynthétiques du bassin-versant de l'Oued Koriche

	Surface	Longueur d'écoulement	Nombre d'itérations	Qmax Surfaço-gramme	IE	Qmax Morphogramme	IEP
Point 1 (Baranes)	161,25	4136,137	72	5,7	45	3,25	25,6
Point 2 (Sidi Medjber)	148,12	2789,682	74	3,66	30	2,95	24,24
Point 3 (Frais Vallon)	49,75	2640,991	44	2,04	29	1,625	23,04
Point 4 (Chemin du Fort, Scotto)	207,37	1214,373	66	5,94	41	4,75	33
Point 5 (Birtraria)	85,62	1072,838	64	2,22	24	1,8	19,45
Point 0 (Exutoire)	837,25	521,856	146	15	52	8,9	30,76

Le graphe de la réponse hydrologique (fig. 20) montre que le bassin-versant de l'Oued Koriche répond tout d'abord aux premières pluies (pic de crue à $90 \text{ m}^3/\text{s}$) durant la nuit du 9-10/11. Ce premier pic est provoqué par la réaction concomitante des deux sous-bassins versants de l'amont, à savoir Baranes et Sidi Medjber, et le sous-bassin-versant de Chemin du Fort situé en aval. Les réponses enregistrées le lendemain, durant la matinée du 10/11, sont plus élevées : on enregistre un débit maximal égal à $118,41 \text{ m}^3/\text{s}$ (pic de la crue), qui est dû à la réponse concomitante des mêmes sous-bassins versants impliqués dans la production du premier pic. Les autres sous-bassins versants ont eu des réponses avec des débits bien moindres par rapport aux trois sous-bassins versants cités ci-dessus. Cela peut être expliqué en grande partie par la différence de taille (dimension des sous-bassins versants). En effet, les sous-bassins versants Baranes, Sidi Medjber et Chemin du Fort sont les plus importants sous-bassins versants constitutifs de l'Oued Koriche. Les volumes d'eau produits par ces derniers sont donc beaucoup plus importants, d'où les débits résultants plus élevés. Néanmoins, l'évolution du débit ne présente pas une fonction linéaire et elle n'est pas proportionnelle à l'évolution de la surface, ce qui confirme que toute analyse de la réponse hydrologique doit être effectuée en prenant en compte simultanément l'ensemble des paramètres de l'hydrosystème dans lequel elle se développe.

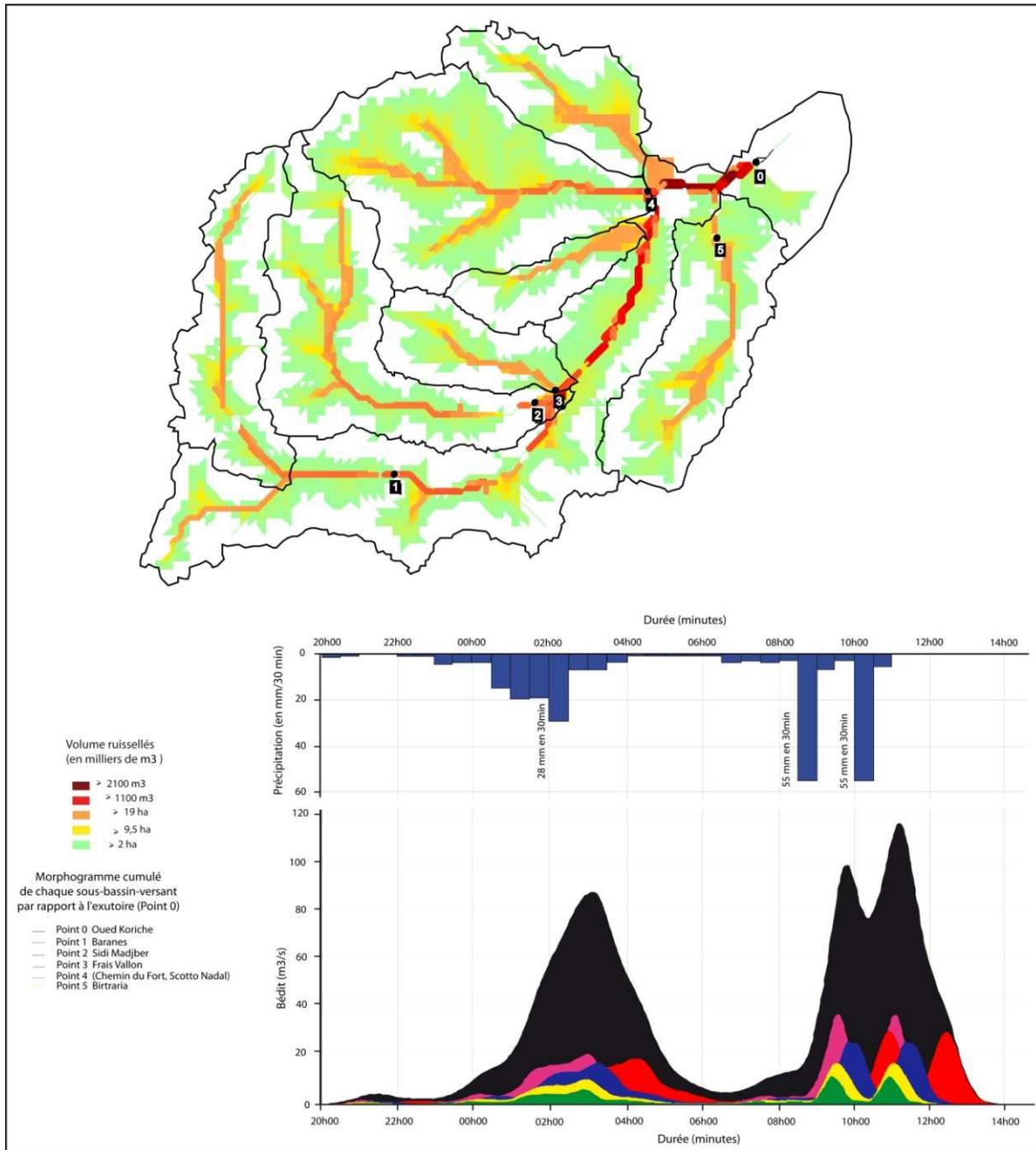


Fig. 6.20. La réponse hydrologique théorique du bassin-versant de l'Oued Koriche lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001.

6.2.3. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans le bassin-versant de Beni Messous

Dans cette partie, les objectifs sont les mêmes que ceux suivis dans l'analyse physiographique et hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche : analyse dérivée du traitement primitif du MNT implémenté dans *RuiCells* puis réalisation des différentes simulations en implémentant les paramètres de hydrosystème, les uns après les autres, dans un espace de travail 2D puis 3D.

6.2.3.1. Produits dérivés du MNT

a) *Le réseau hydrographique* : la structure interne du réseau hydrographique de Beni Messous est présentée in fig. 6.21. Les écoulements de surface obtenus sous *RuiCells* présentent l'avantage de pouvoir représenter les différents types de ruissellement de surface qui peuvent avoir lieu dans un bassin-versant à savoir les écoulements surfaciques, linéaires et ponctuels (cuvettes ; fig. 6.21).

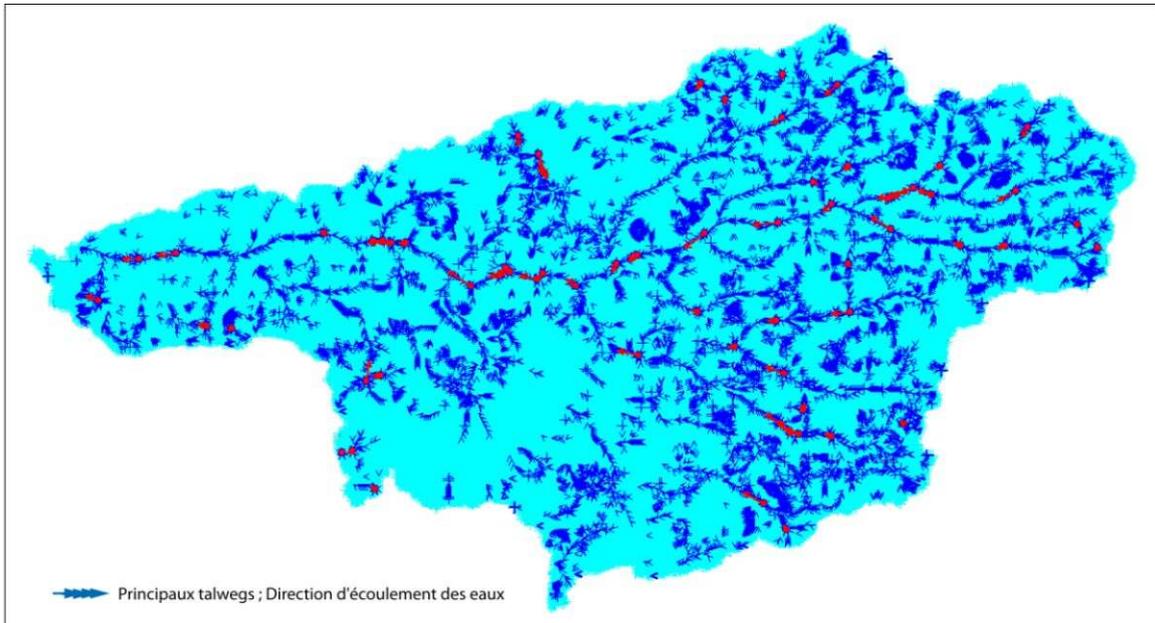


Fig. 6.21. Graphe de ruissellement dans Beni Messous obtenu sous *RuiCells*.

b) La fig. 6.22 présente la délimitation topographique de Beni Messous et ses principaux sous-bassins constructifs.

6.2.3.2 Simulations numériques

Afin d'atteindre les objectifs fixés au départ (cf. *supra*) et pouvoir mener au mieux l'analyse de l'efficacité du système morphologique du bassin-versant de Beni Messous, on procède comme suit : on fait apparaître la signature spatiale de la réponse surfacique globale (indice de forme), on analyse l'efficacité structurelle du réseau qui draine le bassin et on étudie le poids exercé par le système des pentes sur la réponse hydrologique en tout point de l'espace.

6.2.3.2.1 Evolution spatio-temporelle de la réponse surfacique théorique globale

Grace à une simulation dans un espace 2D dans lequel on a fait transiter des surfaces et cartographié la signature surfacique ainsi que le surfasogramme correspondant (fig. 6.23). Le but ici est d'analyser l'incidence de la forme sur l'organisation spatio-temporelle de la réponse surfacique théorique dans le bassin-versant de Beni Messous.

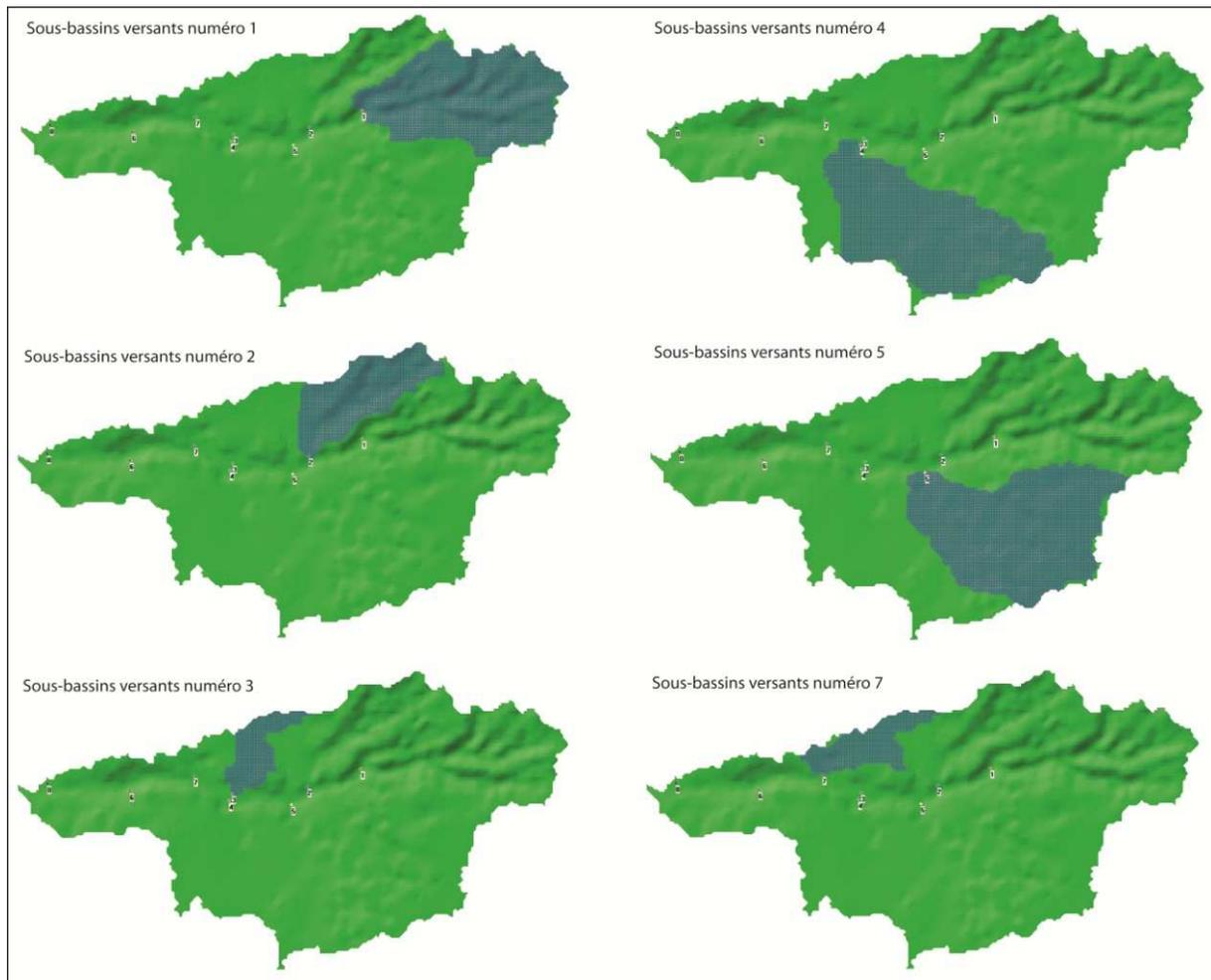


Fig. 6.22. Délimitation des principaux sous-bassins versants de Beni Messous.

La carte de la réponse surfacique globale montre que la plus grande concentration de surface est observée à l'exutoire. La forme du bassin-versant favorise la mise en place d'un réseau qui peut être qualifié de dendritique de part et d'autre des deux rives de Beni Messous, ces dernières n'étant pas symétriques puisque la rive gauche abrite les plus grands sous-bassins. Le cumul maximal de la réponse surfacique (Q_{max}) est égal à 28,2 ha il a eu lieu à l'itération n°172 (DQ_{max}) ; cette dernière présente 72 % du D_v , ce qui laisse penser que les cellules équidistantes à l'origine du Q_{max} se trouvent plutôt dans la partie amont du bassin-versant. En plus du Q_{max} , deux autres cumuls sont également remarquables non seulement par leur intensité mais aussi par leur positionnement spatio-temporel. Ces réponses sont mentionnées sur la fig. 6.24 par P2 et P3 : leur intensité sont respectivement égales à 26,44 et 24,44 ha, P2 devance le pic de la réponse de 14 itérations et l'ensemble P1, P2 et Q_{max} ont eu lieu dans un temps équivalent à 22 itérations. Ainsi, les trois réponses se succèdent dans un laps de temps très réduit (22 minutes). Ce dernier constat présente un grand intérêt d'un point de vue hydrologique : lors d'une crue, il faut s'attendre théoriquement à la formation de trois vagues dont l'arrivée est successive et très rapprochée dans le temps. Ce premier constat est à prendre avec précaution car le surfaçogramme n'incorpore que l'incidence de la forme sur la réponse globale et il reste à vérifier avec une simulation 3D où l'incidence du paramètre pente sur la réponse est prise en compte.

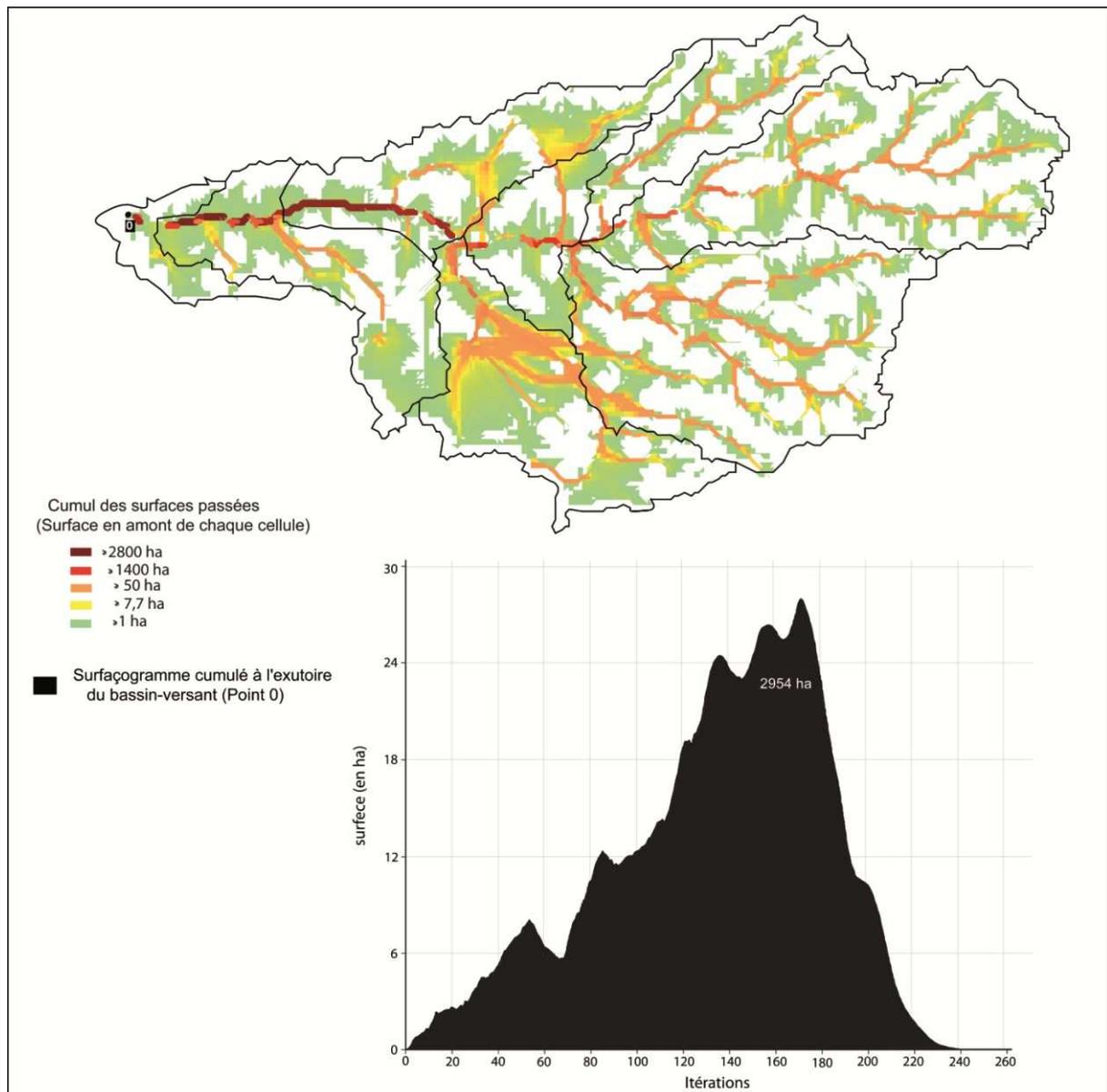


Fig. 6.23. Cartographie de la réponse théorique globale de surface dans Beni Messous en utilisant l'automate cellulaire RuiCells.

On se servant du surfaçogramme, les différents indices morphosynthétiques du bassin-versant de Beni Messous ont pu être calculés. Les indices calculés sont présentés dans le tableau 6.2.

Les paramètres morphosynthétiques se sont développés principalement pour s'affranchir de la barrière de la taille lors d'une comparaison entre bassins versants différents. En comparant les Im Oued Koriche avec les Im Beni Messous, on déduit que la montée de la réponse dans ce dernier est en théorie moins brutale qu'au niveau de l'Oued Koriche. Pour localiser spatialement les cellules équidistantes génératrices des réponses remarquables, on a cartographié les isodistances en tout point du bassin-versant. Le distançogramme et la carte des isodistances établies sont présentés *in* fig. 6.24.

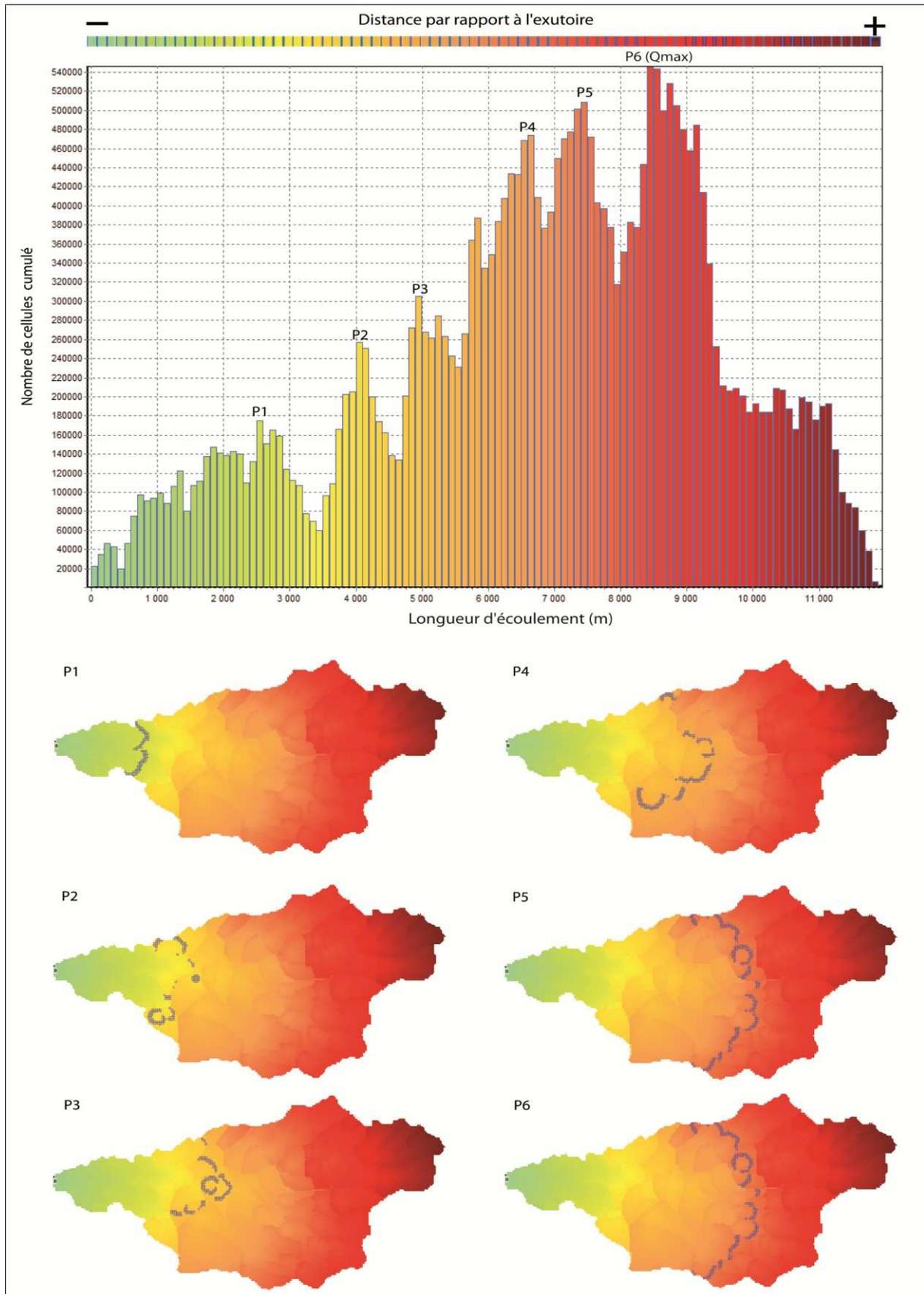


Fig. 6.24. Distançogramme (A) et cartographie des cellules équidistantes de l'exutoire (B) dans le bassin-versant de Beni Messous.

La carte des isodistances (fig. 6.24) confirme le constat fait auparavant : les cellules équidistantes productrices du pic de la réponse hydrologique (P1) sont localisées dans la partie amont du bassin-versant, soulignant ainsi sa réactivité remarquable. Les cellules équidistantes génératrices du P2 et P3 se trouvent respectivement dans la limite basse de l'amont et la partie moyenne du bassin. Là aussi, la répartition spatiale des cellules équidistantes est une configuration dite « en chou-fleur », indiquant ainsi l'efficacité structurale du réseau par rapport à la forme du bassin-versant dans lequel il s'insère.

Pour mieux décrypter, faire apparaître les comportements locaux et matérialiser l'emboîtement des sous-unités constitutives du bassin-versant de Beni Messous, on a rajouté 7 points de mesures, ces points étant placés aux exutoires des principaux sous-bassins versants de Beni Messous. Une cartographie de la réponse hydrologique surfacique théorique et la production de leur surfaçogramme ont été réalisés en chaque point de calcul ajouté précédemment (fig. 6.25).

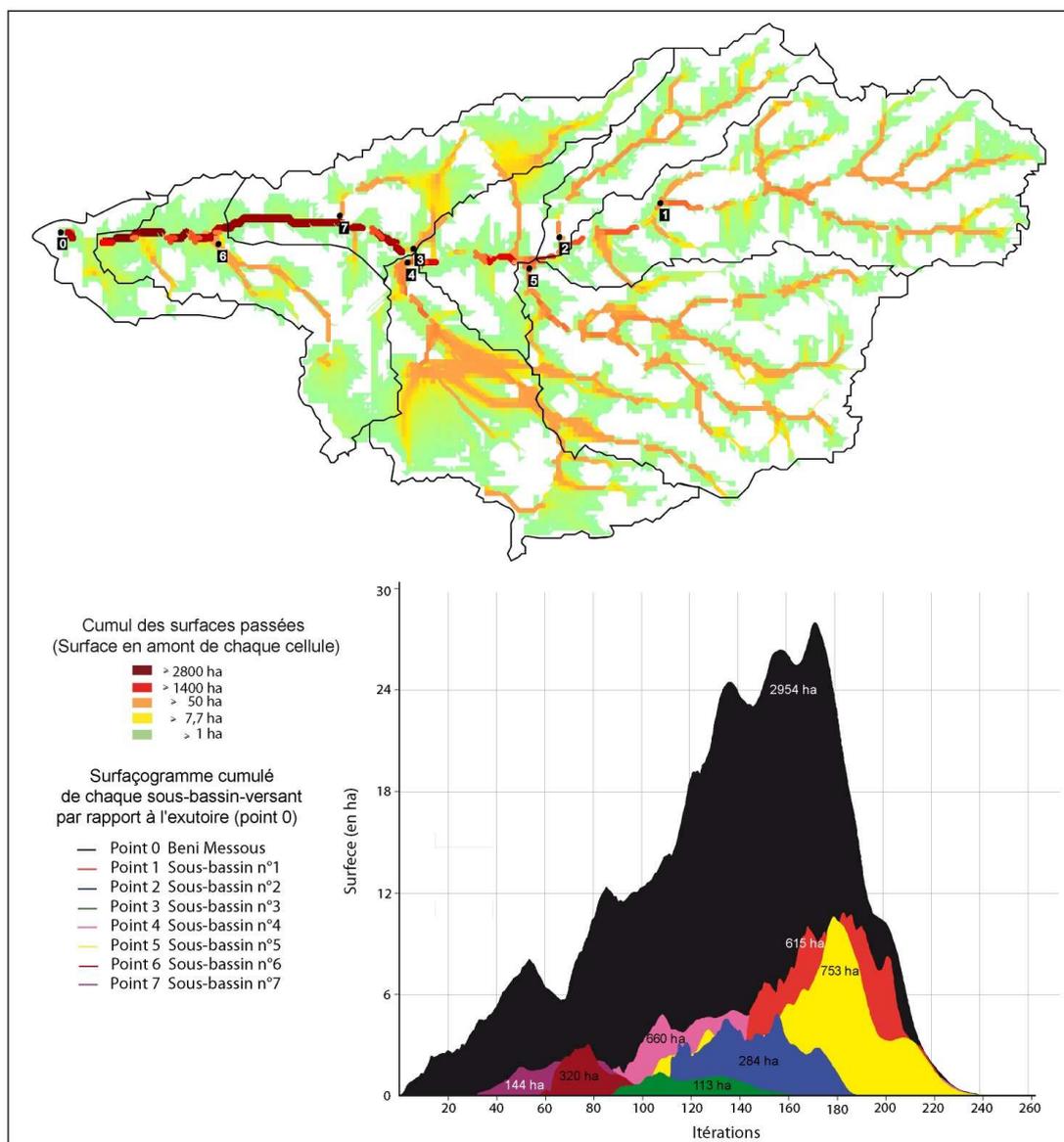


Fig. 6.25. Cartographie de la réponse surfacique théorique des différentes sous-unités hydrographiques de Beni Messous avec l'automate *RuiCells*.

Il est très clair que les sous-bassins versants de la partie amont voire moyenne sont très réactifs car ils produisent la plus grande partie des volumes reçus en aval. Les sous-bassins versants de Beni Messous, selon que l'on soit en rive gauche ou droite, ont une orientation NE/SW : pour certains sous-bassins dont l'exutoire se trouve dans la partie moyenne voire aval de Beni Messous, la fin de la réponse hydrologique coïncide avec celle de la réponse globale. Cela s'explique par le fait que les longueurs des écoulements (*i.e.*, la distance entre le point le plus éloigné du sous-bassin et l'exutoire) entre ceux des sous-bassins amont et ceux du bassin moyen sont très proches. Cet effet est moins ressenti en rive droite qu'en rive gauche où les sous-bassins versants se prolongent vers le sud.

In fig. 6.25, le pic de la réponse est provoqué principalement par l'arrivée concomitante des apports des sous-bassins versants 1 et 5 et par les apports du sous-bassin 4 certes moins important en termes de cumul que les deux premiers mais participant tout de même à l'augmentation de l'intensité du pic de la réponse surfacique. P2 et P3 sont le résultat de la réaction de nombreux sous-bassins classés, selon la grandeur de leurs apports, sous-bassins 1, 2, 4 et 5, à l'origine de P2. Concernant P3, ce sont les sous-bassins 4, 2, 5 et 3 qui en sont à l'origine.

On déduit ainsi que dans le Beni Messous, les parties amont et moyenne sont réactives tandis que l'aval sert simplement de corps d'accompagnement des écoulements, un constat très attendu en tenant compte de la forme « en poire » du bassin-versant de Beni Messous, une forme marquée par un aval trop étroit par rapport à l'amont du bassin.

6.2.3.2.2. Efficacité structurelle du réseau hydrographique

On a pu voir auparavant et à plusieurs reprises que la réponse hydrologique globale peut masquer certaines anomalies internes provoquées par des configurations *in situ* du réseau. Pour parvenir à détecter toutes anomalies probables, on a reconstruit l'évolution de l'indice d'efficacité structurelle du réseau de drainage (IE) à travers l'espace. L'indice IE est calculé à l'exutoire du bassin-versant de Beni Messous ainsi qu'aux exutoires des 7 sous-bassins versants délimités auparavant ; les résultats sont présentés in fig. 6.26.

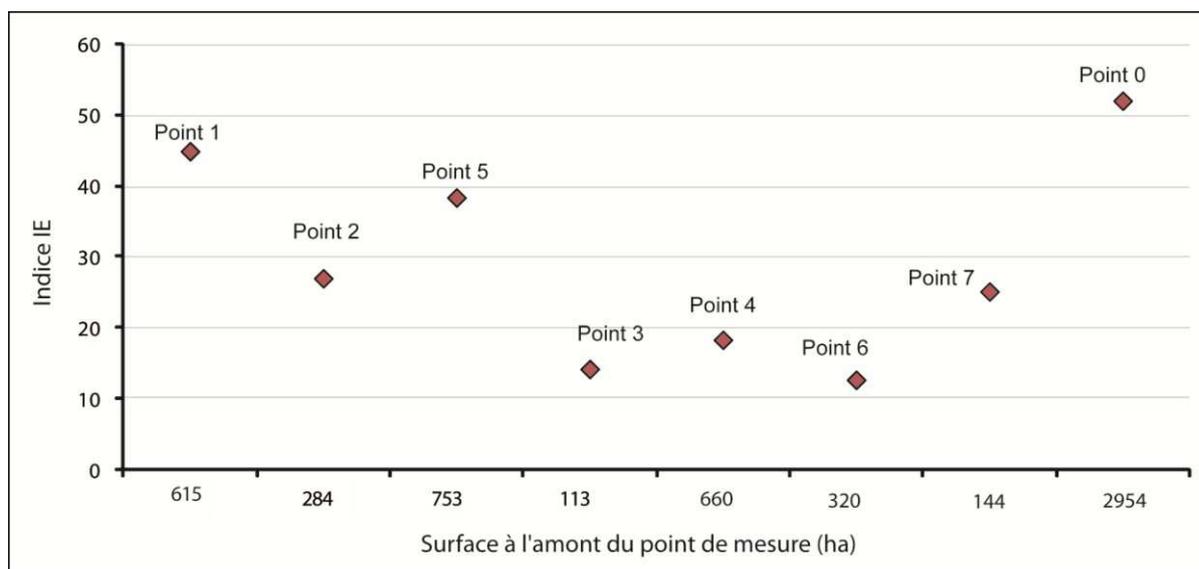


Fig. 6.26. Evolution de l'indice IE en différents points du bassin-versant de Beni Messous.

L'IE du réseau de drainage de Beni Messous est égal à 52, ce qui est la valeur la plus élevée enregistrée dans ce dernier. Ainsi la structure interne de Beni Messous est fonctionnellement plutôt efficace. Le second plus fort IE est enregistré en amont (IE = 45). Dans le bassin moyen, on enregistre un IE = 38 relevé au niveau du sous-bassin 5. En aval, l'IE continue à baisser avec des valeurs variant entre 25 (exutoire du sous-bassin numéro 7) et 12 (exutoire du sous-bassin numéro 6). Si on ne prend pas en compte la valeur enregistrée à l'exutoire, on peut dresser une décroissance linéaire de l'amont vers l'aval des indices IE relevés aux exutoires des principaux sous-bassins versants constitutifs de Beni Messous.

Le comportement du bassin-versant de Beni Messous se rapproche le plus souvent d'un comportement uniforme : les anomalies sont rares et l'échelle du bassin-versant est convenable pour mener des études hydrologiques. Néanmoins, il faut rester vigilant face à la réactivité de sa partie amont dont la valeur d'IE est relativement proche de celle enregistrée à l'exutoire.

6.2.3.2.3 Simulation de la réponse hydrologique théorique du bassin-versant de Beni Messous dans l'espace 3D

Pour être encore plus proche de la réponse réelle de l'hydrosystème, on a intégré à ce stade le paramètre pente à notre simulation. Afin d'évaluer l'efficacité morphologique du bassin de Beni Messous, on a donc simulé les écoulements dans l'espace 3D, en injectant une pluie homogène de 1 mm d'intensité s'abattant sur une surface totalement imperméable. En *output* de cette simulation, on a obtenu une cartographie de la réponse hydrologique théorique ainsi qu'un morphogramme pour chacun des points de mesures, y compris à l'exutoire. Ainsi et grâce à cette simulation, on a pu retracer l'évolution et l'efficacité spatio-temporelle de la réponse hydrologique en tout point du bassin-versant de Beni Messous (fig. 6.27).

En premier lieu, on relève que le temps de la réponse hydrologique est allongé alors que son intensité est en baisse. Le Q_{max} enregistré est égal à 17,5 ha/min ; il a eu lieu à l'itération numéro 220. Le débit de pointe est provoqué par l'arrivée concomitante des réponses hydrologiques des sous-bassins versants 4 et 2, ainsi que par la réception des premiers écoulements développés sur les sous-bassins versants 1 et 5, qui participent également à l'augmentation de l'intensité du débit de pointe.

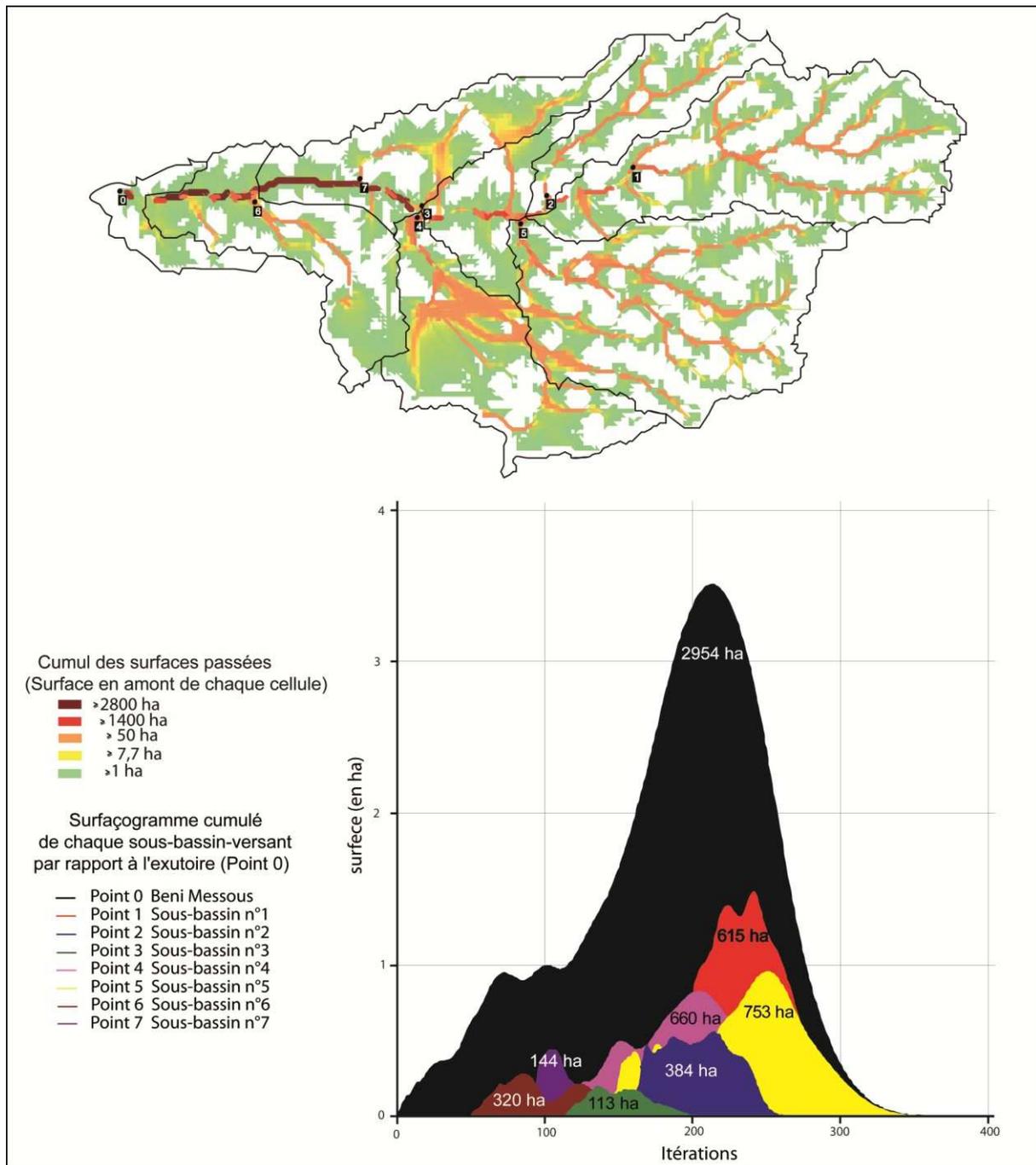


Fig. 6. 27. Simulation de la réponse hydrologique de Beni Messous dans l'espace 3D.

La baisse des débits de pointe enregistrée au niveau des différents sous-bassins versants ne suit pas une évolution linéaire mais varie selon l'endroit où l'on se place dans le bassin-versant de Beni Messous (fig. 6.28). Le taux de réduction des débits le plus faible est observé en rive gauche du bassin moyen alors que le taux le plus élevé est relevé en rive droite, dans la partie aval du bassin. On remarque également que les derniers écoulements arrivés à l'exutoire ne sont pas ceux du sous-bassin 1 (sous-bassin amont), ni ceux du sous-bassin 4 comme c'était le cas dans le surfaçogramme simulé auparavant. Le taux de diminution du Q_{max} le plus faible est enregistré au niveau du sous-bassin 4 (14 % de diminution) : on en déduit que le système de pentes n'a pas de rôle prédominant dans la réponse hydrologique à cet endroit. Les derniers écoulements reçus à l'exutoire (ils marquent la fin de la réponse) sont

ceux du sous-bassin 5 situé en rive gauche de Beni Messous, et c'est justement en ce point que l'on a enregistré le taux de diminution du Q_{max} le plus élevé (54 %). Cela signifie que le système de pentes à cet endroit est un paramètre de contrôle clé dans la production de la réponse hydrologique et il influence considérablement l'efficacité du système morphologique. En intégrant le paramètre pente dans la simulation de la réponse du sous-bassin 4, on a vu son Q_{max} peu changer : le paramètre pente ne joue donc pas ici un rôle majeur dans la genèse de la réponse hydrologique. Grâce au paramètre IEP, l'efficacité du système de pentes peut être évaluée en tout point du bassin-versant de Beni Messou.

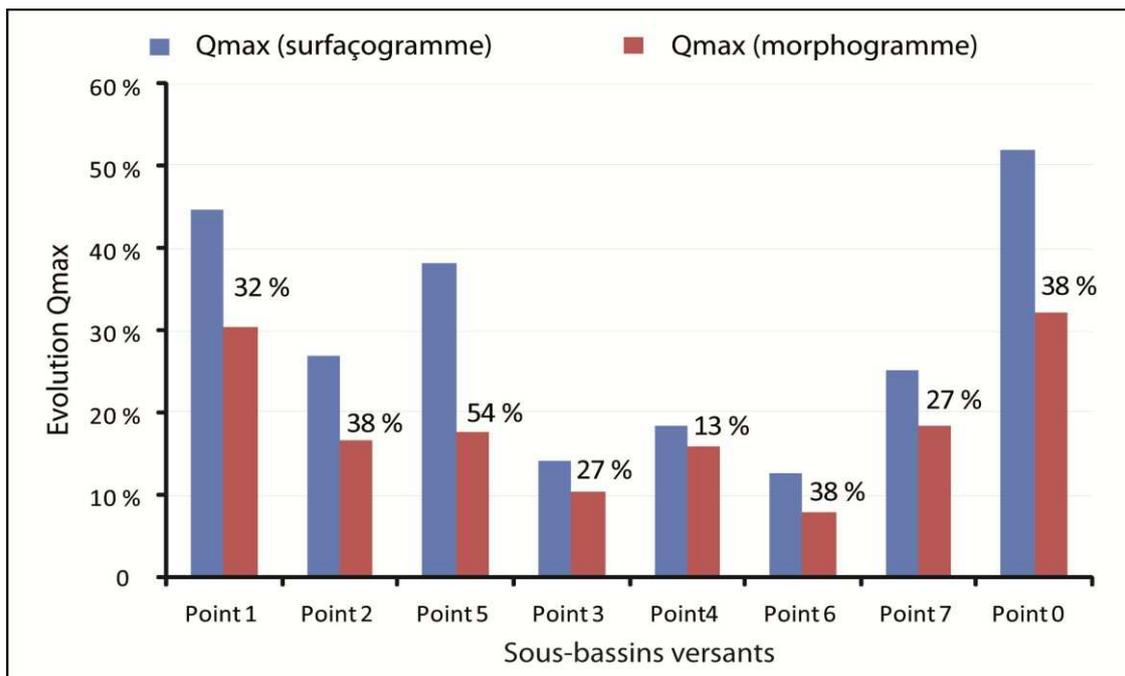


Fig. 6.28. Evolution du Q_{max} en passant d'une simulation 2D (paramètres forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement) à une simulation 3D (paramètre pente).

Par la suite, on va retracer l'évolution spatio-temporelle de l'indice d'efficacité des pentes (IEP) en différents points du bassin de Beni Messous, se qui va nous permettre de mieux appréhender le contrôle exercé par le paramètre pente dans la production de la réponse hydrologique. Les résultats sont présentés *in* Fig. 6.29.

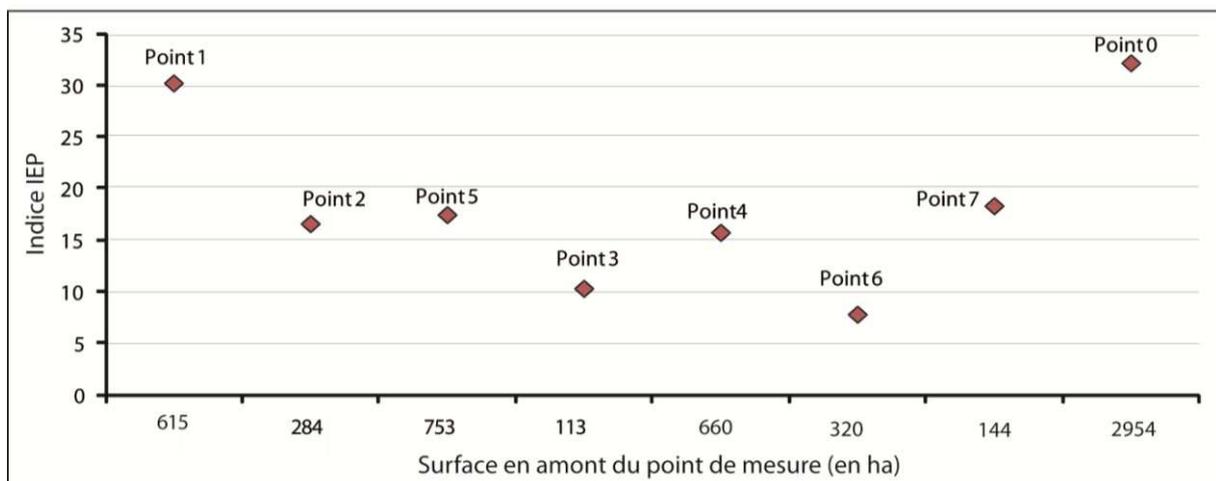


Fig. 6.29. Evolution de l'indice IEP à différents points du bassin-versant de Beni Messous.

Les valeurs du IEP les plus élevées sont enregistrés dans le sous-bassin 1 (amont) et à l'exutoire, les sous-bassins 2, 5, 4 et 7 ont des IEP très proches (16-18) et les plus faibles valeurs sont enregistrées dans les sous-bassins 3 et 6, où les IEP correspondaient respectivement à 10 et 8. Ainsi, le bassin de Beni Messous est doté dans sa partie amont d'un système de pentes efficace, une efficacité qui est ressentie à son exutoire et ce, malgré une efficacité des pentes beaucoup plus faible relevée dans ses parties moyenne et aval. Le fait d'enregistrer l'IEP le plus élevé à l'exutoire du bassin confirme encore une fois que dans le cas de Beni Messous, l'échelle du bassin-versant est très convenable pour étudier des processus hydrologiques. Néanmoins, on pense que pouvoir analyser et caractériser un bassin-versant à des échelles plus fines ne peut être que bénéfique. En effet, en prenant l'exemple du bassin-versant de Beni Messous, une analyse morphométrique et comportementale en tout point de ce dernier nous a permis de comprendre que l'efficacité observée à son exutoire est due en grande partie à l'efficacité de son amont : il suffit donc de contrôler sa partie amont pour diminuer significativement l'intensité et la rapidité de l'arrivée de la crue à son exutoire. Par ailleurs, dans une démarche d'aménagement ou de gestion du risque, un tel constat se traduit en gain considérable de temps et d'argent investi.

Une synthèse des indices morphométriques (surface, Q_{moy} , Q_{max} , longueur d'écoulement), les résultats de différentes simulations et les indices IE et IEP calculés ci-dessus, sont présentés dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2. Les indices morphométriques du bassin-versant de Beni Messous

	Surface	Longueur d'écoulement	Nombre d'itérations	Q_{max} Surface-gramme	IE	Q_{max} Morphogramme	IEP
Point 1	615	7219	1850	11,1	45	7,5	30
Point 2	284	5750	755	4,53	27	2,8	16
Point 3	113	4222	250	1,5	14	1,1	10
Point4	660	4161	780	4,68	18	4,05	16
Point 5	753	5214	1750	10,5	38	4,8	17
Point 6	320	1762	375	2,25	12	1,4	8
Point 7	144	3119	500	3	25	2,2	18
Point 0	2954	$L_{max} = 11978$	4700	28,2	52	17,5	32

6.2.3.2.4. Simulation du comportement hydrologique du bassin-versant de Beni Messous lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001

On suppose ici que l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 qui s'est abattu sur le bassin-versant de l'Oued Koriche a eu lieu dans le bassin de Beni Messous. On simule alors la probable réponse hydrologique de ce dernier (fig. 6.30). L'événement météorologique est simulé sur une surface totalement imperméable.

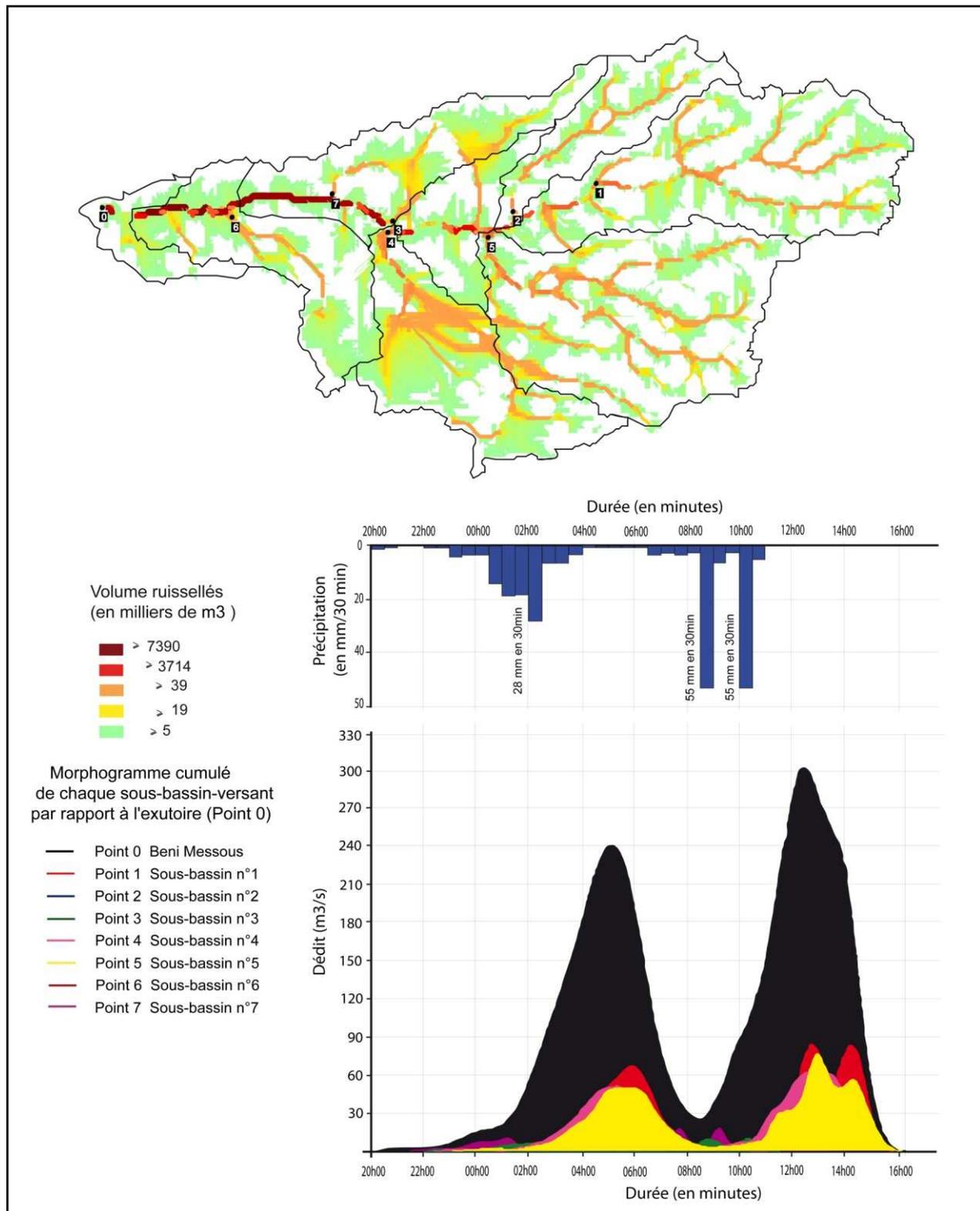


Fig. 6.30. La réponse hydrologique théorique du bassin-versant de Beni Messous lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001.

Le graphe de la réponse hydrologique (fig. 6.30) montre deux principaux pics, le premier pic (P1 = 240 m³/s) est produit en réponse tout d'abord aux premières pluies reçues dans la nuit des 9-10/11. Le P1 est produit par l'arrivée concomitante des sous-bassins 1, 2 et 5 situés plus en amont et le sous-bassin 4 situé en aval. Le deuxième pic, le plus important (P2 = 300 m³/s), est enregistré dans la matinée du 10/11, qui est également due à la réponse con-

comitante des mêmes sous-bassins versants impliqués dans la production du premier pic. On enregistre ainsi un débit de pointe égal à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ qui est presque trois fois plus grand que celui enregistré dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Théoriquement, le bassin-versant de Beni Messous serait donc plus exposé au risque de crue que l'Oued Koriche. En réalité, un tel scénario est impossible car dans cette simulation, on a supposé que l'événement météorologique était homogène, donc que tout point de la surface recevait en même temps la même quantité d'eau, ce qui explique les grands volumes et par la suite le fort débit de pointe. Mais on a pu vérifier antérieurement (cf. chapitre 5) que l'événement des 9-10 novembre 2001 résultait d'une configuration météorologique spatialement localisée (les stations météorologiques avoisinantes ont enregistré des cumuls beaucoup moins importants). Cette caractéristique n'est pas propre à l'événement de 2001 mais il s'agit d'une caractéristique intrinsèque des événements cyclogéniques observés dans cette partie de la Méditerranée.

6.2.4. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans les bassins versants côtiers

Dans cette partie, on a simulé et cartographié l'évolution spatio-temporelle de la réponse surfacique globale (signature spatiale) ainsi que la réponse hydrologique pour l'ensemble des 20 petits bassins versants côtiers. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3. Paramètres morphométriques et hydrologiques des bassins versants côtiers.

Bassins versants	Surface (en ha)	Cumul maximal de surface (en ha)	Débit de point (en m^3/s)
Bassin 1	46,25	0,1398	0,023
Bassin 2	36,87	0,708	0,11
Bassin 3	45,12	0,339	0,046
Bassin 4	54,12	1,392	0,23
Bassin 5	42,12	0,132	0,022
Bassin 6	49,5	0,195	0,033
Bassin 7	13	0	0
Bassin 8	39,87	0,1554	0,026
Bassin 9	39,5	0,996	0,16
Bassin 10	119,5	3,69	0,55
Bassin 11	9,37	0	0
Bassin 12	20	0,612	0,1
Bassin 13	29,5	0,459	0,08
Bassin 14	31,87	0,0822	0,01
Bassin 15	131,75	5,94	0,84
Bassin 16	30,12	0,567	0,009
Bassin 17	91,75	0,0606	0,01
Bassin 18	53,37	1,644	0,27
Bassin 19	42,12	0,336	0,036

Les résultats des traitements montrent clairement que dans les bassins versants côtiers, le risque de développer des crues, à la fois fortes et rapides, est négligeable. Néanmoins, il existe tout autre risque d'ordre hydrométéorologique qui peut frapper ces bassins et dont les conséquences peuvent être dramatiques. Comme on a pu le voir auparavant (chapitre 4), les épisodes cyclogéniques qui frappent cette partie de la Méditerranée sont souvent accompagnés par des rafales de vent très fortes, provoquant l'écrasement brutal des vagues sur la surface terrestre, ces vagues en regagnant la mer emporte tout ce qu'elles trouvent sur leur chemin de retour.

6.3. Evaluation de la vulnérabilité : simulation dynamique des écoulements en intégrant le paramètre « occupation du sol »

Ici, la « vulnérabilité » se limite au sens physique du terme, faisant uniquement référence à l'exposition de la surface physique face à l'aléa. L'analyse ne porte donc ni sur la sinistralité des crues (Léone, 2003 ; Douvinet, 2010), ni sur les impacts économiques (Thouret et D'Ercole, 1996), ni sur les aspects sociaux ou psychologiques car le phénomène de crue doit d'abord être bien compris sous l'angle de ses processus hydrogéomorphologiques (Menad *et al.*, 2012). Nous avons fait ce choix tout en ayant conscience que dans notre cas, d'autres variables auraient pu être considérées telles que la mobilité des personnes, leur perception du risque ou leur comportement adopté en temps de crise (Gaillard *et al.*, 2007 ; Ruin *et al.*, 2007 ; Barroca *et al.*, 2008 ; Rufat, 2009 ; Texier, 2009).

Cette vulnérabilité telle qu'elle est entendue dans notre travail va être estimée à travers l'évaluation de l'impact de l'emprise urbaine sur la répartition spatio-temporelle de la réponse hydrologique. L'emprise urbaine est souvent soulignée par son rôle aggravant de l'aléa hydrométéorologique, omniprésent en cette région. Grâce à la méthode d'évaluation adoptée dans cette étude, il est désormais possible de quantifier ses effets sur la dynamique hydrologique du bassin-versant.

Dans cette partie, la vulnérabilité ne sera considérée qu'au niveau du bassin-versant de l'Oued Koriche et ce, pour plusieurs raisons : 1) On a constaté à travers l'analyse de l'efficacité morphologique effectué ci-dessus que le bassin-versant de l'Oued Koriche présentait une aptitude remarquable à développer des crues rapides aux échelles du bassin et locale; 2) L'histoire récente et ancienne des catastrophes d'ordre hydrométéorologique dans la région renseigne que l'Oued Koriche a été à plusieurs reprises le site de phénomènes de crue violents ; 3) L'Oued Koriche est le seul bassin-versant dans lequel on puisse disposer de données météorologiques relativement fines (cumul de précipitations tous les 30 min), données indispensables pour pouvoir simuler un scénario qui se rapproche le plus possible de la réalité de la réponse hydrologique et pour pouvoir par la suite estimer des niveaux d'exposition des enjeux concordants avec la réalité du terrain.

On a choisi dans cette partie d'implémenter un MNT extrapolé à partir de courbes de niveaux digitalisées au pas de 25 m, une résolution qui se rapproche de celle des cartes d'occupation du sol.

Dans un premier temps, on a simulé la réponse hydrologique de l'Oued Koriche lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001, en supposant que la totalité de sa surface était imperméable, puis on a simulé la réponse hydrologique pour deux situations temporellement séparées, l'une présentant l'état d'occupation du sol dans l'Oued Koriche en 1986 et l'autre en 2005. En effectuant une comparaison entre la réponse hydrologique théorique et les réponses de la situation de 1986 et celle de 2005, on a pu évaluer le poids de l'occupation du sol dans l'aggravation (ou pas) des dégâts observés en 2001, et comprendre ainsi comment les pratiques d'aménagement adoptées dans le bassin ont fait évoluer un aléa omniprésent.

Les simulations portent sur la partie qui se trouve en amont du quartier de Bab-el-Oued, ce dernier occupant l'extrême aval du bassin-versant de l'Oued Koriche. Ce choix se justifie par le fait que le quartier de Bab-el-Oued présente un tissu urbain très dense, doté d'une structure complexe et où les écoulements sont contrôlés par un nombre important de canaux et d'infrastructures linéaires. D'autres modèles, comme RUBAR (Paquier, 1998) ou TANATO (Bocher et Martin, 2009), seraient plus adaptés pour simuler la dynamique des écoulements dans ces contextes urbains mais ce n'est pas ici l'objectif de la recherche (Menad *et al.*, 2012). D'un autre côté, le problème des crues dans l'Oued Koriche doit être absolument géré en amont car la densité de la population relevée dans le quartier de Bab-el-Oued est l'une des plus élevées en Algérie (21 360 hab/km²). Ainsi, si les écoulements atteignent le quartier avec leur vitesse et les volumes cumulés tout le long du bassin, cela ne peut conduire qu'à une catastrophe de type 2001.

6.3.1. Pertinence et limites des paramètres implémentés dans l'automate cellulaire

Les pluies implémentées correspondent aux données du hyétogramme reconstitué défini par ISL-BRGM (2006), la méthode de reconstitution de ce hyétogramme est sujette à de nombreuses critiques (cf. chapitre 4). Dans notre simulation, la pluviométrie est considérée comme homogène à l'échelle du bassin-versant : ceci peut être également sujet à caution mais aucune autre solution n'a été envisageable en l'absence de données plus précises.

Des refus d'infiltration ont été préférés à des coefficients de ruissellement (pourcentages de production par rapport à la pluie brute) car ils attribuent un poids plus important aux états de surface, caractérisés par une rugosité et par un faciès, ainsi qu'aux taux de couverture végétale au moment de l'épisode pluvieux (Cerdan *et al.*, 2002 ; Souchère *et al.*, 2005). Ces données tiennent aussi compte de la diminution des capacités d'infiltration au cours du temps – deux types de coefficients ont d'ailleurs été utilisés afin de tenir compte des antécédents hydrométéorologiques – et traduisent mieux la dynamique du ruissellement hortonien, prédominant lorsque l'épisode pluviométrique présente une forte acuité à la fois dans l'espace et dans le temps (Mantilla *et al.*, 2006). Par opposition, les coefficients de ruissellement (valeurs moyennes) ont tendance à pondérer les réponses hydrologiques à l'échelle de l'événement (Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al.*, 2008). Au final, les refus d'infiltration retenus sont le fruit d'ajustements opérés à partir des valeurs régionales utilisées par l'ISL-BRGM (2006) pour des épisodes décennaux car l'utilisation des valeurs telles que définies par ces derniers aurait sous-estimé les réponses pour l'épisode de 2001 (tableau 6.4 ; Menad *et al.*, 2012).

Tableau 6.4. Valeurs des refus d'infiltration du sol intégrées dans les simulations.

Occupation du sol	Refus d'infiltration pour le soir du 9/10 (ISF/adaptation)	Refus d'infiltration pour le matin du 10/10 (ISF/adaptation)
Forêt (arbres)	40 mm/h	30 mm/h
Zone industrielle	10 mm/h	5 mm/h
Urbanisation dense	5 mm/h	0 mm/h
Urbanisation dispersée	10 mm/h	5 mm/h

Compte tenu des limites précédemment évoquées et en l'absence de résultats de référence sur lesquels nos valeurs auraient pu être validées, les valeurs de débit qui seront obtenues par la suite doivent être utilisées avec prudence, le but étant moins d'obtenir les débits et les volumes réellement observés que d'analyser l'impact de l'emprise urbaine sur le comportement hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche.

6.3.2. Simulation de la réponse hydrologique théorique

A ce niveau, on suppose que le bassin-versant de l'Oued Koriche est à 100 % ruisselant, donc que la totalité des eaux reçues par ce dernier est acheminée à l'exutoire. L'hydrogramme ainsi que la carte d'écoulement résultant de cette simulation sont présentés *in* fig. 6.31.

L'hydrogramme de la réponse hydrologique globale est formé de deux pics ($P1 = 77,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $P2 = 99,39 \text{ m}^3/\text{s}$) et un total de volume d'eau transité égal à $2,7 \text{ Mm}^3$. Le premier pic reflète la réponse du bassin face aux pluies reçues durant la nuit du 9-10 novembre. Il est provoqué par l'arrivée concomitante des écoulements provenant principalement du sous-bassin aval du Chemin du fort et des sous-bassins Frais Vallon et Sidi Medjber dont les exutoires se trouvent dans la partie moyenne du bassin. Les écoulements amont ne participent pas à la production de ce premier pic. C'est en répondant aux pluies plus intenses reçues dans la matinée du 10 novembre que le bassin enregistre son deuxième et plus fort pic (débit de pointe) ; ce dernier est plus élevé de près de 13 % que le premier. Le deuxième pic, tout comme le premier, est le résultat de l'arrivée concomitante des écoulements de l'aval et de la partie moyenne du bassin. Les premiers écoulements de l'amont arrivés à l'exutoire participent également dans l'augmentation de l'intensité du débit de pointe. Ainsi et comme on l'avait déjà constaté dans la partie 1 de ce chapitre, l'Oued Koriche, en raison de ses caractéristiques morphologiques, de la structure interne de son réseau d'écoulement et de son système de pentes efficace, favorise une réponse hydrologique de nature polygénique.

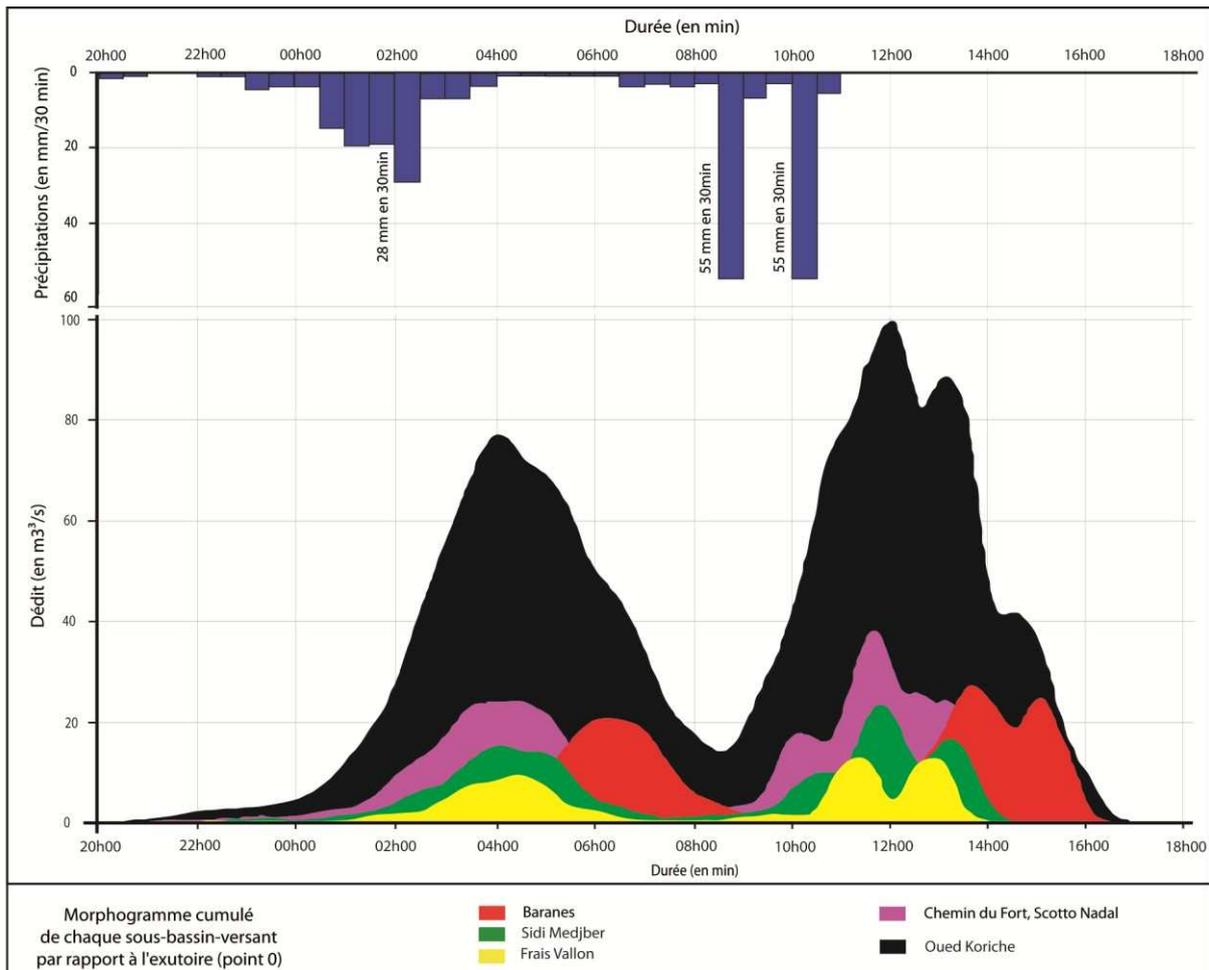


Fig. 6.31. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, en supposant que le bassin-versant de l'Oued Koriche est totalement imperméable.

6.3.3. Simulation de la dynamique des écoulements en intégrant l'occupation du sol de 1986

Pour simuler la réponse hydrologique de l'Oued Koriche conforme à une configuration antérieure à l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001, on a gardé le même MNT et les mêmes points de mesures utilisés précédemment mais on a intégré un nouveau paramètre de l'hydrosystème, à savoir la nature d'occupation du sol. La carte de l'occupation du sol correspondant à la situation de 1986 a été extraite des cartes d'occupation du sol du Massif de Bouzaréah produites dans le chapitre 2 (fig. 6.32). Pour chaque mode d'occupation du sol, on a attribué une valeur présentant son refus d'infiltration.

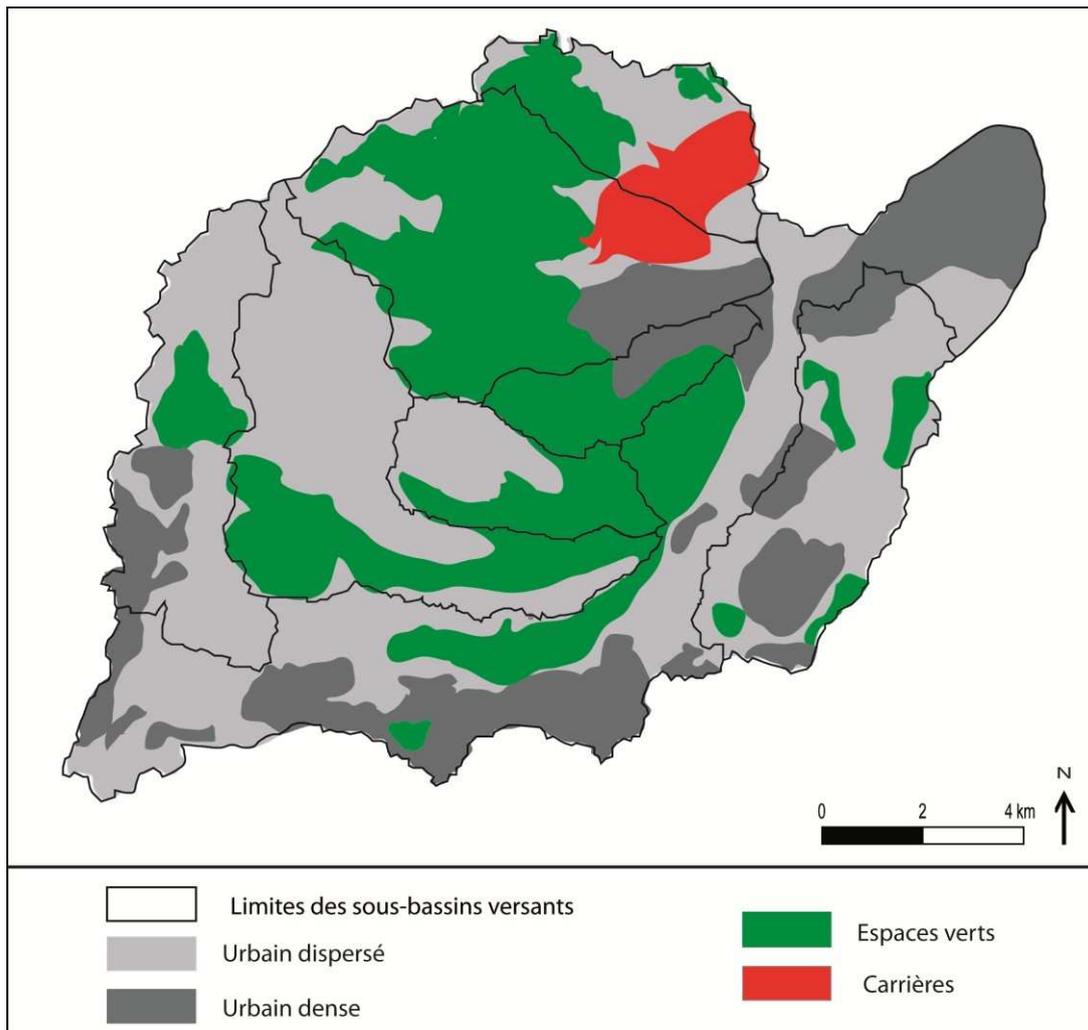


Fig. 6.32. Occupation du sol dans le bassin-versant de l'Oued Koriche en 1986.

Les résultats de la simulation effectuée avec les *inputs* citées ci-dessus sont présentés *in* fig. 6.33.

On constate en premier lieu que l'allure de la réponse hydrologique, simulée pour l'état d'occupation du sol en 1986, est assez comparable à la précédente (sol à 100 % imperméable). Néanmoins, on remarque que dans le cas où le sol est totalement imperméable, la courbe de la réponse est plus lissée ; de même, l'arrivée des écoulements des différents sous-bassins versants ne s'inscrit pas de manière évidente dans la courbe globale, ce qui nous laisse penser que l'imperméabilisation des sols dans l'Oued Koriche accroît le caractère polygénique de sa réponse hydrologique. Même si la concomitance de l'arrivée des écoulements soit légèrement moins nette que dans le premier cas, le pic de crue ($83,25 \text{ m}^3/\text{s}$) reste cependant engendré principalement par les mêmes sous-bassins versants impliqués dans la réponse simulée auparavant. La valeur du débit de pointe quant à elle a baissé de près de 16 % par rapport à celle simulée avec un état du sol à 100 % ruisselant. Une baisse est également enregistrée au niveau des volumes totaux cumulés à l'exutoire, qui atteignent ici seulement $1,8 \text{ Mm}^3$, soit une baisse de 35 %.

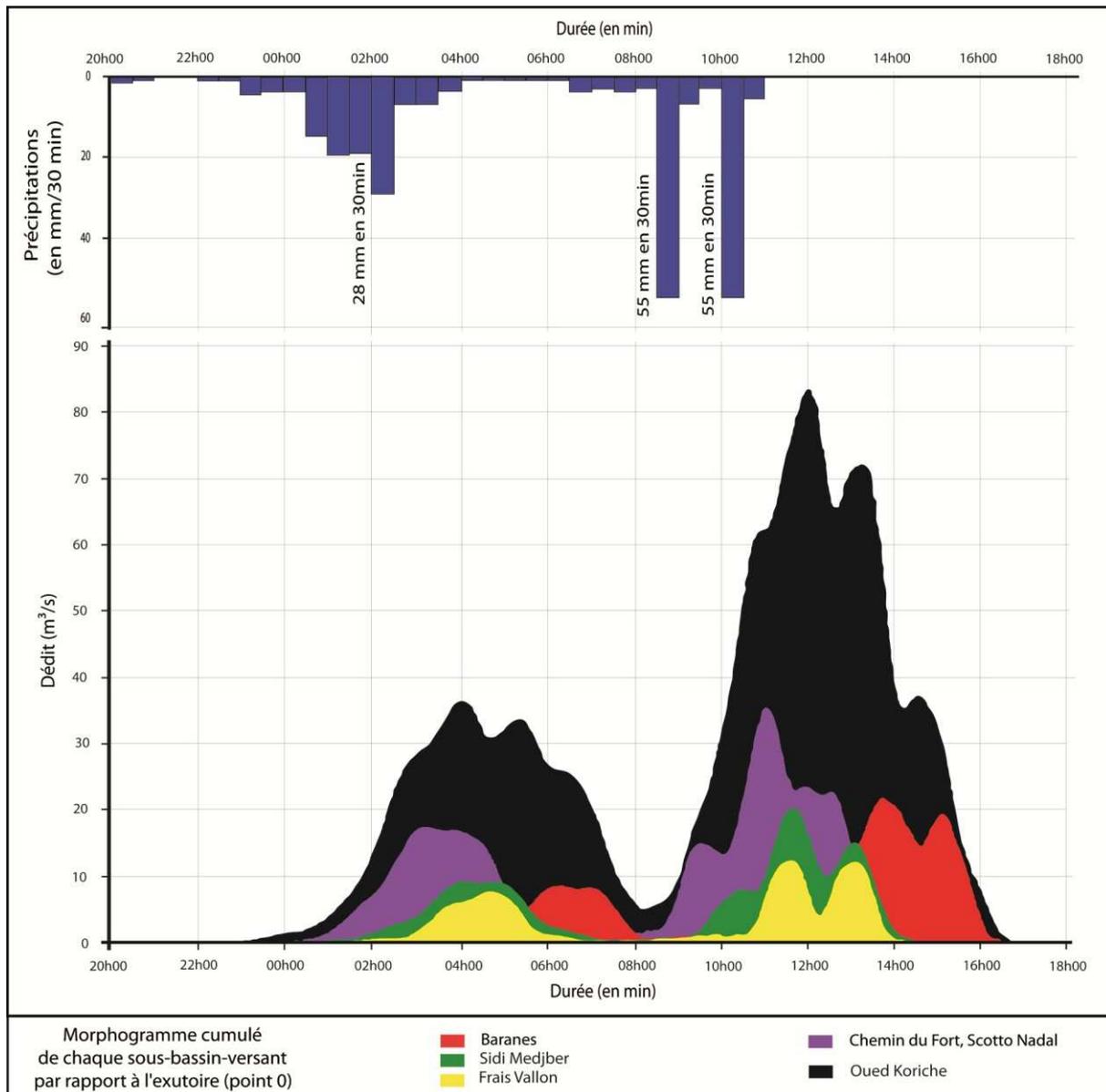


Fig. 6.33. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, avec un état d'occupation du sol correspondant à celui de 1986.

Si on compare uniquement les réponses simulées avec les pluies reçues la nuit des 9-10/11, on remarque que l'écart dans les débits induits est beaucoup plus important entre les deux configurations d'occupation du sol. Pour la situation en 1986, le pic était égal à $34,5 \text{ m}^3/\text{s}$, lors qu'on enregistre un pic de $77,5 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le cas où l'ensemble de la surface du bassin est imperméable, soit une différence de plus de 55 %. Ainsi, on en déduit que plus l'intensité des pluies augmente, plus le poids du facteur « imperméabilité des sols » exercé sur la réponse hydrologique diminue et les ruissellements hortonien sont favorisés.

6.6.4. Simulation de la réponse hydrologique en intégrant l'occupation du sol de 2005

La situation d'occupation du sol en 2005 a été reproduite en se servant des plans cadastraux réalisés à l'échelle du quartier : il s'agit de la plus fine information urbanistique exist-

tante et pour laquelle l'accès est gratuit pour les données sur le bassin-versant de l'Oued Koriche (fig. 6.34).

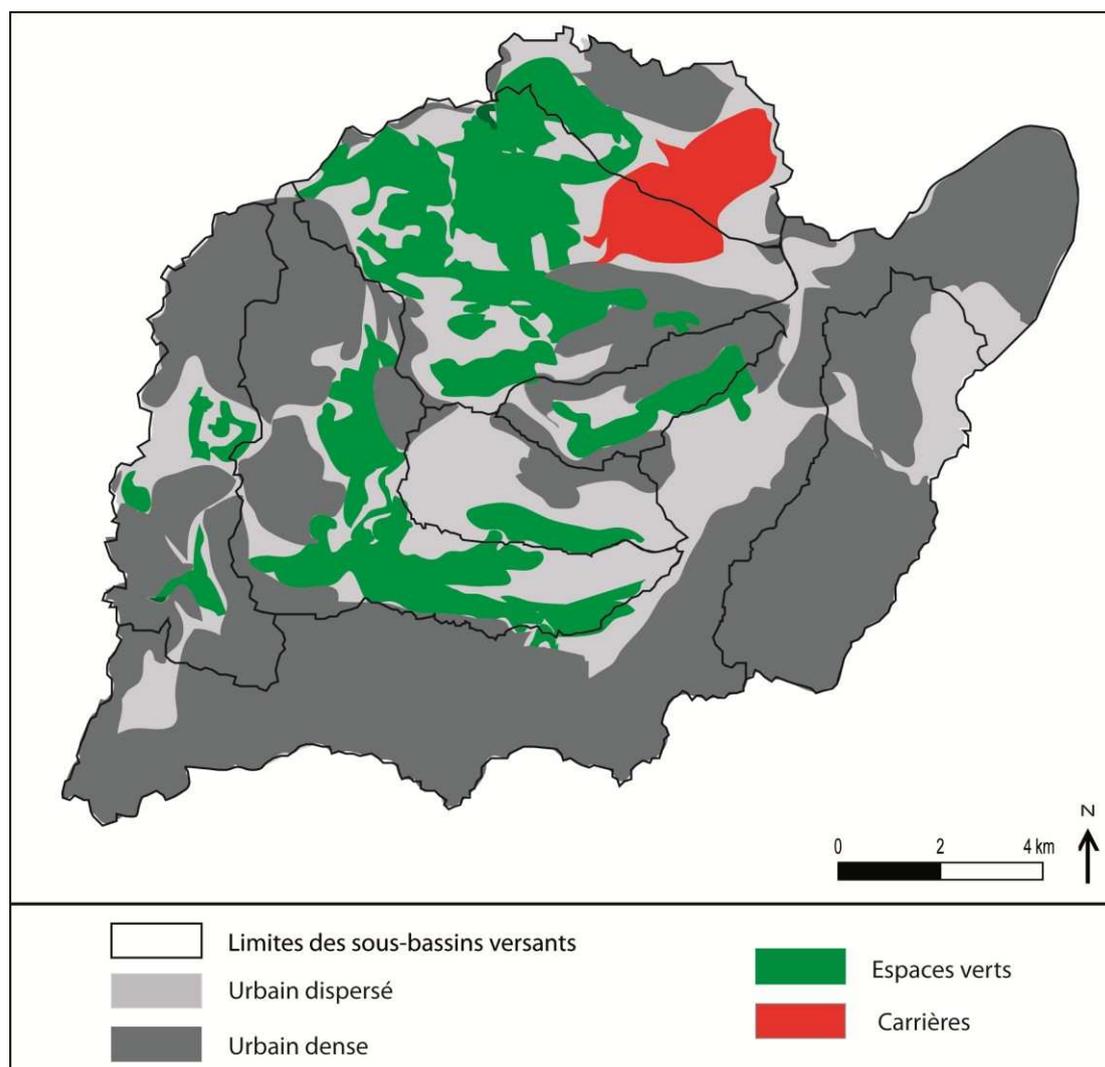


Fig. 6.34. Occupation du sol dans le bassin-versant de l'Oued Koriche en 2005.

Les cartes d'occupation du sol, réalisées dans le chapitre 2 et par lesquelles on a pu retracer l'évolution territoriale dans le bassin, sont également des documents fiables : on peut donc les utiliser pour pousser plus loin dans le temps l'évaluation des impacts de l'emprise urbaine sur la réponse hydrologique. On suppose que l'occupation du sol n'a pas évolué entre 2001 et 2005 de façon significative, à savoir capable d'avoir changé le comportement hydrologique du bassin-versant. Les résultats de cette simulation ont été comparés avec ceux produits dans d'autres travaux ayant analysés l'événement des 9-10 novembre 2001.

La simulation des écoulements de surface avec la situation de 2005 a été menée avec les mêmes paramètres (MNT, points de mesure, hyétogramme) que la simulation précédente (situation 1986). L'unique changement s'est fait au niveau du mode d'occupation du sol : celui de 1986 a été remplacé par la situation plus récente de 2005, permettant en fait d'évaluer l'impact de l'emprise urbaine sur l'évolution des phénomènes des crues dans le bassin de l'Oued Koriche. Les résultats de cette simulation sont présentés *in* fig. 6.35.

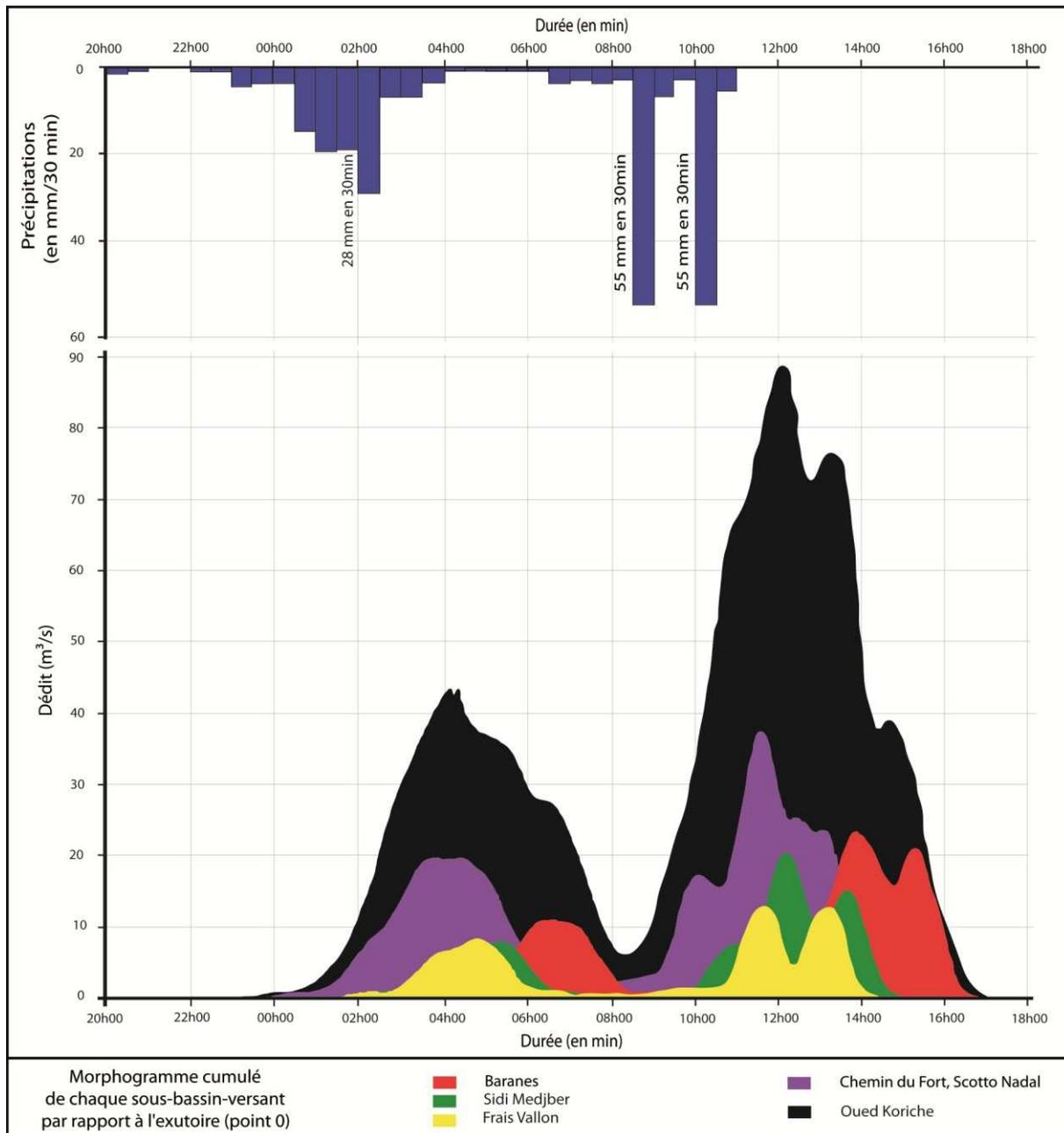


Fig. 6.35. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, avec un état d'occupation du sol correspondant à celui de 2005.

On enregistre un débit de pointe de près de $89 \text{ m}^3/\text{s}$, engendré par les mêmes sous-bassins versants qui ont marqué les réponses des deux premières situations. En comparaison avec la situation de 1986, on relève une augmentation de débit de pointe de 6 %. Ainsi, le débit de pointe enregistré en 2005 se rapproche plus de celui produit par une surface totalement imperméable ; la différence entre les deux débits ne dépasse pas 11 %. Les volumes cumulés ont également augmenté de 9 % par rapport à ceux estimés en 1986, cette augmentation étant due en grande partie à une réduction importante des zones boisées entre 1986 et 2005 (31 % en 1986 contre 19 % en 2005). Cependant, ces volumes restent moindres (-28 %) que les volumes engendrés par une surface ruisselante à 100 %. On remarque également que les allures des graphes obtenues pour la situation en 2005 sont assez comparables avec les précédentes, à l'exception que les courbes obtenues ici sont plus lisses que les courbes obtenues

avec la situation de 1986. Ainsi, on en déduit que le mécanisme d'évolution de l'occupation du sol observé entre 1986 et 2005 a favorisé le développement de réponses hydrologiques polygéniques.

Le pic de crue estimé en amont de Bab-el-Oued reste toutefois très inférieur à la valeur calculée dans des travaux antérieurs. Behlouli (2001) estime par exemple que le débit a été de $730 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau de la passerelle de Triolet alors que l'ISL-BRGM (2006) estime que le débit de pointe enregistré à cet endroit n'a été que de $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Les méthodes de calcul adoptées dans ces travaux ont suscité certaines critiques (cf. chapitre 4), et la grande marge entre les valeurs proposées ne peut que renforcer nos réserves : de fait, les débits de pointe calculés antérieurement à notre étude ne peuvent pas être pris comme des valeurs de référence. Toutefois, nous pensons que la valeur obtenue sous *RuiCells* est sous estimée du fait que nos simulations ne tiennent pas compte : 1) de l'influence des linéaires hydrauliques (qui existent en réalité car la voie rapide Chevalet-Triolley a accentué la vitesse de diffusion des flux vers le quartier de Bab-el-Oued ; 2) de la capacité de transport des écoulements puisque seul un volume d'eau liquide transite au cours de nos simulations (la charge solide, estimée à 30 % ici, peut considérablement augmenter la hauteur d'eau dans les sections mouillées et, en corollaire, exagérer les débits de pointe estimées à partir des laisses de crue) ; 4) des effets liés aux embâcles qui ont été observées à plusieurs reprises (Belhouli, 2011) ; 5) un autre point important, qui n'a pourtant jamais été pris en compte dans les travaux précédents, est celui lié aux rafales de vent accompagnant les événements météorologique cyclogéniques ; ces dernières ont entraîné les eaux marines au débouché des cours d'eau avec une grande vitesse, un phénomène qui a pu ralentir (voire stopper) l'évacuation des eaux au niveau de l'exutoire, formant ainsi une sorte d'obstacle provoquant une accumulation temporaire des eaux dans le quartier de Bab-el-Oued. Ce dernier point peut expliquer en partie les grandes hauteurs d'eau observées au niveau de Bab-el-Oued.

Conclusion

Le logiciel *RuiCells* est un outil d'un grand intérêt et qui a toute sa place dans la discipline hydrologique. Il nous a permis d'analyser et d'évaluer les processus hydrologiques en tenant compte de leur complexité systémique. Dans cette partie et grâce à *RuiCells*, on a pu évaluer l'efficacité du système morphologique dans la réponse hydrologique en tout point du Massif de Bouzaréah. On a également pu quantifier l'impact de l'emprise urbaine sur la réponse hydrologique. Cependant, certains aspects du logiciel *RuiCells* doivent être développés d'avantage afin de le rendre encore plus performant. L'un de ces aspects est sa sensibilité à la nature du MNT implémenté, dont il faut développer les fonctions d'évolution qui contrôlent cette sensibilité, et grâce à ces fonctions on peut comparer les différents bassins versants analysés dans les différentes études en utilisant des MNT de natures distinctes. Un deuxième aspect qui mérite d'être développé d'avantage est lié aux paramètres IE et IEP. Ces derniers ont un grand intérêt car ils permettent d'évaluer l'efficacité structurelle du réseau de drainage ainsi que l'efficacité du système de pentes en tout point du bassin-versant. Tous les deux sont calculés en rapportant le Q_{\max} (Sufaçogramme ou morphogramme) au diamètre moyen du bassin : le fait que le diamètre moyen du bassin soit calculé par la racine carrée de sa surface

peut poser problème. En effet, en tenant compte de l'irrégularité de forme que présente un grand nombre de bassins versants, le fait d'intégrer le diamètre « moyen » d'une géométrie irrégulière à travers la racine carrée de sa surface est une simplification abusive de la réalité mathématique. Par rapport à ce dernier point, il sera très intéressant de créer différentes classes, chaque classe regroupant des bassins versants de forme proche (une classe regroupe les bassins dotés d'une forme assimilée à une « poire », une autre regroupe des bassins de forme assimilée à un « cercle », ainsi de suite), et établir pour chacune de ces classes l'équation mathématique la plus adéquate pour calculer le diamètre moyen du bassin-versant auquel elle appartient.

L'hydrologie du Massif de Bouzaréah a été analysée en deux temps, ce que nous allons brièvement rappeler ci-dessous.

Dans un premier temps, nous avons analysé, évalué et cartographié l'efficacité du système morphologique dans la réponse hydrologique des trois principaux bassins versants du Massif de Bouzaréah. Cette efficacité morphologique a été étudiée en tout point de l'espace à travers une mise en jeu progressive des différents paramètres de l'hydrosystème (forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement, système de pentes). Grâce à cette analyse, on a pu relever un niveau d'aléa hydrologique remarquablement élevé à différentes échelles spatiales du bassin-versant de l'Oued Koriche. Si ce dernier est frappé par un événement météorologique intense, il faut s'attendre au développement de crues rapides en différents sites du bassin. Cependant, sa partie aval reste particulièrement concernée et c'est en cet endroit que les ondes de crue se rejoignent et que le caractère polygénique de la réponse hydrologique s'exprime fortement. L'ensemble des simulations effectuées ci-dessus met en évidence la complexité des mécanismes de la genèse et du développement de la crue au sein du bassin-versant de l'Oued Koriche. Le bassin-versant de Beni Messous présente un comportement hydrologique beaucoup moins complexe que le premier. En réalité, il est formé d'une partie amont réactive, à l'origine de la réactivité observée à l'exutoire ; le problème des crues peut être géré en amont, ce qui mettrait à l'abri le reste du bassin-versant. Le risque de développer des crues rapides dans les bassins versants côtiers est négligeable, du fait de leur petite taille. Mais en cas d'événement cyclogénique, ils seront exposés à un autre risque lié aux rafales de vent qui gêneront la bonne évacuation des eaux aux exutoires. En regagnant la mer, les eaux emportent tout ce qu'elles trouvent sur leur chemin. Ce phénomène a été observé lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 : il a été la cause de la perte de nombreuses vies humaines et engendré de substantiels dégâts matériels.

Dans un deuxième temps, on a mesuré l'impact de l'emprise urbaine sur le développement spatio-temporel de la réponse hydrologique. Pour plusieurs raisons (cf. *supra*), cet impact n'a pu être pleinement évalué qu'au niveau de l'Oued Koriche. L'emprise urbaine a joué un rôle important lors des inondations de Bab-el-Oued des 9-10 novembre 2001. Avec 78 % de sa surface occupée par du bâti (cf. chapitre 3), ce bassin présente une forte prédisposition aux ruissellements. Ces espaces urbanisés n'ont pas cessé de s'accroître depuis les deux dernières décennies (plus de 13 %) et en utilisant un épisode de pluie identique, on se rend bien compte que les débits de pointe et les volumes ruisselés auraient été moins importants pour une occupation du sol moins dense. Néanmoins, la croissance des espaces urbanisés n'est pas proportionnelle à celle de la réponse hydrologique et, en particulier, de son débit de pointe

(croissance de débit de pointe de 6 % vs. croissance de 13 % de zones urbanisées). Ce constat peut être expliqué par le fait que le caractère intense des pluies a tendance à rendre les surfaces rapidement ruisselantes, minimisant ainsi le rôle aggravant joué par l'emprise urbaine. Par la suite, la magnitude même de l'aléa trouve une explication dans la distribution des pluies dans le temps : les deux pics d'intensité des pluies enregistrées dans la matinée du 10/11 ont entraîné des réponses concomitantes des sous-bassins situés en amont et en aval de l'oued Koriche, forçant ainsi son caractère polygénique. On déduit alors que les variables environnementales (météorologie, physiographie, géomorphologie et formations superficielles, nature de l'occupation du sol) ne peuvent être considérées séparément.

Cependant, les valeurs de débit de pointe obtenues grâce à nos calculs, même si elles sont à prendre avec précaution ; cf. *supra*) ne reflètent pas la grandeur des dégâts observés le jour de l'événement des 9-10 novembre 2001. Il est donc indispensable de pousser plus loin l'analyse et aller chercher des réponses au niveau des autres facteurs qui ne sont pas pris en compte dans cette simulation, tels la structure hydrologique (structure du réseau, structure et localisation spatiale des ouvrages hydrauliques, niveau d'entretien), les effets indirects de l'extension urbaine (forte densité de la population et développement des habitations illicites augmentant la vulnérabilité ; saturation des réseaux d'évacuation mixtes ; réseaux routiers qui facilitent et accélèrent l'arrivée des flux vers l'aval) ainsi que d'autres facteurs pouvant accroître le risque de crue dans cette région. Pour cerner tous ces facteurs et mieux comprendre pourquoi l'événement de 2001 a occasionné tant de dommages dans l'Oued Koriche, le prochain chapitre sera consacré à une étude systémique qui nous permettra de mettre en évidence les facteurs prédisposants, déclenchants et aggravants à l'origine du risque de crue dans ce bassin.

Chapitre 7

Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : pourquoi un niveau de risque aussi élevé ?

Introduction

- 7.1. Facteurs de prédisposition
- 7.2. Facteurs de déclenchement
- 7.3. Facteurs d'aggravation

Conclusion

Introduction

Après avoir réalisé une première évaluation du niveau de risque hydrométéorologique dans l'Oued Koriche, dont découle l'estimation de l'ampleur des dégâts observés les 9-10 novembre 2001, qui ne s'explique pas en totalité par la magnitude de l'événement météorologique ni par les caractéristiques physiographiques du bassin-versant, ni enfin pleinement à travers l'imperméabilisation du sol liée à l'extension urbaine qui a connu ce dernier. Il est donc nécessaire de chercher des explications en dehors des éléments pris en compte auparavant. En ayant recours à l'analyse systémique (Arnaud-Fassetta et Fort, 2008 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2009 ; Douvinet et Delahaye, 2010), il a été possible d'identifier et de hiérarchiser les variables (*i.e.*, facteurs prédisposants, déclenchants et aggravants), naturelles ou anthropiques, qui permettent d'expliquer l'ampleur des dégâts observés lors de l'événement des 9-10 novembre 2001.

7.1. Facteurs de prédisposition

Le bassin-versant de l'Oued Koriche, compte tenu de ses caractéristiques morphostructurales et météorologiques, présente une prédisposition naturelle à développer des phénomènes de ruissellement superficiel et de crue rapide.

7.1.1. Géologie et formations superficielles

Le bassin-versant de l'Oued Koriche est caractérisé par la présence de terrains métamorphiques relativement imperméables (micaschistes et calcaires métamorphiques), favorisant ainsi une réponse hydrologique de type hortonien (Benseddik et Djabri, 2003). En surface, le bassin-versant de l'Oued Koriche est formé de schistes altérés et d'autres formes d'érosion actives (mouvement de masse, érosion hydrique, érosion torrentielle) qui font de lui un lieu favorable à la formation des écoulements très chargés en matières solides ; ces derniers peuvent dans certains cas extrêmes se transformer en coulées boueuses (cf. 4.2.2).

7.1.2. Physiographie et réseau hydrographique

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin-versant jouent un rôle déterminant dans son comportement hydrologique.

1. *Forme* : le bassin-versant de l'Oued Koriche a une forme trapue ($KG = 1,87$; $klemniscate = 3$), favorisant l'arrivée concomitante d'écoulements provenant des différents sous-bassins versant jusqu'à l'exutoire final, ce qui donne un caractère polygénique à la réponse hydrologique. Les cellules équidistantes responsables du pic de la réponse hydrologique se localisent principalement dans la partie aval du bassin-versant ; elles prennent spatialement la forme d'un « chou-fleur » qui renseigne sur la présence d'un réseau structuré efficace par rapport à la forme du bassin-versant dans lequel il s'insère.

2. *Réseau hydrographique* : le bassin-versant de l'Oued Koriche présente un réseau hydrographique dendritique connu par sa capacité à transmettre rapidement les crues vers l'aval.

Le réseau est dense, formé de 55 segments dont 39 appartiennent à l'ordre 2 ; ces segments élémentaires ont un régime torrentiel, en particulier dans la partie aval et en amont au niveau de la confluence des segments d'ordre 3 à 4 (les segments d'ordre 3 sont deux fois plus longs que les segments d'ordre 4). Le calcul des indices d'efficacité structurelle vient corroborer ce constat : $IE = 45$ dans le sous-bassin-versant de Baranes situé en amont, $IE = 41$ au niveau du sous-bassin-versant du Chemin du Fort en aval et $IE_{\max} = 52$ à l'exutoire. Le réseau hydrographique du bassin-versant de l'Oued Koriche favorise ainsi le développement de réponses hydrologiques à caractère torrentiel lors d'épisodes pluvieux de forte intensité.

3. *Système de pentes* : il est doté de pentes parfois très raides (maximum : 42°). La courbe hypsométrique présente une répartition déséquilibrée : 60 % de la surface du bassin-versant présentent des altitudes supérieures à la moyenne. Le système de pentes peut être qualifié d'efficace à l'échelle globale comme à l'échelle locale ($IEP_{\max} = 32$; cf. 6.18). Ainsi, le système de pentes favorise le développement des crues et des ruissellements superficiels rapides en différents points du bassin-versant de l'Oued Koriche et force le caractère polygénique de la réponse hydrologique.

On déduit donc que plus l'intensité de l'événement météorologique reçu par le système morphologique (forme, structure du réseau de drainage, système de pente combinés ; cf. *supra*) du bassin-versant de l'Oued Koriche est élevé, plus les réponses hydrologiques de type hortonien sont favorisées et le caractère polygénique de la réponse hydrologique plus prononcé, rendant ainsi la réponse hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche plus rapide et violente.

7.1.3. Climat

D'un point de vue climatique, la région d'Alger est soumise à un climat de type méditerranéen, caractérisé par ses événements météorologiques intenses (cyclogenèse, système perturbé provenant de l'Atlantique Nord, systèmes convectifs de méso-échelle et orages orographiques ; cf. 4.1.2.2.). Sur un siècle d'enregistrement à la station de Bouzaréah (1908-2007), on a pu dénombrer 23 événements à caractère intense (80 mm/24 h ; fig. 4.15). Les reliefs bordant le bassin méditerranéen présentent également un facteur amplificateur des instabilités en forçant, par ascendance orographique, les masses d'air provenant de la Méditerranée. Ainsi, le bassin-versant de l'Oued Koriche se développe sous un climat où les événements météorologiques à caractère remarquable sont fréquents et omniprésents.

7.2. Facteurs de déclenchement

La catastrophe observée le 10 novembre dans le bassin-versant de l'Oued Koriche a été déclenché en premier lieu par une configuration synoptique arrivée le 9 novembre 2001, restant stationnaire sur l'Ouest algérien (l'événement est décrit en détail dans la partie 5.1.1 du chapitre 5). D'un point de vue des cumuls pluviométriques, l'événement des 9-10 novembre 2001 est resté le plus important, sur une série d'observation de plus de 100 ans. Néanmoins, en absence de données sur la répartition spatio-temporelle des événements du passé, l'intensité de l'événement (*i.e.*, répartition du cumul pluviométrique enregistré à des laps de

temps plus au moins fins), donc les deux pics de 50 mm/30 min observés le jour de l'événement, ne peuvent être qualifiés par apport aux événements du passé.

7.3. Facteurs d'aggravation

Ils se résument principalement aux facteurs anthropiques. L'anthropisation du bassin-versant de l'Oued Koriche a aggravé les risques hydrométéorologiques non seulement directement eu égard à la forte intensité de la population installée en cet endroit (vulnérabilité plus forte) mais aussi indirectement à travers les aménagements réalisés dans le bassin-versant, conduisant *in fine* au dysfonctionnement de son système morphologique.

7.3.1. Artificialisation du réseau hydrographique

Depuis 1874, le réseau hydrographique du bassin-versant de l'Oued Koriche a subi de gros travaux d'artificialisation. Aujourd'hui, seule une infime partie de ce réseau se trouve plus au moins à l'état naturel (fig. 7.1). Le reste est remplacé par des canaux (souterrain et/ou à ciel ouvert) de structure homogène et uniforme, à tracé direct, soumis en totalité à un fonctionnement gravitaire. L'artificialisation du réseau hydrographique et sa déconnexion avec son environnement naturel (zone d'expansion des crues) a provoqué un double risque au niveau de l'Oued Koriche. Le premier est lié à la structure et au mode de fonctionnement du réseau d'assainissement mis en place (cf. *supra*), qui accélèrent la formation des crues ainsi que leur transfert vers l'aval et augmentent énormément le débit de pointe, rendant ainsi le bassin-versant vulnérable à des événements météorologiques jugés autrefois comme courants (augmentation du niveau de risque). Le deuxième impact de l'artificialisation du réseau hydrographique est lié à la large extension urbaine que connaît le bassin-versant de l'Oued Koriche, dont plus de 40 % de la superficie totale sont urbanisés. L'abstraction de l'eau du paysage de la ville engendre, chez les citoyens comme chez les responsables des collectivités locales, l'oubli et l'inconscience de sa présence, ce qui les incite à occuper des espaces fortement vulnérables, tels que les zones d'expansion naturelle des crues, le lit moyen voire même le lit mineur ainsi que l'exutoire du bassin-versant.

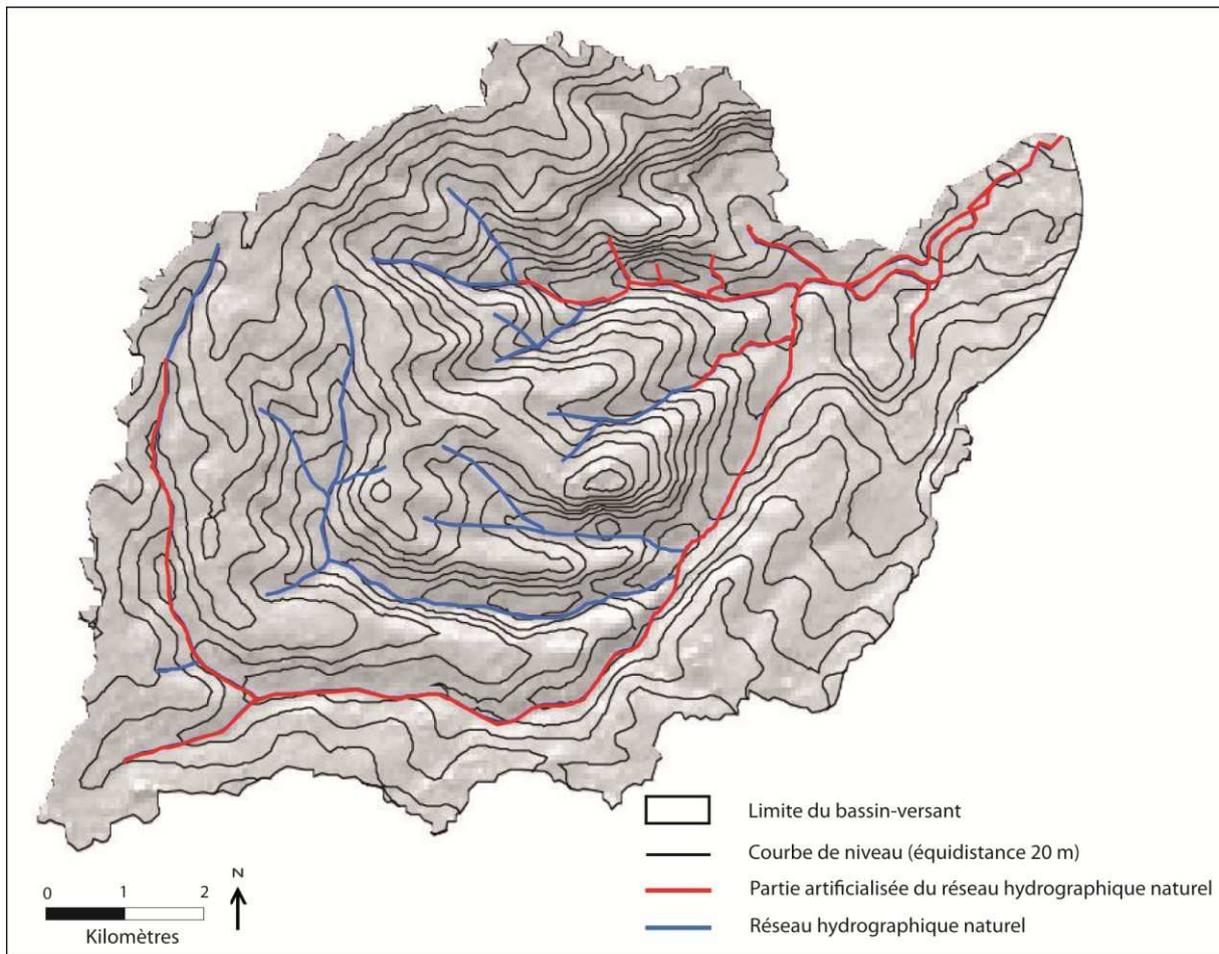


Fig. 7.1. Etat actuel du réseau hydrographique.

7.3.2. Système de récupération et d'évacuation des eaux pluviales : collecteur de l'Oued M'Kacel

Actuellement, la totalité des eaux pluviales drainées par le bassin-versant de l'Oued Koriche est censée être évacuée par le collecteur Oued M'Kacel, collecteur mixte qui assure à la fois l'évacuation des eaux usées et les eaux pluviales. Dans un futur proche (fin 2012), un nouveau réseau hydraulique dédié uniquement à l'évacuation des eaux pluviales verra le jour.

Les premières artificialisations du réseau hydrographique dans l'Oued Koriche ont eu lieu en 1874, dans la partie canalisée reliant le trou Bonnifay à la mer. Actuellement, le collecteur de l'Oued M'Kacel est formé par un tronçon principal d'une forme ovoïdale mesurant 12-18 cm de diamètre en amont (tête d'ouvrage) et 43,5-45 cm en aval ; de nombreux changements de sections sont présents entre l'amont et l'aval, impliquant un changement dans la capacité d'évacuation (les caractéristiques détaillées des différents tronçons ainsi que les débits correspondants sont donnés en annexe 7.1). Les changements de section croissent vers l'aval mais pas forcément proportionnellement à la croissance de la surface drainée. Par exemple, entre l'amont et la confluence des deux sous-bassins versants de Sidi Medjber et Frais Vallon, la section du collecteur ne change pas alors que la section drainée passe de près de 200 ha à 360 ha : c'est à cette confluence que le collecteur de l'Oued M'Kacel s'est effondré lors de la crue du 10 novembre 2001. Le tronçon principal est connecté à plusieurs autres

tronçons secondaires qui assurent la collecte des eaux des affluents de l'Oued Koriche et celle des eaux usées domestiques. La connexion entre les différents éléments du réseau hydrographique (oued naturel, canal et collecteur) est assurée par sept ouvrages hydrauliques (fig. 7.2).

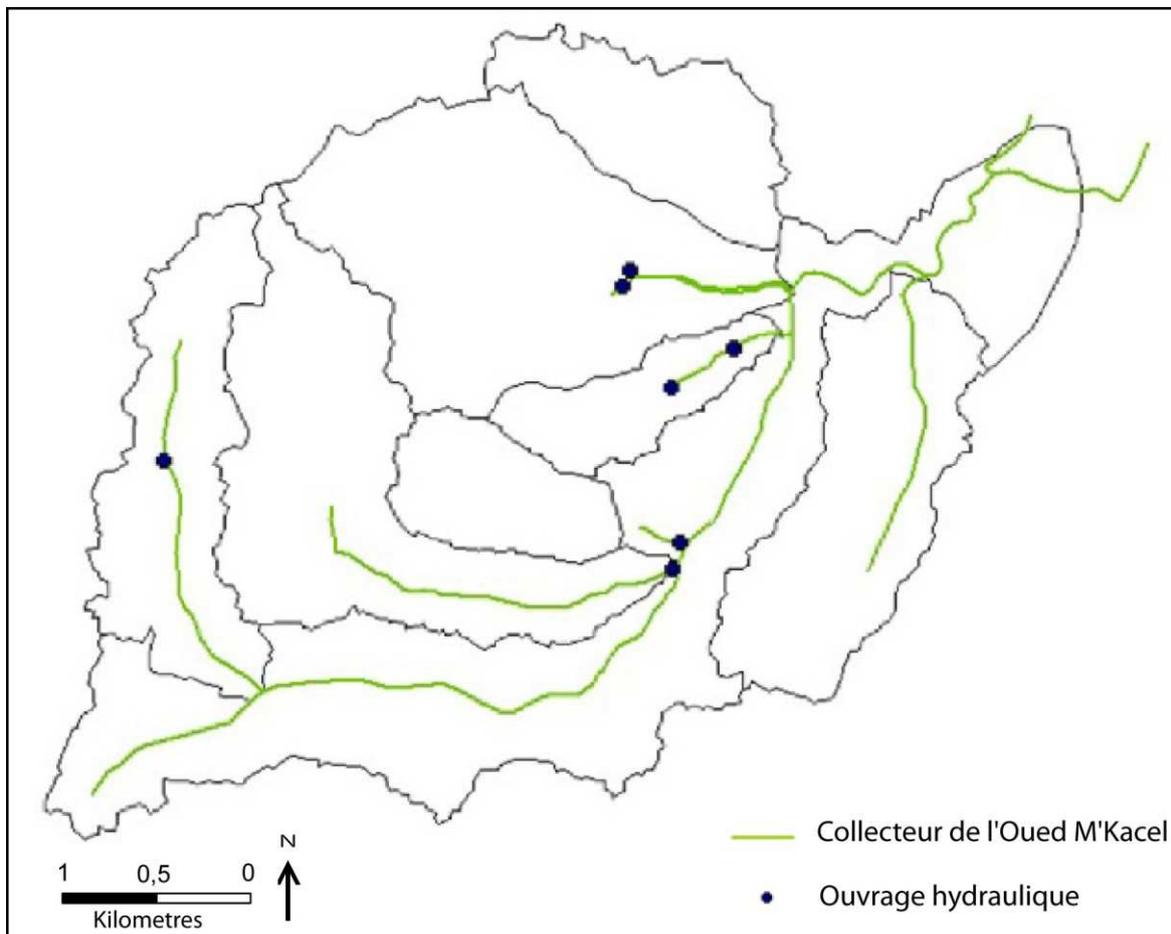


Fig. 7.2. Collecteur de l'Oued M'Kacel et l'emplacement des ouvrages de raccordement.

7.3.2.1.1. Les ouvrages hydrauliques du collecteur Oued M'Kacel

Les ouvrages qui assurent la connexion entre les lits des oueds naturels et le collecteur ou encore entre ce dernier et les canaux à ciel ouvert, s'organisent de l'amont vers l'aval du bassin-versant de l'Oued Koriche comme suit :

A. Ouvrage hydraulique de réception de Baranes

Administrativement, l'ouvrage est sur le territoire de la commune de Bouzaréah. Il se trouve à 280 m d'altitude et est destiné à canaliser l'oued principal du sous-bassin-versant de Baranes. Il mesure 2 m de hauteur, est doté d'une buse de 125 cm de diamètre. La capacité maximale théorique de l'ouvrage est estimée à $10 \text{ m}^3/\text{s}$, tout comme le débit maximal que le collecteur ovoïdal peut évacuer (fig. 7.3).



Fig. 7.3. Etat de l'ouvrage Baranes.

Selon les observations faites sur le terrain, un canal à ciel ouvert de 1 m de hauteur et de près de 2 m de largeur assure la transition entre l'ouvrage hydraulique de réception et le lit mineur de l'oued naturel. Ce canal est encombré de toutes sortes de déchets (bouteilles et poches plastiques, cartons, branches et troncs d'arbres, végétation herbacée ; fig. 7.3). Le long du canal à ciel ouvert, quatre grillages sont installés à l'horizontale. Ces grillages sont séparés d'une distance d'environ 25 m (fig. 7.4) et leur rôle principal est d'empêcher les déchets d'entrer dans l'ouvrage hydraulique.



Fig. 7.4. Canal à ciel ouvert situé en amont de l'ouvrage hydraulique de réception.

B. Ouvrage hydraulique de réception de Sidi Medjber

L'ouvrage Sidi Medjber se trouve également sur la commune de Bouzaréah. Il appartient au sous-bassin-versant de Sidi Medjber à une altitude de 121 m. Il mesure 7 m de hau-

teur et est pourvu d'un collecteur ovoïdal de 15 m. L'ouvrage peut drainer théoriquement un débit maximal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ mais en réalité, il ne draine que $17 \text{ m}^3/\text{s}$, une valeur correspondant à la capacité maximale de son collecteur ovoïdal (fig. 7.5).



Fig. 7.5. Sidi Medjber : (A) Ouvrage de réception ; (B) Canal à ciel ouvert.

Selon les observations faites sur le terrain, le canal à ciel ouvert, qui assure la connexion entre l'ouvrage hydraulique et le lit de l'oued naturel, mesure 1,5 m de hauteur et près de 6 m de largeur. Actuellement, le canal est encombré avec de nombreux déchets (bouteilles et poches en plastique, branches et troncs d'arbres, végétation, rejets alimentaires, épave de voiture !!...) et est envahi en grande partie par de la végétation (herbacée et ligneuse) qui s'est installée au-dessus du canal (fig. 7.5).

Selon les habitants du quartier, en comparant la profondeur du canal actuel avec celle du lit de l'oued naturel, cette dernière était beaucoup plus profonde. Ils confirment également que le canal déborde à plusieurs reprises dans la même année (en particulier en automne et en hiver). Selon les constats faits sur le terrain et le témoignage des personnes interrogées, une quantité d'eau importante ruisselle sur la route principale qui longe le quartier résidentiel : les eaux se concentrent ainsi de l'amont vers l'aval jusqu'à atteindre des vitesses importantes (un enfant ne peut pas traverser), ne pouvant ainsi rejoindre le canal à ciel ouvert et, par la suite, ne pouvant pas être évacuées par l'ouvrage hydraulique de réception de Sidi Medjber. L'ensemble des eaux ruisselantes rejoint la voie rapide Chevaly-Triolet et participe directement à la formation du débit de pointe à l'exutoire du bassin.

C. Ouvrage hydraulique de réception de Frais Vallon

Cet ouvrage appartient à la commune de Bouzaréah. Il se trouve à 128 m d'altitude, dans le sous-bassin-versant de Frais Vallon. Il mesure 6,5 m de hauteur et est pourvu d'un

collecteur circulaire d'1 m de diamètre capable de drainer un débit maximal de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 7.6).



Fig. 7.6. Ouvrage hydraulique de réception de Frais Vallon

A proximité de l'ouvrage hydraulique, on trouve différents types de rejets (bouteilles et poches en plastique, cartons, branches et troncs d'arbres...) ; on trouve également de la végétation qui commence à envahir le lit de l'oued. A côté de cet ouvrage s'est installé un chantier dans le cadre du projet de dédoublement du réseau d'assainissement. Et sans aucune précaution, les rejets de ce chantier (sol, béton, barre de fer...) sont placés juste à côté de l'ouvrage hydraulique de réception. En période automnale, une telle pratique peut entraîner de graves dysfonctionnements au niveau de l'ouvrage. Vu la proximité des différents déchets (rejets de chantier et ménagers ; fig. 7.7), un événement pluvial d'intensité moyenne est suffisant pour former des embâcles au niveau des grillages qui protègent l'ouvrage hydraulique de l'extérieur, bloquant ainsi la transition des eaux de pluies vers le réseau d'évacuation. Ce qui est étonnant, c'est que les responsables du chantier sont des ingénieurs du génie civil et en hydrologie, pratiquant cela en toute conscience du risque généré. Et pour faire face à ce risque, ils ont couvert les grillages qui entourent l'ouvrage (sauf la façade qui donne sur le lit) par des plaques métalliques dans le but d'empêcher les rejets de rejoindre l'ouvrage. Cependant, cette pratique augmente le risque de formation d'embâcles. On se rendant sur le terrain après l'épisode pluvieux de 13/10/2010, on a constaté que les remblais de terre déposés en amont de l'ouvrage ont glissé pour rejoindre ce dernier.

D. Ouvrage hydraulique de réception de Scotto Nadal

L'ouvrage appartient à la commune de l'Oued Koriche. D'un point de vue hydrographique, l'ouvrage draine l'oued principal du sous-bassin-versant de Scotto Nadal. Il mesure 6,5 m de hauteur, est pourvu d'un collecteur circulaire de 1,5 m de diamètre et sa capacité maximale théorique de drainage est estimée à $25 \text{ m}^3/\text{s}$ mais du fait que la capacité d'évacuation de l'ouvrage elle-même ne dépasse pas $12 \text{ m}^3/\text{s}$, la capacité maximale du collecteur ne peut pas être atteinte (fig. 7.7).



Fig. 7.7. Ouvrage hydraulique de réception de Scotto Nadal.

L'ouvrage Scotto Nadale se trouve au cœur d'un quartier résidentiel, ce qui limite les pratiques de rejets des ordures, laissant ainsi cet ouvrage dans un état relativement propre par rapport aux autres ouvrages évoqués ci-dessus.

E. Ouvrage hydraulique de réception de Jaubert

Administrativement, l'ouvrage est sur la commune de l'Oued Koriche. D'un point de vue hydrographique, il se situe dans le sous-bassin-versant du Chemin du Fort. L'ouvrage est doté d'une buse de 1,5 m de diamètre. En réalité cet ouvrage, et comme son nom l'indique, il ne reçoit pas les eaux du Chemin du Fort mais est destiné à évacuer les eaux du sous-bassin-versant Jaubert. Afin d'élargir l'exploitation de la carrière Jaubert, l'oued principal qui draine le sous-bassin Jaubert a été détourné et verse actuellement ses eaux au niveau du sous-bassin du Chemin du Fort (fig. 7.8). Après les crues de 2001 et par le biais d'un canal souterrain, l'ouvrage reçoit également les eaux pluviales drainées par la partie nord-est du Chemin du Fort.

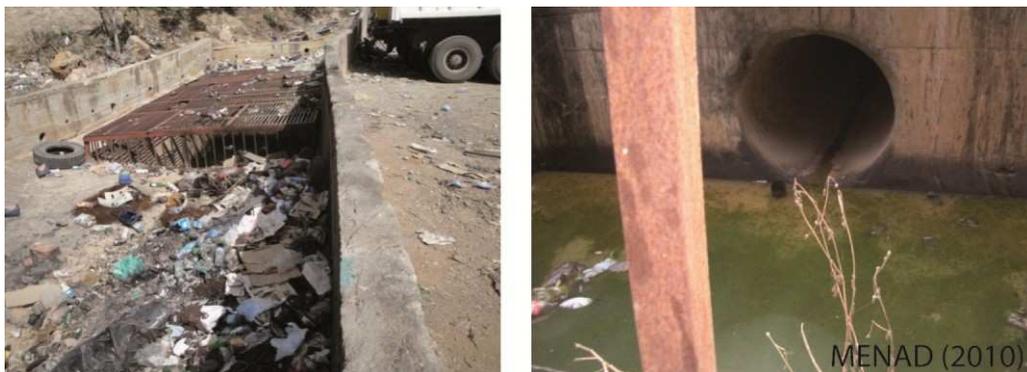


Fig. 7.8. Ouvrage hydraulique de réception Jaubert.

Selon les observations faites sur le terrain, un canal à ciel ouvert assure la transition entre l'ouvrage hydraulique et le lit de l'oued naturel. Le canal mesure 1,5 m de hauteur et près de 2 m de largeur. Actuellement, il est encombré par de nombreux déchets (bouteilles et poches plastiques, branches et troncs d'arbres, pneus de voitures...) et est envahi en certains endroits par de la végétation (fig. 7.9).



Fig. 7.9. Canal à ciel ouvert connecté en amont à l'ouvrage de réception Jaubert.

En aval de l'ouvrage hydraulique, un collecteur à ciel ouvert de 1,5 m de largeur et près de 500 m de longueur est installé le long de la route qui longe le quartier et qui rejoint la voie rapide Chevalet-Triolet à l'exutoire du sous-bassin-versant du Chemin du For (fig. 7.10). En certains endroits de l'ouvrage, de nombreux déchets s'accumulent et forment des embâcles, rendant le canal partiellement voire totalement dysfonctionnel.

A. Ouvrage hydraulique de réception de Chemin du Fort

L'ouvrage appartient administrativement à la commune de l'Oued Koriche mais d'un point de vue hydrographique, il se trouve dans le sous-bassin-versant du Chemin du Fort. Il mesure 6,5 m de hauteur et est constitué de trois collecteurs circulaires de 1,5 m de diamètre. Il assure la connexion entre l'oued naturel et le collecteur de l'Oued M'Kacel. Juste avant ce point de connexion, un système en escalier a été mis en place afin de casser la grande vitesse (due aux fortes pentes) avec laquelle l'eau arrive à l'ouvrage. Il a une capacité théorique maximale de drainage égale à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ mais la capacité de son ovoïde a été estimée uniquement à $16 \text{ m}^3/\text{s}$: cela veut dire qu'en pratique, c'est uniquement un débit de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ qui peut rejoindre le réseau souterrain. Après l'événement des 9-10 novembre 2001, l'ovoïde de 1,5 m a été dédoublé par un autre de 2 m de diamètre. Actuellement, le collecteur est doté d'une capacité maximale théorique d'évacuation de l'ordre de $55 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 7.11). Cette valeur de débit reste très théorique : en réalité, la connexion entre l'ancien tronçon et le nouveau se fait d'une manière brutale, formant ainsi une singularité hydraulique importante qui provoque une perte de charge à cet endroit, donc une diminution de débit maximal. On n'a pas pu obtenir d'informations précises sur la structure de ce nœud de connexion, la perte de charge exacte occasionnée par ce dernier restant inconnue et toute valeur avancée ne pouvant être qu'approximative.



Fig. 7.10. Collecteur à ciel ouvert. A : en aval de l'ouvrage Jaubert ; B : le long de la route qui traverse le quartier ; C : Encombres et embâcles formés par différents matériaux.

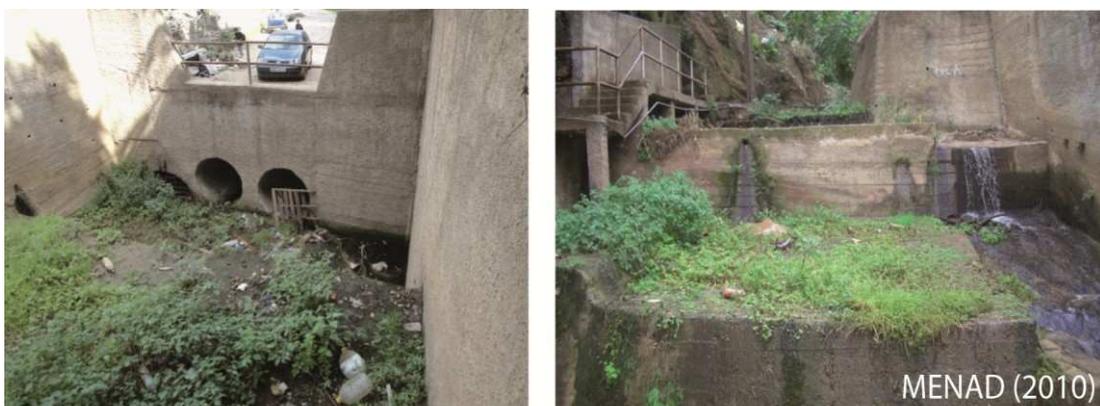


Fig. 7.11. Ouvrage hydraulique Chemin du Fort.

L'ouvrage du Chemin du Fort est relativement plus propre (peu de rejets) que les ouvrages précédents en raison de sa proximité immédiate avec les habitations.

7.3.2.2. Issu ou point de rejet du collecteur de l'Oued M'Kacel

Le collecteur de Oued M'Kacel rejette ces eaux dans la mer *via* deux principales issues : la première est directement reliée à la mer alors que la seconde se trouve à environ 15 m de celle-ci, rejetant ces eaux sur la plage sableuse qui se trouve à l'exutoire du bassin-versant de l'Oued Koriche (fig. 7.12). La libération des eaux au niveau de ce second point de rejet s'effectue *via* 4 ovoïdes d'environ 1 m de diamètre. En période estivale, le point de rejet est à sec et très envahi par la charge sableuse, ce qui n'est pas le cas le reste de l'année où le niveau de la mer augmente et les vagues s'écrasent directement sur le réseau.



Fig. 7.12. Issu du collecteur de l'Oued M'Kacel.

7.3.2.3. Les travaux d'entretien du réseau

La partie souterraine du collecteur de l'Oued M'Kacel a connu de gros travaux de curage, menés *via* la direction de l'assainissement par la *Société des Eaux et d'Assainissement d'Alger* : *SEAAL* (une description détaillée de cet organisme est présentée en annexe 7.2). Ce projet d'entretien a commencé en septembre 2008 et il n'a été achevé qu'à la fin juin 2009 (10 mois de travaux ; fig. 7.13). Selon les responsables du projet, le collecteur Oued M'Kacel est à présent fonctionnel sur l'ensemble de son tronçon souterrain.



Fig. 7.13. Travaux de curages à l'intérieur du collecteur Oued M'Kacel.

En ce qui concerne la partie aérienne du collecteur Oued M'Kacel, et selon les responsables du SEAAL, celle-ci ne relève pas de leurs fonctions. En principe, les travaux

d'entretien du réseau de surface doivent être pris en charge par les services communaux. Ces derniers doivent assurer la propreté et le curage à la fois du réseau hydraulique à ciel ouvert et du lit et des berges de l'oued naturel. Nous nous sommes adressés alors aux services communaux et avons été surpris par l'absence totale de planification des travaux d'entretien à l'échelle de l'année ou pluri-annuelle. La plupart de leur intervention de terrain restent ponctuelles, par exemple suite à un débordement au niveau du réseau d'assainissement, propres à évacuer les eaux qui s'accumulent sur les routes et au niveau des quartiers, ou encore pour déboucher des avaloirs... Concernant l'état actuel du réseau hydrologique aérien, la seule explication qu'on a pu obtenir auprès des collectivités locales s'est résumée au manque de financements. Mais quand on voit les moyens humains et matériels mobilisés lors d'un dysfonctionnement du réseau (ouvriers à plein temps, camions, outils de curage, pompes à eau de haute capacité...), on se rend compte qu'en réalité, ce ne sont pas les moyens qui manquent : là aussi, c'est l'ignorance qui règne et la notion de prévention n'est pas prise en compte dans les politiques de gestion.

Il est inadmissible de laisser à l'abandon les ouvrages hydrauliques qui ne drainent les eaux pluviales que par une seule issue vers le collecteur Oued M'Kacel.

7.3.2.4. Dédoublage du collecteur de l'Oued M'Kacel

Après les crues de novembre 2001 et mis à part les quelques travaux de gabionnage réalisés au niveau des berges des oueds naturels, le projet du *dédoublage du collecteur de l'Oued M'Kacel* reste l'unique aménagement réalisé afin de faire face et réduire le risque de formation des ruissellements superficiels et des crues rapides dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. L'exécution de tels travaux est prise en charge par le groupement CSM Bessac-Hydro-Technique (GBH), sous le contrôle de la Direction des Ressources Hydrauliques et de l'Economie de l'Eau de la Wilaya d'Alger (DHW). Il s'agit d'un collecteur dédié exclusivement à l'évacuation des eaux pluviales, contrairement au collecteur initial de l'Oued M'Kacel qui assure la collecte simultanée des eaux usées et pluviales. Le nouveau collecteur longe le bassin-versant de l'Oued Koriche d'amont en l'aval, assurant donc la jonction entre l'oued secondaire Baranes et le point de rejet en mer. Il s'étale sur plus de 4,5 km de tunnels circulaires bétonnés de 4 m de diamètre, dans le but d'assurer l'évacuation d'un débit maximal de $63 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 7.14). Il s'agit principalement d'un réseau souterrain de 350 m uniquement, construit à ciel ouvert.

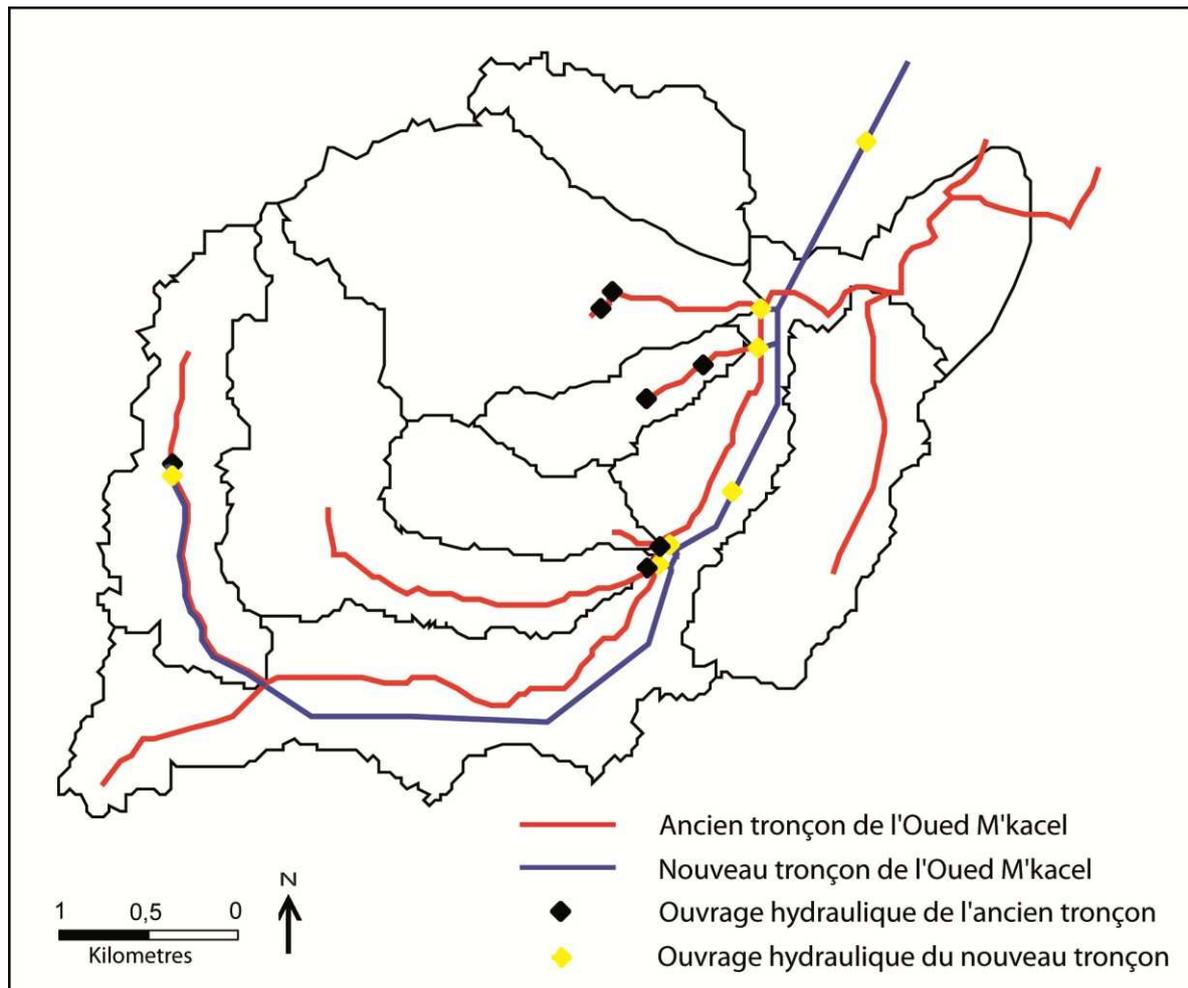


Fig. 7.14. Dédoublage du collecteur de l'Oued M'Kacel.

Dans le cadre de ce projet, 6 puits de 32 à 54 m de profondeur ont été réalisés. Quatre d'entre eux assurent le raccordement entre le collecteur initial de l'Oued M'Kacel et le nouveau réseau souterrain. Ces ouvrages de raccordements sont de l'amont vers l'aval : Baranes, Sidi Medjber, Frais Vallon et Scotto Nadal. Un puits de chute est réalisé à proximité de la voie rapide, à mi-chemin entre Frais Vallon et Scotto Nadal, dans le but de diminuer la force du débit avant que les écoulements n'atteignent les ouvrages de raccordement plus en aval. L'ouvrage Jaubert quant à lui joue une double fonction : il assure le raccordement entre les deux tronçons, ancien et nouveau, du collecteur de l'Oued M'Kacel et est conçu pour assurer la fonction d'un ouvrage de chute. Le dernier puits est à 350 m du point de rejet : il assure le passage entre de tunnelier souterrain et le canal à ciel ouvert (fig. 7.15). Le point de rejet de ce nouveau tronçon du collecteur de l'Oued M'Kacel se trouve en mer.



Fig. 7.15. A et B : Puits de raccordement à Frais Vallon ; C : Point de rejet en mer.

Les travaux sont en grande partie achevés, l'ensemble du canal est accompli et les puits sont tous creusés et blindés ; il reste uniquement quelques travaux de raccordement avec l'ancien tronçon de l'Oued M'Kacel ainsi que des ouvrages de raccordement avec le réseau hydrographique. Son achèvement total est prévu pour fin 2012. Ce nouveau tronçon sera prioritaire sur l'ancien tronçon de l'Oued M'Kacel, donc en cas d'épisode pluvieux c'est celui-ci qui assurera la collecte des eaux pluviales et quand il atteindra la saturation, le surplus sera alors dirigé vers l'ancien tronçon du collecteur.

Concernant le tronçon initial, les ouvrages hydrauliques de réception sont mal entretenus, encombrés par tous sortes de déchets et souvent envahis par la végétation. Les entrées des ouvrages hydrauliques sont toutes protégées de l'extérieur par des grilles à maillage relativement fin. En cas de pluies, les déchets qui s'accumulent à proximité des ouvrages hydrauliques, dans l'oued naturel et les canaux à ciel ouvert, seront entraînés vers eux et formeront aussitôt des embâcles au niveau de leur grillage, empêchant ainsi les eaux pluviales de gagner le collecteur souterrain. Par la suite, les eaux vont ruisseler en surface, se concentrer sur les linéaires (préférentiellement les routes) et regagner la voie rapide Chevaly-Triolet qui les acheminera à l'exutoire du bassin-versant de l'Oued Koriche. Un scénario dans lequel la partie souterraine du collecteur de l'Oued M'Kacel sera obturée est fortement probable vue l'état actuel de son réseau aérien. Le fait d'augmenter la capacité d'évacuation de ce dernier peut en théorie diminuer le risque de ruissellement superficiel et de crue mais en réalité, et si les pratiques ne changent pas sur le terrain, l'eau risque de ne jamais atteindre ce réseau.

7.3.3. Mode d'occupation du sol dans les sous-bassins versants de l'Oued Koriche

Nous avons tout d'abord analysé les modes d'occupation du sol et leur impact sur le développement de la réponse hydrologique globale du bassin-versant de l'Oued Koriche puis on a déduit que l'évolution de l'occupation du sol a pu avoir un double impact sur celle-ci : 1) l'emprise urbaine a provoqué une imperméabilisation croissante des surfaces et les volumes des eaux ruisselantes sont ainsi augmentés, engendrant une augmentation du débit de pointe ; 2) la réorganisation de la réponse hydrologique a renforcé son caractère polygénique et provoquer une augmentation du débit de pointe observé à l'exutoire. Dans cette partie, l'exposition de la surface physique (tissus urbain, réseau routier, infrastructures) face à l'aléa hydrométéorologique sera analysé à une échelle encore plus fine que celle du bassin-versant, à savoir celle du sous-bassin-versant.

7.3.3.1. Sous-bassin-versant de Baranes (partie amont de l'Oued Koriche)

Le sous-bassin-versant de Baranes est à 70 % occupé par le tissu urbain. Le couvert végétal ne représente que 17 % de sa surface totale, le reste étant soit du sol nu soit du réseau routier (fig. 7.16). La route principale qui longe le quartier résidentiel est construite exactement sur le lit mineur du sous-bassin de Baranes : elle est reliée de l'amont vers l'aval à plusieurs ruelles et rejoint la voie rapide Chevalet-Triolet à l'exutoire du sous-bassin.

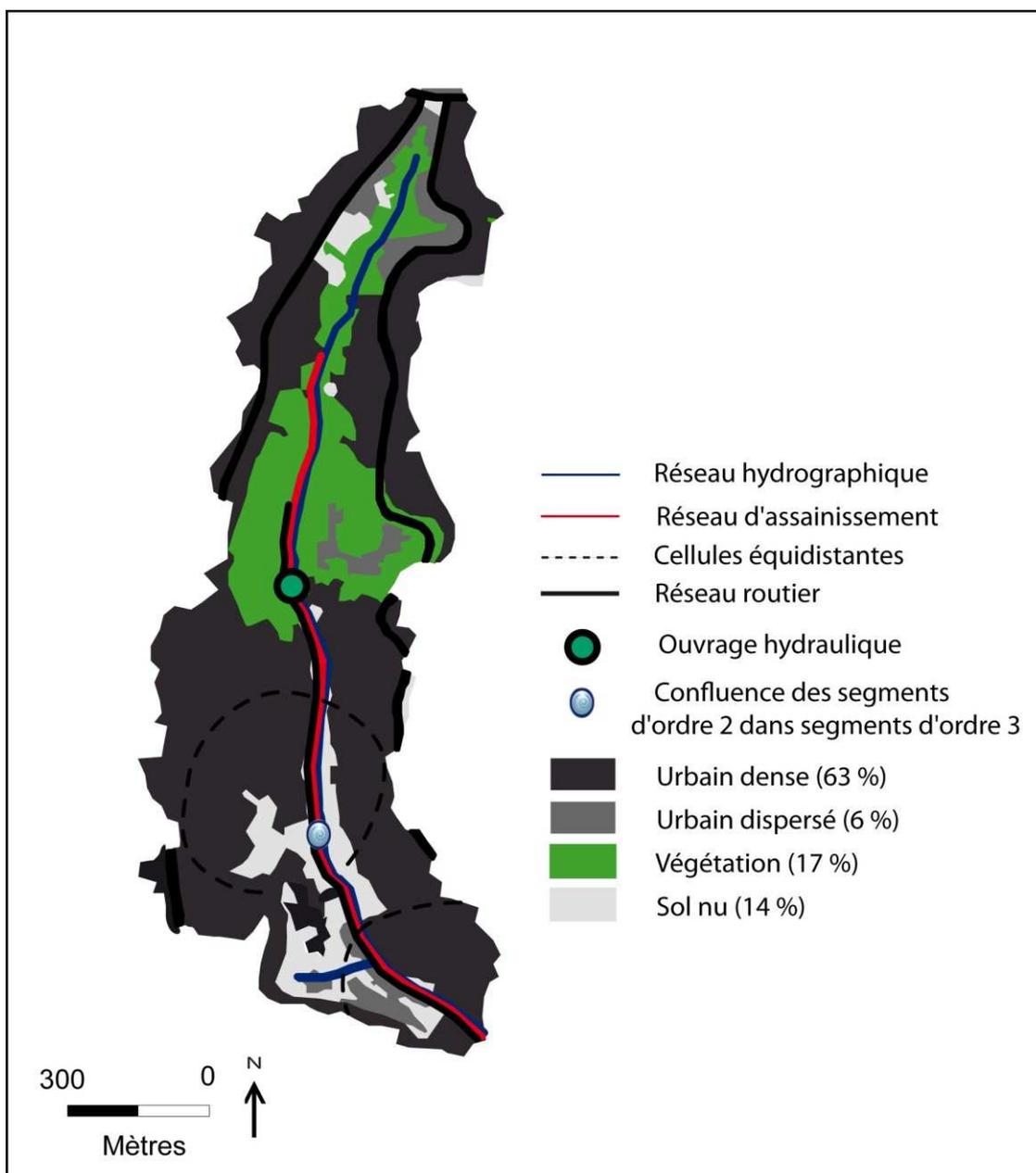


Fig. 7.16. Occupation du sol dans le sous-bassin de Baranès.

Les cellules équidistantes responsables de la génération du débit de pointe à l'exutoire ainsi que la confluence des segments élémentaires d'ordre 3 dans les drains d'ordre 4 (zone de développement des crues ; cf. chapitre 4) se trouvent toutes en aval de l'ouvrage hydraulique de réception. Ainsi, les principaux volumes d'eau ruisselée générés dans le sous-bassin-versant et par la suite celles des crues qui en découlent ne sont pas collectés par l'ouvrage

Baranes. Les avaloirs, qui assurent l'acheminement des eaux ruisselées en surface vers le collecteur souterrain, n'ont pas la capacité d'évacuer l'ensemble des volumes d'eaux générés, d'autant plus que ceux-ci sont en grande partie non fonctionnels. Ainsi, les eaux ne trouvent pas d'issue pour pénétrer dans le réseau souterrain ; elles ruissellent en surface et se concentrent jusqu'à l'exutoire du sous-bassin-versant où elles rejoignent la voie-rapide Chevalet-Triolet.

On en déduit donc que la plus grande partie des volumes d'eau générés dans le sous-bassin-versant de Baranes n'ont pas la possibilité de rejoindre le collecteur de l'Oued M'Kacel et participera ainsi à la production du débit de pointe à l'exutoire du bassin-versant.

Au-delà de l'ouvrage hydraulique, en longeant le sous-bassin vers l'amont à environ 400 mètres, on perd la trace du lit de l'oued. À la place du lit mineur, on trouve des constructions bétonnées (atelier, maisons anciennes d'autre en cours de constructions...) et de la végétation. Ces bâtis sont installés légalement dans le lit mineur de l'oued, et ils sont tous dotés d'un permis de construire (fig. 7.17).



Fig. 7.17. Clichés illustrant les pratiques anthropiques en amont du sous-bassin-versant de Baranes.

En aval de l'ouvrage, les versants sont fortement urbanisés, l'ensemble des quartiers sont reliés à la route principale, construite directement sur le lit mineur qu'on longe jusqu'à l'exutoire du sous-bassin Baranes pour rejoindre la voie rapide Chevalet-Triolet (fig. 7.18).

On conclut que le sous-bassin-versant de Baranes est fortement urbanisé sur ces deux rives et une urbanisation s'est et continue à se développer d'une manière plus au moins sauvage sans prendre en compte les risques existants sur le terrain. Ici, l'emprise urbaine, en plus des impacts relevés auparavant (imperméabilisation, réorganisation de la réponse hydrologique, cf. chapitre 6), a diminué énormément (voire inhibé) l'efficacité du réseau d'évacuation des eaux pluviales et ce, en se servant du canal à ciel ouvert ainsi que des versants du sous-bassin comme d'une décharge sauvage (fig. 7.18). Cette pratique participe également à augmenter les taux de recharge des eaux en matières solides. Ces eaux chargées ont eu des conséquences dramatiques lors de la catastrophe du 10 novembre 2001.



Fig. 7.18. Décharges sauvages.

Pour donner un exemple concret concernant les pratiques d'urbanisme aberrantes exercées dans le sous-bassin-versant de Baranes, nous avons pris le cas d'une école primaire. Cette école est construite au niveau du lit moyen voire mineur de l'oued principal qui draine le sous-bassin-versant, exactement à moins de 3 m de l'ouvrage hydraulique (fig. 7.19A). A droite de l'ouvrage, parallèlement au mur de l'école, nous trouvons un autre mur de 2,5 m de hauteur et de près de 300 m de longueur ; derrière celui-ci, les berges du bassin sont boisées, la porte d'entrée (qui est également une issue préférentielle des écoulements concentrés sur les berges) se trouve à 1 m de l'ouvrage hydraulique vers l'aval, exactement en face de la porte de l'école primaire (fig. 7.19). Ainsi, par son emplacement au niveau du lit de l'oued, par la proximité de l'ouvrage hydraulique (risque de formation d'embâcles et de débordement) ainsi que par le reste des éléments de l'environnement dans lequel il est installé (versant droit fortement urbanisé + eaux qui se concentrent sur le versant de rive gauche et dont l'issue préférentielle est en face de l'école), on en déduit que cet établissement qui accueille des enfants est construit dans une zone rouge (dangereuse) dans laquelle le risque de voir se développer des crues et/ou des inondations est très fort.



Fig. 7.19. Paysage autour de l'ouvrage hydraulique.

7.3.3.2. Sous-bassin-versant de Sidi Medjber

Le sous-bassin-versant de Sidi Medjber est couvert par un tissu urbain sur plus de 45 % de sa surface totale. On remarque qu'il est beaucoup plus urbanisé sur sa rive gauche (fig. 7.20) que sur celle de la droite. 27 % de la surface du sous-bassin-versant est couverte par de la végétation basse alors que le reste de la surface est à nu (fig. 7.21). C'est l'un des rares sous-bassins où une grande partie du réseau hydrographique a été conservé à l'état naturel.

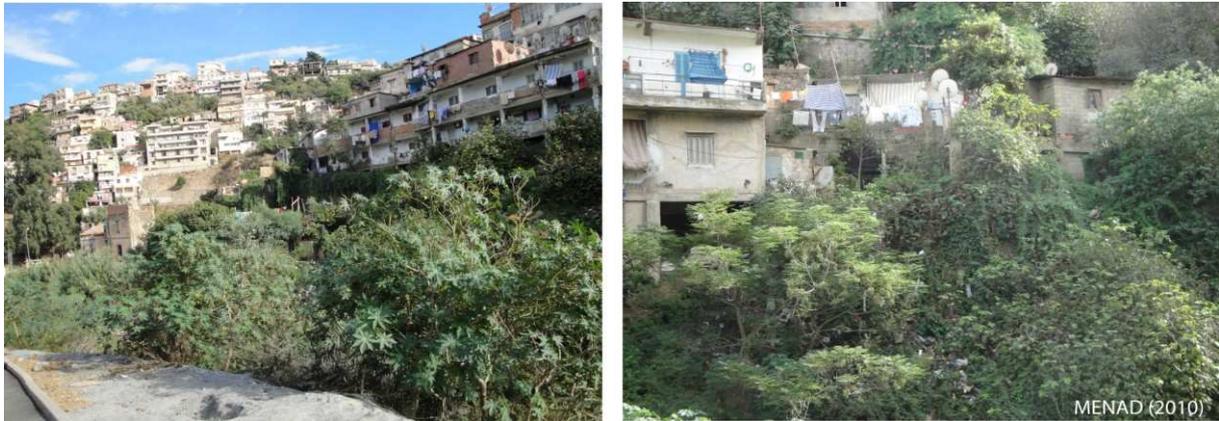


Fig. 7.20. Clichés pris sur la rive gauche du sous-bassin-versant de Sidi Medjber.

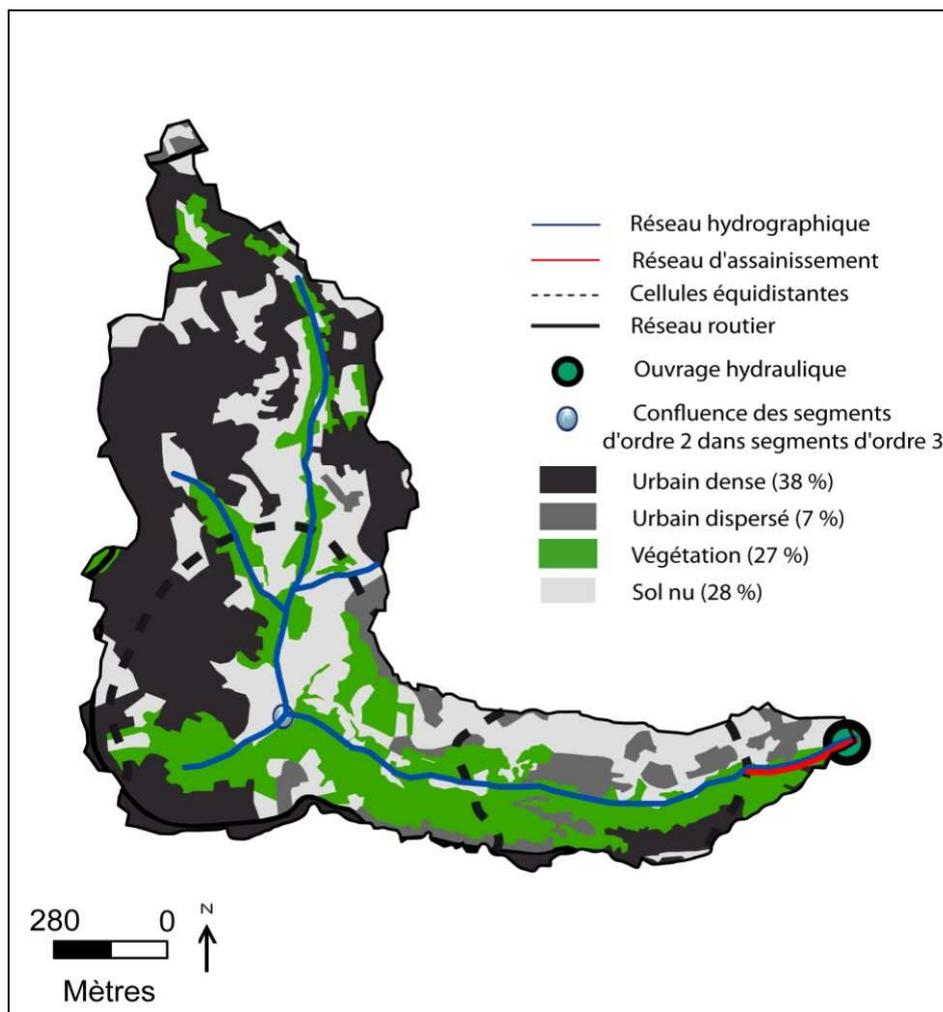


Fig. 7.21. Occupation du sol dans le sous-bassin-versant de Sidi Medjber.

Le passage du lit de l'oued au collecteur de l'Oued M'Kacel se fait dans la partie aval du sous-bassin-versant tout près de son exutoire, assuré par un canal à ciel ouvert puis un ouvrage hydraulique de réception (cf. *supra*). Pour un épisode pluvieux similaire à celui des 9-10 novembre 2001, il faut s'attendre à ce que le débit de crue qui arrive à l'ouvrage hydraulique soit d'environ $26 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit de pointe). Néanmoins, la capacité maximale du collecteur de Sidi Medjber est égale à $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans le cas où le collecteur fonctionne à 100 % de ces capacités (*i.e.*, dans le cas de réseaux mixtes, les collecteurs ne disposent jamais de leur pleine capacité d'évacuation), près de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ seront donc déversés directement sur la voie rapide Chevalet-Triolet. Mes enquêtes menées sur le terrain confirment ce constat, les citoyens témoignant que durant les périodes de pluie, le canal à ciel ouvert déborde à plusieurs reprises (cf. *supra*). Mais les enquêtes révèlent également un autre problème : les ruissellements superficiels générés sur les versants sont importants et se concentrent de l'amont vers l'aval sur le réseau routier, pour atteindre des vitesses importantes au niveau de la route parallèle au canal à ciel ouvert. Cette dernière se prolonge jusqu'à l'exutoire pour rejoindre la voie rapide Chevalet-Triolet. Ainsi, le réseau d'assainissement du Sidi Medjber présente une double anomalie fonctionnelle : la première est relative à l'incapacité de son ovoïde à évacuer l'ensemble des eaux générées en surface ; la seconde est liée à l'inefficacité de son réseau secondaire à collecter les eaux pluviales en différents points du sous-bassin-versant.

D'un point de vue hydrologique, on remarque que la bande de cellules équidistantes la plus importante se situe dans la partie amont du sous-bassin-versant ; elle prend une configuration en chou-fleur et s'étale majoritairement sur des zones urbaines. On a à faire donc à une configuration de cellules équidistantes naturellement efficaces, l'emprise urbaine venant renforcer cette efficacité en fournissant un volume d'eau supplémentaire. La zone de confluence des segments d'ordre 3 => ordre 4 se trouve dans la partie médiane du bassin à proximité du couvert végétal ligneux, relativement loin de la zone urbaine. Ainsi et selon l'état actuel de l'occupation du sol, les probables crues générés par cette *zone de confluence présente un niveau de risque modéré* (un niveau de vulnérabilité faible).

7.3.3.3. Sous-bassin-versant de Frais Vallon

Le tissu urbain dans le sous-bassin-versant de Frais Vallon présente 27 % de la surface totale alors qu'une infime partie (2 %) est couverte par de la végétation, le reste de la surface, soit 71 %, est à nu (fig. 7.22). Le réseau hydrographique est en grande partie conservé à l'état naturel, sa canalisation (à ciel ouvert puis en collecteur souterrain) a eu lieu tout près de l'exutoire. Pour une pluie comparable à celle du novembre 2001, ce collecteur ne sera pas capable d'évacuer la totalité des écoulements générés dans le sous-bassin-versant. Dans le cas où l'ouvrage de réception fonctionnera à pleine capacité, le surplus sera d'environ $4 \text{ m}^3/\text{s}$, mais en tenant compte de l'état actuel du collecteur ainsi que de ses caractéristiques intrinsèques (réseau mixte), les débordements seront sans doute beaucoup plus importants que la valeur théorique de $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

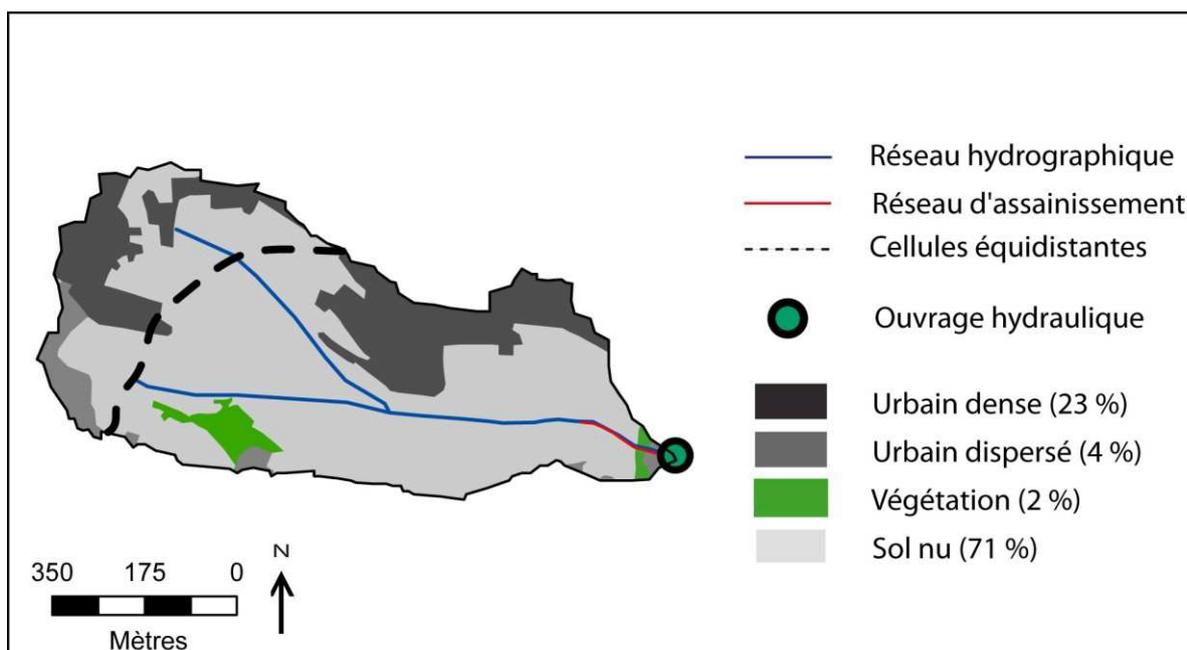


Fig. 7.22. Occupation du sol dans le sous-bassin de Frais Vallon.

Selon mes observations faites sur le terrain, l'oued principal du sous-bassin-versant de Frais Vallon existe encore sous sa forme naturelle. On observe juste avant le point de connexion, entre l'oued et l'ouvrage hydraulique, un système de gabionnage en escaliers construit en pierre, de plus de 2 m de hauteur et d'une dizaine de mètres de longueur.

Un certain nombre d'habitations sont installés au niveau de l'exutoire du sous-bassin-versant et, en cas de saturation et de débordement de l'ouvrage hydraulique, elles risquent d'être inondées. Néanmoins, le danger le plus important qui menace ces habitations vient plutôt de leur proximité géographique avec la voie rapide Chevalet-Triolet. Lors des événements météorologiques intenses, cette voie se transforme en un torrent et dans tel scénario, ces habitations seront grièvement endommagées voire même emportées.

On trouve également au bord de la voie rapide, à la sortie du sous-bassin-versant de Frais Vallon, une école primaire récemment construite (après la catastrophe du 10 novembre 2001). Une pratique qui relève encore une fois d'une négligence extrême du risque existant. Même après un événement dont les dégâts ont été sans précédent, les pratiques n'ont pas changé (fig. 7.23).

Du fait de sa faible densité urbaine (niveau de vulnérabilité faible), de sa petite taille et de son réseau hydrographique peu développé (pas de zone de confluence de segments), le sous-bassin-versant de Frais Vallon, à l'exception de quelques bâtis placés en exutoire, présente un niveau de *risque hydrométéorologiquement faible*.

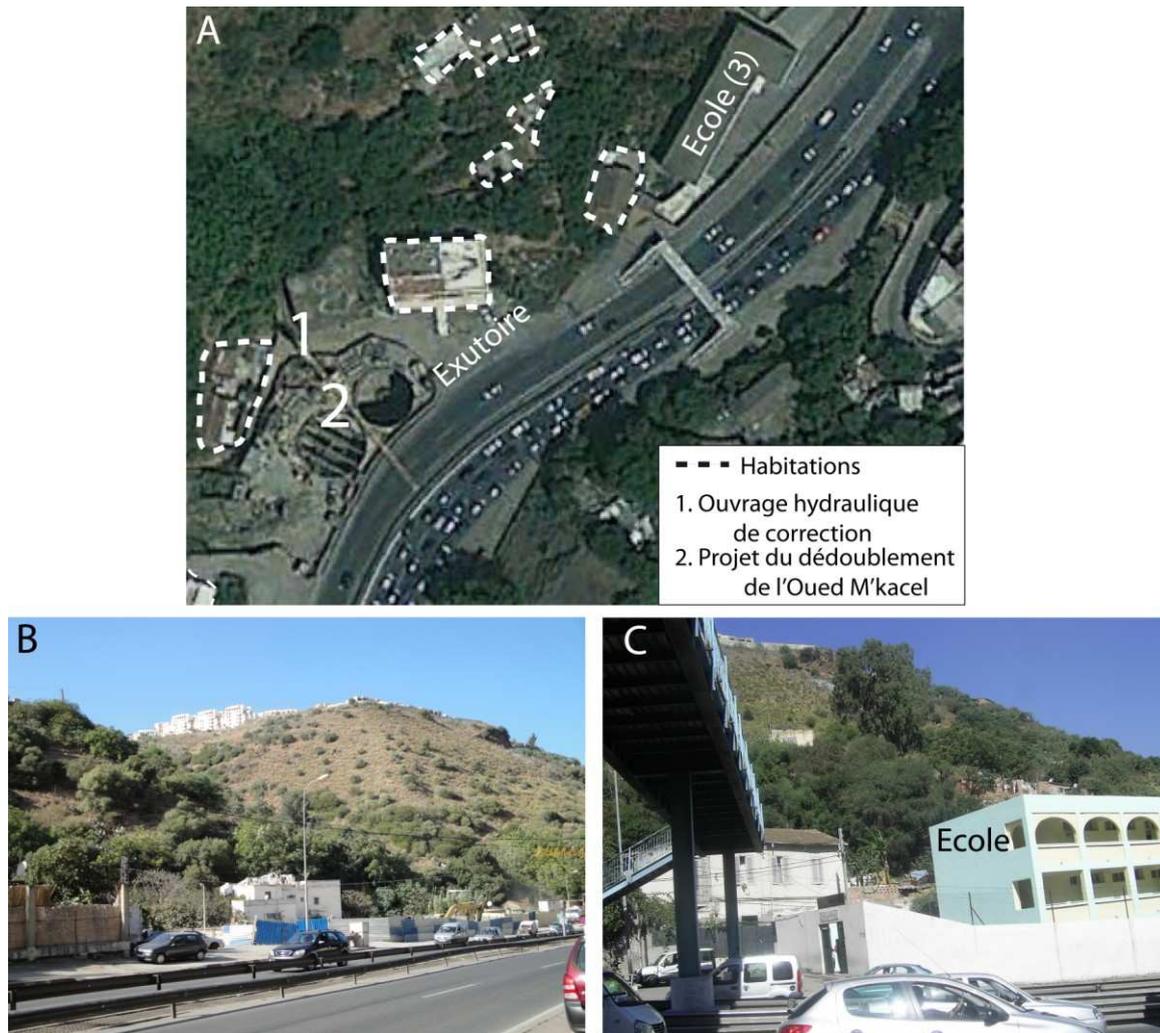


Fig. 7.23. Sous-bassin-versant de Frais Vallon (A). Image de Google Earth prise le 10 août 2011 (B). Vue d'ensemble sur la partie aval du sous-bassin (C). Une école primaire localisée à la sortie du bassin (en aval immédiat de l'exutoire du bassin-versant).

7.3.3.4. Sous-bassin-versant de Scotto Nadal

Le sous-bassin-versant de Scotto Nadal a connu un important développement urbain (55 %), en particulier sur sa rive gauche. La végétation s'étale sur près de 17 % de la surface totale : il s'agit majoritairement d'espèces ligneuses. Plus de 28 % de la surface reste à nu (fig. 7.24).

La bande des cellules équidistantes prend une configuration naturellement efficace, l'influence *in situ* de l'emprise urbaine sur cette efficacité est négligeable vue que les cellules se trouvent dans une zone très peu urbanisée. Leur influence (accélération des vitesses d'écoulement et l'augmentation des volumes d'eau ruisselée) seront exercées plus en aval où le tissu urbain est plus dense. Le sous-bassin-versant de Scotto Nadal est doté d'un réseau hydrographique peu développé dépourvu de zone de confluence. En dehors de sa partie canalisée, le réseau hydrographique a longtemps conservé son état naturel mais après les crues de 2001, un système de gabionnage en escaliers a été mis en place, modifiant ainsi les caractéristiques naturelles des versants.

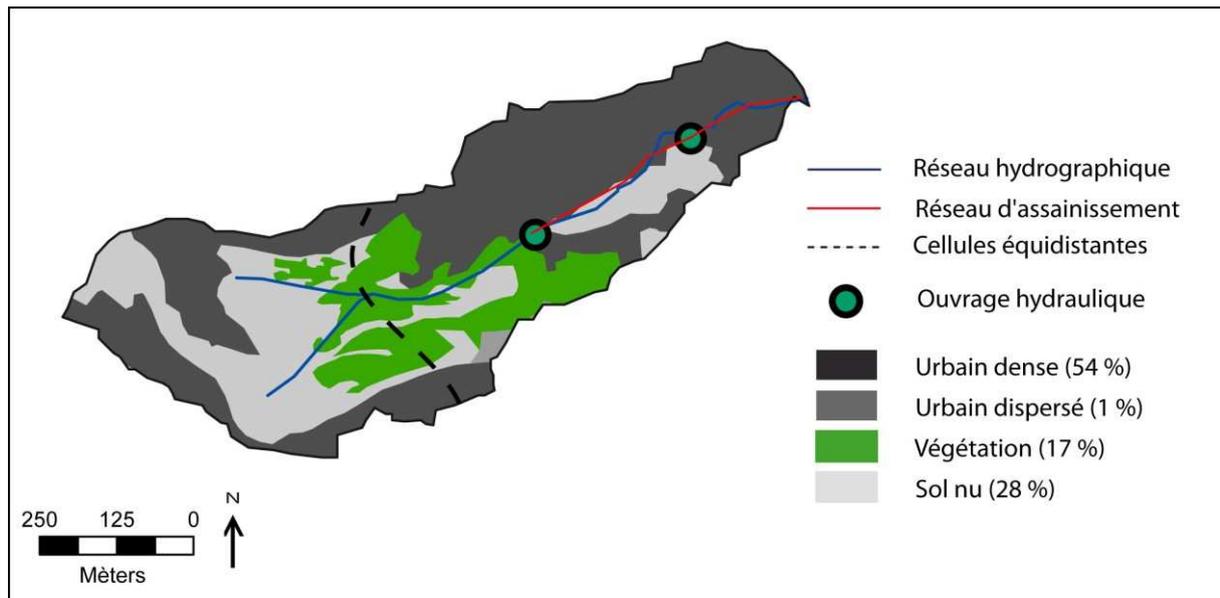


Fig. 7.24. Occupation du sol dans le sous-bassin de Scottó Nadal.

En amont de l'ouvrage hydraulique, on rentre dans de spacieuses propriétés privées et isolées, qui renferment des terrains vagues laissés à l'état sauvage et sur lesquels pousse de la végétation qui, par endroits, envahit le lit mineur de l'oued. Certains versants servent de décharges sauvages pour la population installée à proximité. En aval de l'ouvrage, on trouve un tissu urbain dense et structuré dont une partie est installée directement dans les lits moyen et mineur de l'oued principal qui draine Scottó Nadal. Au dessus du tronçon souterrain, une route longe le quartier jusqu'à l'exutoire où elle rejoint la voie rapide Chevalet-Triolet. Selon le témoignage des habitants, lors des épisodes pluvieux d'automne et d'hiver, de forts ruissellements se forment le long de cette route. Les ruissellements peuvent parfois s'avérer même dangereux en allant jusqu'à bloquer la circulation des piétons. Cette situation est en partie due à l'inefficacité du réseau d'évacuation secondaire-installé dans les zones urbanisées. Son inefficacité est liée principalement aux anomalies que présentent leur point d'accès (avaloirs), ces derniers étant soit mal positionnés (vitesses d'écoulement dépassant la capacité d'absorption des avaloirs), soit bouchés (non fonctionnels). Les forts ruissellements relevés en surface sont également liés au mode d'aménagement de l'ouvrage hydraulique de réception. Sur le terrain, on aperçoit rapidement que les écoulements qui se concentrent le long du lit de l'oued n'arrivent pas à tous rejoindre l'ouvrage de réception. Comme on peut le constater *sur* la fig. 7.25, le lit de l'oued est partagé en deux par une sorte de mur en pierre (hauteur < 1 m), l'une dirigée vers l'ouvrage de réception, l'autre devenue une ruelle connectée plus bas au réseau routier du quartier. Ainsi, les eaux qui ruissellent au-dessus de cette dernière ne seront pas évacuées par l'ouvrage hydraulique et rejoignent le réseau routier secondaire puis la voie rapide Chevalet-Triolet à l'exutoire du sous-bassin-versant.



**Fig. 7.25. Sous-bassin-versant de Scottó Nadal (A). Entrée amont de l'ouvrage hydraulique (B).
Paysage en aval de l'ouvrage.**

En tenant compte de sa petite taille et du réseau hydrographique peu développé, le sous-bassin-versant de Scottó Nadal ne peut pas générer des crues à caractère torrentiel. Néanmoins, il n'est pas pour autant épargné des crues, vues les nombreuses anomalies que présente son système d'évacuation associé à la forte urbanisation de la partie aval. Le risque de développer des crues et des inondations d'intensité modérée reste très probable.

7.3.3.5. *Sous-bassins versants du Chemin du Fort et Jaubert*

On regroupe ici les sous-bassins versants qui drainent les oueds du Chemin du Fort et de Jaubert. Ce choix est justifié par le fait que le lit de l'oued qui draine le sous-bassin-versant de Jaubert a été dévié en raison des travaux d'élargissement de la carrière Jaubert, qui déverse actuellement ses eaux dans le sous-bassin-versant du Chemin du Fort.

Les sous-bassins versants du Chemin du Fort et de Jaubert sont à 28 % urbanisés et le sol nu représente plus de 35 % de la superficie totale (fig. 7.26). On déduit de ces chiffres qu'une grande partie de leur surface est fortement imperméable et il faut donc s'attendre à la génération d'importants volumes d'eaux. Le débit de pointe provoqué par un événement équivalant à celui des 9-10 novembre 2001 est estimé à un peu plus de 40 m³/s, celui des collecteurs d'évacuation à 55 m³/s. Ces derniers sont donc théoriquement suffisants pour collecter l'ensemble des écoulements générés et concentrés dans les deux sous-bassins versants.

En amont de l'ouvrage hydraulique du Chemin du fort, à proximité du lit mineur de l'oued, on trouve une zone urbaine dense, située en bas du point de confluence des segments d'ordre 3 dans les segments d'ordre 4 du réseau hydrographique. Ce quartier, par sa localisation géographique, nécessite une vigilance et une protection particulières.

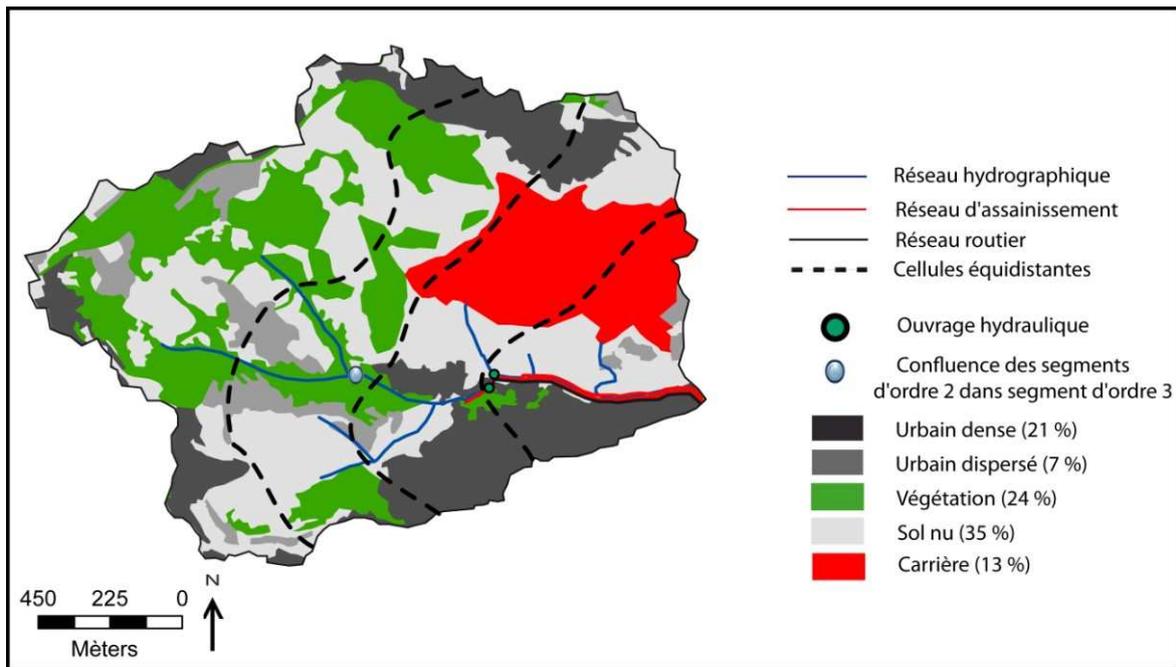


Fig. 7.26. Occupation du sol dans les sous-bassins versants du Chemin du Fort et de Jaubert.

Selon les constats faits sur le terrain et le témoignage des personnes interrogées, une grande partie des eaux prévenant de l'amont de l'ouvrage Jaubert (haut du quartier) ruisselle le long de la route principale qui longe la zone urbaine, les eaux se concentrant jusqu'à atteindre des vitesses assez importantes. Les maisons qui se trouvent au bord de cette route sont souvent inondées par les ruissellements venant de l'amont. Ces quantités d'eau ne peuvent rejoindre le réseau d'assainissement et sont injectées directement sur la voie rapide Chevalet-Triolet, pour être ensuite acheminées vers l'exutoire final de l'Oued Koriche. Elles participeront ainsi à la production du débit de pointe dans la réponse globale du bassin. Pourtant, un tel scénario n'a pas lieu d'être car la collecte et l'évacuation des surplus d'écoulement provenant de la carrière Jaubert, ainsi que ceux provenant de la partie NE du sous-bassin-versant du Chemin du Fort, sont assurées théoriquement par le collecteur à ciel ouvert installé en pleine zone urbaine (fig. 7.27). Cependant, cet ouvrage présente de nombreux problèmes techniques et d'entretien, ce qui inhibe le fonctionnement de plusieurs tronçons fluviaux. Ces anomalies peuvent être résumées en deux principaux points : le premier est lié à sa localisation géographique, à savoir que la route et les maisons à proximité sont localisées en contre-bas du canal à ciel ouvert ; ainsi, les eaux ne peuvent pas rejoindre le canal et ruissellent donc sur la route en inondant souvent les maisons à proximité. Le second point est lié à l'état de propreté du canal : son état actuel donne l'impression d'un ouvrage laissé à l'abandon, encombré par toutes sortes de déchets qui s'accumulent peu à peu et forment des embâcles aux endroits à faible pente, bloquant ainsi l'écoulement des eaux et provoquant des débordements ponctuels.

La partie du sous-bassin-versant collectée par l'ouvrage Chemin du Fort est la plus couverte par la végétation et les berges des oueds ont longtemps gardé leur état naturel. Néanmoins, après l'événement de 2001, un système de gabionnage en escaliers a été installé sur les berges situées à proximité des zones urbaines. On longeant le lit de l'oued vers l'amont, on remarque que les habitants se servent des berges ainsi que du lit de l'oued pour jeter leurs déchets ménagers, des produits de construction, etc. (fig. 7.27). Une telle pratique peut géné-

rer de nombreux dysfonctionnements hydrologiques, en commençant par la diminution de la capacité d'évacuation de l'oued, faisant que les débordements de l'oued sont plus fréquents et que les habitations sont plus exposées au risque de crue et d'inondation. Ces rejets participent également à l'alimentation en charge solide des eaux ruisselées. Selon l'intensité de la crue, les déchets peuvent être entraînés le long du lit jusqu'à l'ouvrage hydraulique de connexion où ils formeront des embâcles, empêchant ainsi le passage des écoulements dans le collecteur de l'Oued M'Kacel. Le risque de voir se former des embâcles, en amont de l'ouvrage et dans le lit de l'oued, est également très fort. Dans ce cas de figure, les habitations construites dans le lit moyen ou mineur pourront être subitement inondées.



Fig. 7.27. Sous-bassin du Chemin du Fort (A). Chemin piéton (B). Système de gabionnage installé sur les berges (C). Décharge sauvage sur les versants.

En dehors du fait que certaines maisons sont construites au niveau du lit de l'oued, un nombre important de particuliers a cassé les gabions installés sur les berges, afin de former une sorte de chemin d'accès au lit de l'oued (fig. 7.28). Ceci rend leurs maisons encore plus vulnérables, qui risquent d'être inondées à la moindre élévation du niveau d'eau dans l'oued, et qui deviennent ainsi plus vulnérables à des événements météorologiques jugés autrefois inoffensifs.

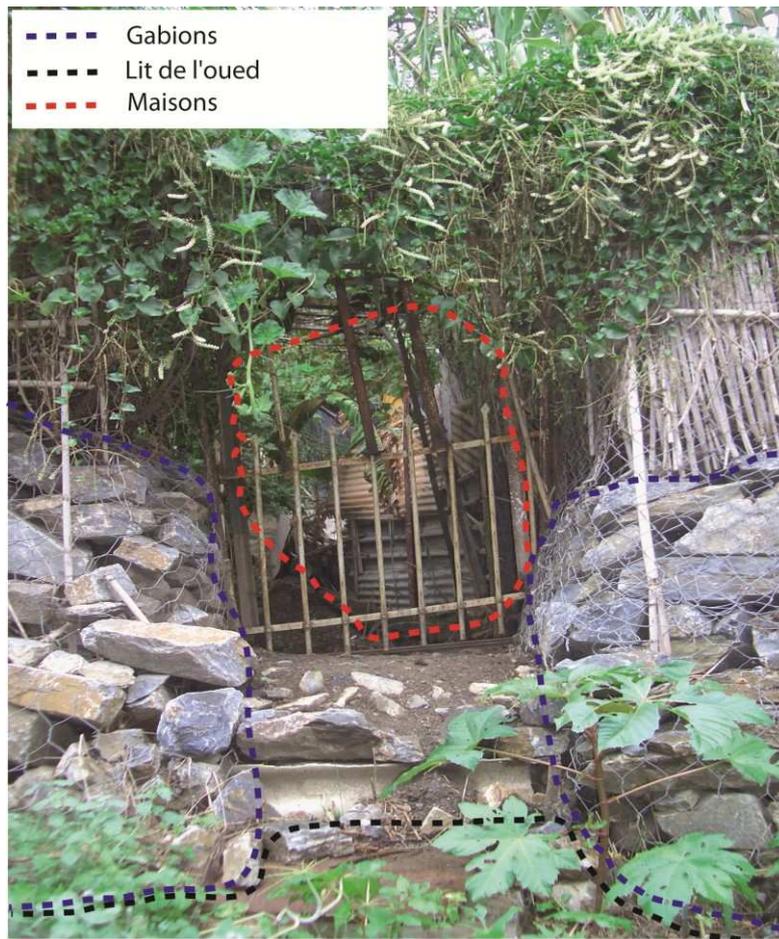


Fig. 7.28. Dégradation du système de gabionnage.

Le sous-bassin-versant du Chemin du Fort est, par sa superficie et l'intensité de sa réponse hydrologique, l'un des plus importants sous-bassins versants de l'Oued Koriche. Sa partie amont présente le risque de développer des crues et des inondations spatialement limitées, induits principalement par l'extension des zones urbaines à proximité immédiate du lit de l'oued naturel et la présence de zones de confluence entre les segments élémentaires du réseau hydrographique. En aval et en raison de nombreux dysfonctionnements que présente son système de récupération et d'évacuation des eaux pluviales (cf. *supra*), ce secteur risque de développer des crues rapides ($40 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une pluie équivalente à celle des 9-10 novembre 2001) aux lourdes conséquences.

7.3.3.6. Le quartier de Bal-el-Oued

Le quartier de Bab-el-Oued occupe l'extrême aval du bassin-versant de l'Oued Koriche. Il s'étale sous forme d'un tissu urbain structuré et très dense. Il est l'un des quartiers les plus populaires d'Alger où la densité de population est très élevée. Lors des crues du 10 novembre 2001, c'est à cet endroit que les conséquences les plus dramatiques ont eu lieu. Depuis, rien ne semble entrepris réellement au niveau du quartier de Bab-el-Oued et les pratiques qui ont autrefois aggravé l'aléa hydrométéorologique persistent encore : (A) *Pratiques des collectivités* : les marchés en plein air, installés dans des petites ruelles et très fréquentés par la population locale, sont omniprésents. A la sortie du quartier, exactement à l'exutoire du bassin-versant de l'Oued Koriche, les services responsables du secteur de transport ont décidé

d'installer la nouvelle station de bus ; une station très fréquentée la journée ; (B) *Réseau d'assainissement* : les avaloirs sont mal entretenus ; les eaux récupérées des toitures des bâtis étant dégagées directement sur les trottoirs, elles empreintent ensuite le réseau routier ; (C) *Gestion préventive* : l'absence du plan ORSEC ou même de plan d'évacuation en cas de crise.

Le vieux marché couvert, qui se trouvait à l'entrée du quartier juste après le carrefour de Triolet et dans lequel plusieurs dizaines de personnes ont trouvé la mort en 2001, reste la seule construction à avoir été délocalisée après la catastrophe du 2001. A la place du marché, on trouve actuellement une placette qui sert de stade pour la population locale, et qui peut être utilisée également pour organiser des fêtes en plein air. Par son emplacement et sa structure mais aussi par l'état dans lequel se trouvent ses avaloirs, on peut imaginer qu'en cas de crue, la placette sera inondée et une partie des eaux sera transférée vers l'aval. L'aval de la placette n'est rien d'autre qu'une école primaire, un collège et un quartier résidentiel. Ainsi, ces bâtis présentent par leur situation géographique et leur fonction une zone à haut risque (fig. 7.29).



Fig. 7.29. Placette installée à la place de l'ancien marché couvert de Bab-el-Oued (A). Image de Google Earth prise le 10 août 2011 (B). Clichés de la placette.

7.3.4. Structure et orientation du réseau routier dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

En se servant des plans cadastraux, on a essayé d'établir, le plus fidèlement possible, la configuration du réseau routier (voie rapide Chevalet-Triolet ; réseau secondaire et ruelles) dans l'Oued Koriche (fig. 7.30).

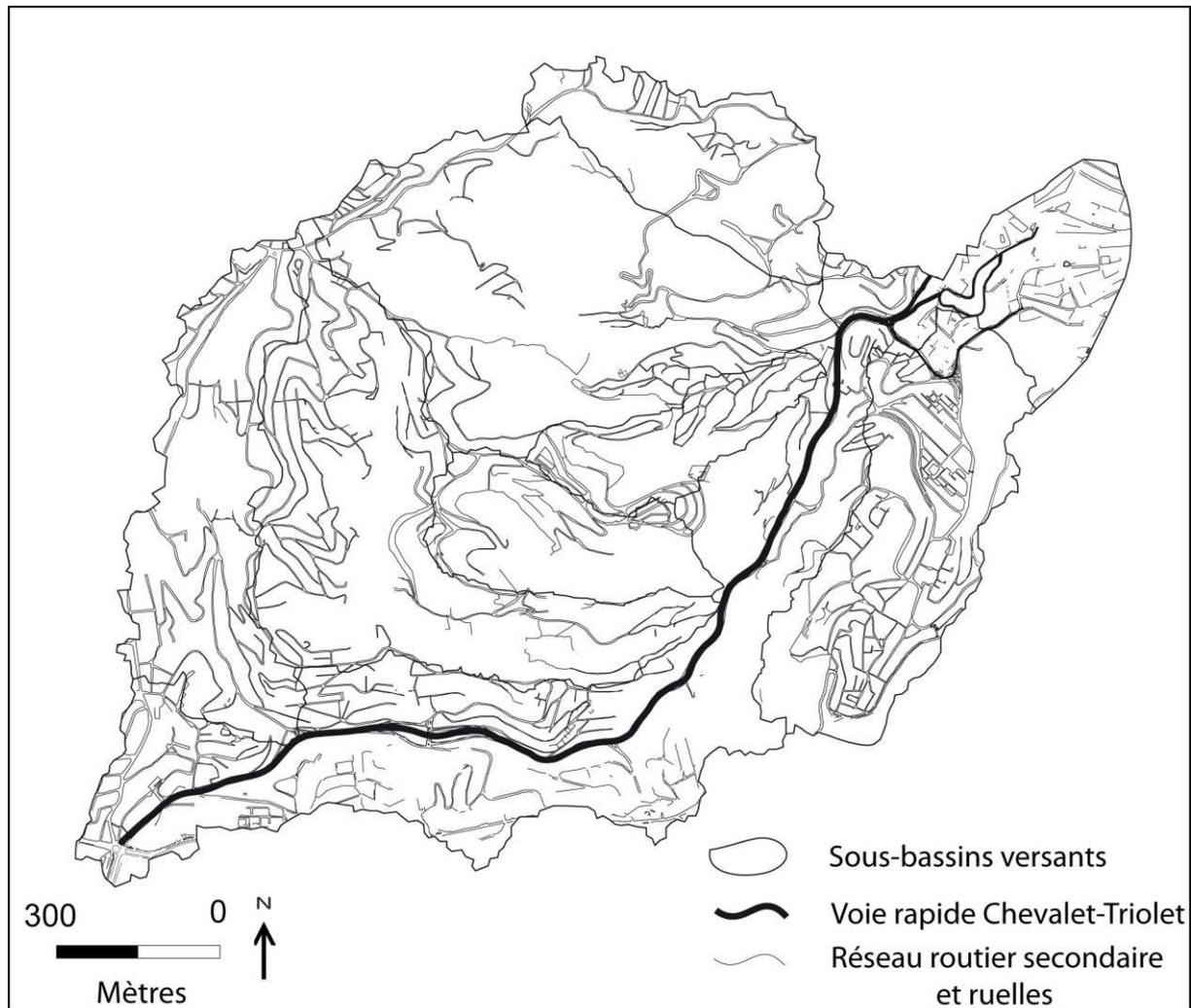


Fig. 7.30. Réseau routier dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

On remarque que la majeure partie du réseau routier est conçue dans la direction de la pente, parallèlement au lit de l'oued (cas du sous-bassin-versant de Sidi Medjber) et certaines de ces routes sont construites directement dans le lit mineur des oueds : c'est le cas des sous-bassins versants Baranes, Scotto Nadal et Chemin du Fort. L'oued principal qui draine le bassin-versant de l'Oued Koriche a été enterré et canalisé progressivement avec le temps ; actuellement, il se trouve entièrement canalisé et enterré et à sa place, une voie rapide Chevalet-Triolet est installée. Si l'on compare le tracé de l'oued et celui de la route, on remarque qu'ils sont parfaitement superposables. La pratique qui consiste à installer des routes au-dessus des lits des oueds, après qu'ils aient été canalisés, est largement adoptée malgré sa grande dangerosité : les expériences ont montré que l'eau finit toujours par reprendre son chemin (la notion d'oued définitivement inerte doit donc être reconsidérée par les aménageurs). Cette pratique peut être expliquée par le fait que le tracé adopté par les écoulements correspond au plus court

chemin possible pour atteindre l'exutoire et il a été bien évidemment tracé en tenant compte des conditions climatiques et lithologiques, du système des pentes dans le bassin-versant.

Le réseau routier ainsi conçu dans le bassin-versant de l'Oued Koriche favorise le développement des crues rapides : 1) Une route est forcément moins rugueuse que le lit naturel de l'oued. Les écoulements qui se développent sur celle-ci sont donc plus rapides, l'évacuation de la crue vers l'aval s'accélère et son arrivée à l'exutoire est alors plus brutale (diminution du temps de réaction et d'évacuation). Une brutalité qui se manifeste sur le terrain souvent par une augmentation des dégâts matériels mais surtout des pertes humaines ; 2) Le réseau routier est totalement imperméable et en absence d'un système de récupération des eaux pluviales installé au niveau du réseau routier, les eaux qui l'atteignent et se concentrent le long de ce réseau rejoignent toutes l'exutoire. Ainsi, le réseau routier dans ce cas participe également à l'augmentation des volumes ruisselés ; 3) Un réseau routier est moins profond qu'un réseau hydrographique : dans le cas où il y a un dysfonctionnement au niveau du réseau d'assainissement, les hauteurs d'eaux ruisselées au bord de la route seront plus importantes et des zones autrefois épargnées par les crues seront touchées ; 4) L'installation d'un réseau routier à la place du réseau hydrographie extrait ce dernier du paysage et, avec le temps, les gens l'oublie et auront tendance à s'installer au bord de la route, donc occuper les lits moyen et mineur des oueds. La voie rapide Chevalet-triolet, qui n'est autre que le lit mineur de l'oued principal drainant le bassin-versant de l'Oued Koriche, est un bon exemple illustrant la dangerosité d'effacer le réseau hydrographique du paysage urbain.

7.3.5. Insertion de la voie rapide Chevalet-Triolet dans le paysage du bassin-versant de l'Oued Koriche

En longeant la voie rapide Chevalet-triolet, de l'amont vers l'aval, le paysage change sur les deux rives : espaces urbaines, remblais sur lesquels s'est installé un couvert végétal herbacé ainsi que quelques espèces ligneuses d'un côté, affleurement du substrat géologique de l'autre (fig. 7.31).

On remarque sur la figure 7.31 que le tissu urbain s'est développé à proximité de la voie rapide, et les habitations qui se trouvent au bord de la route sont très nombreuses. Cette voie rapide s'est transformée le jour de l'événement du 10 novembre 2001 en un torrent piègeant et emportant les voitures, les piétons et les habitations proches. Aujourd'hui, 11 ans après la catastrophe, l'environnement dans lequel s'insère la voie rapide n'a pas changé et de nouvelles installations continuent à avoir lieu (école primaire, habitations, locaux commerciaux...). La fig. 7.32 montre cela le long de la voie rapide Chevalet-Triolet.

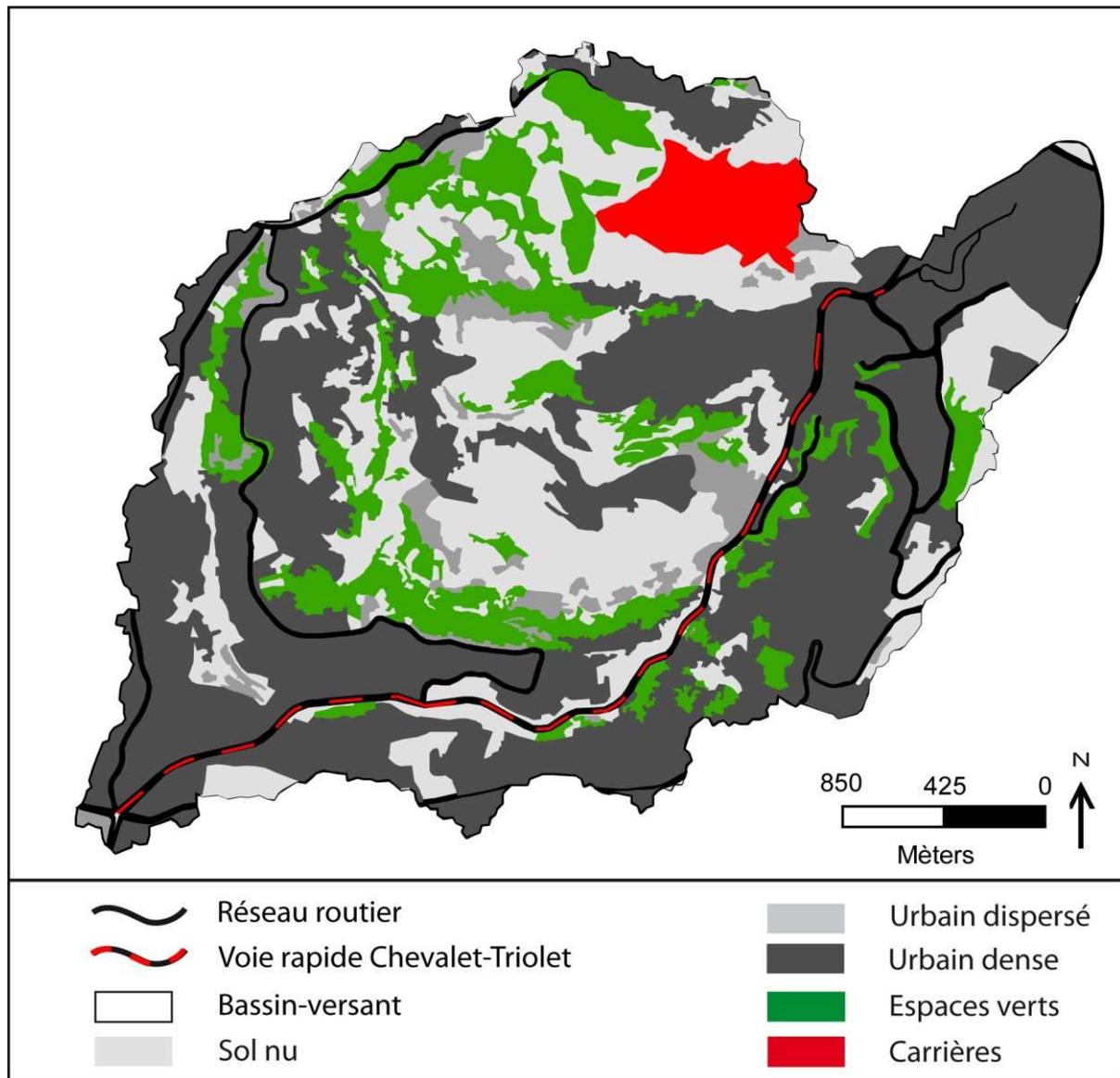


Fig. 7.31. Carte d'occupation du sol du bassin-versant de l'Oued Koriche en 2011.

Nous nous sommes ensuite intéressés au système de récupération des eaux pluviales installé le long de la voie rapide. On aperçoit que l'évacuation des ruissellements superficiels qui se forment sur la voie rapide est assurée de deux façons :

1) Les avaloirs : ce sont des points d'accès d'1 m de long sur 1 m de large qui permettent aux eaux ruisselant en surface de rejoindre le réseau d'évacuation souterrain (collecteur Oued M'Kacel). La grande majorité de ces ouvrages est non couvert, donc sans protection, et est envahis par toutes sortes de déchets. Certains d'entre eux sont même complètement bouchés (fig. 7.33A).

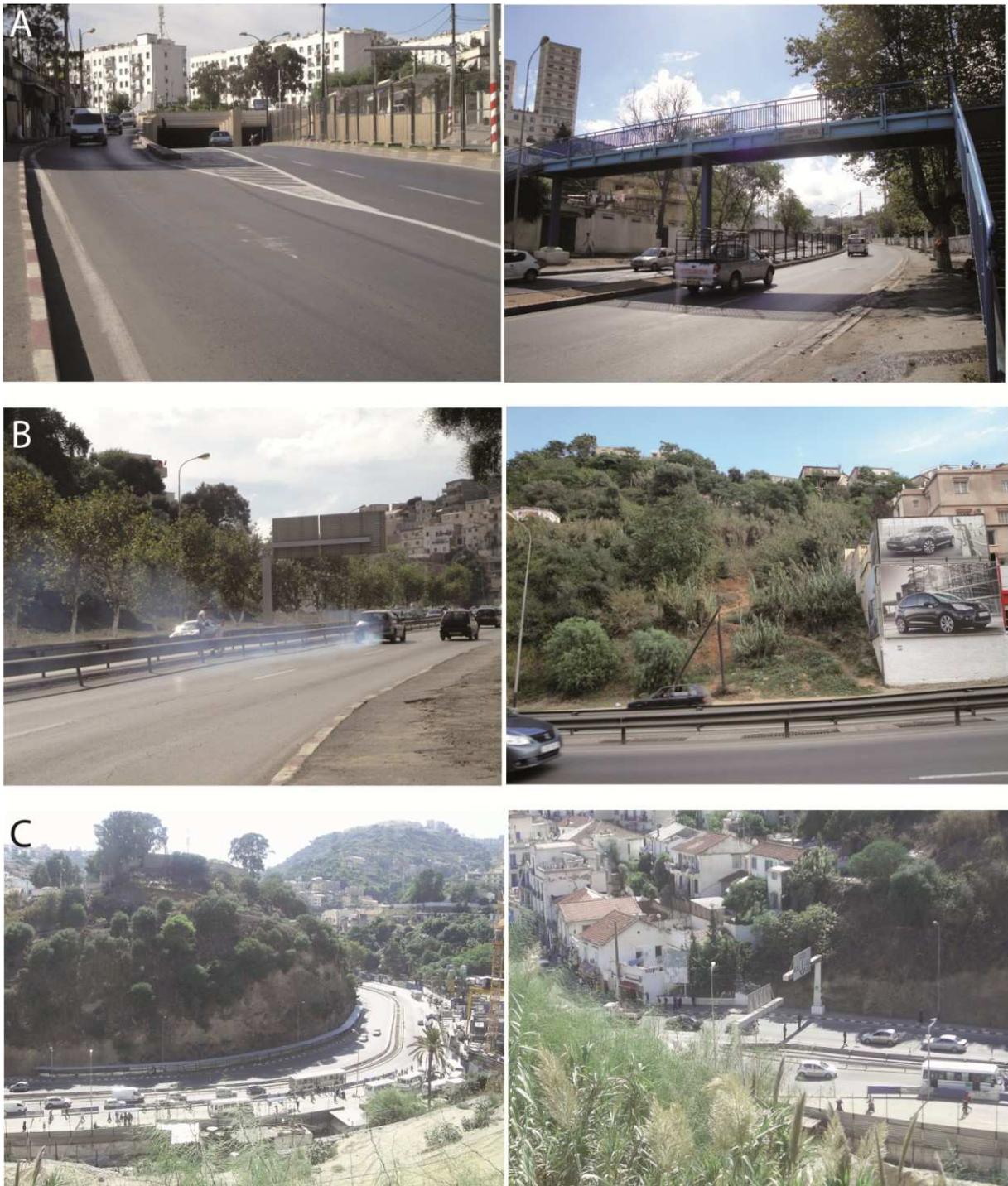


Fig. 7.32. Environnement urbain autour de la voie rapide Chevalet-Triolet (A). Partie amont. (B). Bassin moyen. (C). Partie aval.

2) *Le canal à ciel ouvert* : Au niveau de l'espace qui sépare les deux directions de la voie rapide s'étale un canal de récupération des eaux pluviales protégé par un grillage (fig. 7.33B).



Fig. 7.33. Système d'évacuation des ruissellements de surface à partir de la voie rapide Chevalet-Triolet (A). Les avaloirs (B). Le canal à ciel ouvert.

Lors d'un événement pluvieux ordinaire, on aperçoit rapidement que le système d'évacuation des eaux pluviales installé le long de la voie rapide manifeste de nombreux dysfonctionnements (fig. 7.34). Une partie de ces dysfonctionnements est liée au manque d'entretien des avaloirs, qui sont partiellement ou totalement non fonctionnels. Le canal d'évacuation à ciel ouvert présente quant à lui de sérieux problèmes techniques, le canal se situant à un niveau plus haut que celui des deux bords de la route, à l'exception de quelques virages où la pente est orientée vers le canal. L'eau ruisselle donc préférentiellement de part et d'autre de la voie rapide. Pour que l'eau puisse emprunter le canal, il faut d'abord que la route soit entièrement inondée et que les hauteurs d'eau atteignent quelques dizaines de centimètres. Un autre problème qui mérite d'être appréhendé est lié à la structure du canal à ciel ouvert : on constate qu'au niveau des points d'intersection entre la voie rapide et le réseau routier secondaire (routes descendant des deux rives du bassin-versant), le canal à ciel ouvert passe soudain dans le sous-sol pour permettre aux voitures de pouvoir prendre la route dans les deux directions. Les points de connexion entre les routes secondaires et la voie rapide coïncident majoritairement avec les exutoires des sous-bassins versants de l'Oued Koriche. Elles présentent de ce fait une importante source d'alimentation en eau ruisselant en surface. En tenant compte de l'état actuel du système d'évacuation des eaux pluviales de la voie rapide Chevalet-Triolet, il faut s'attendre à ce que les volumes injectés *via* les points d'intersection ruissellent en grande partie le long de la voie rapide jusqu'à l'exutoire.

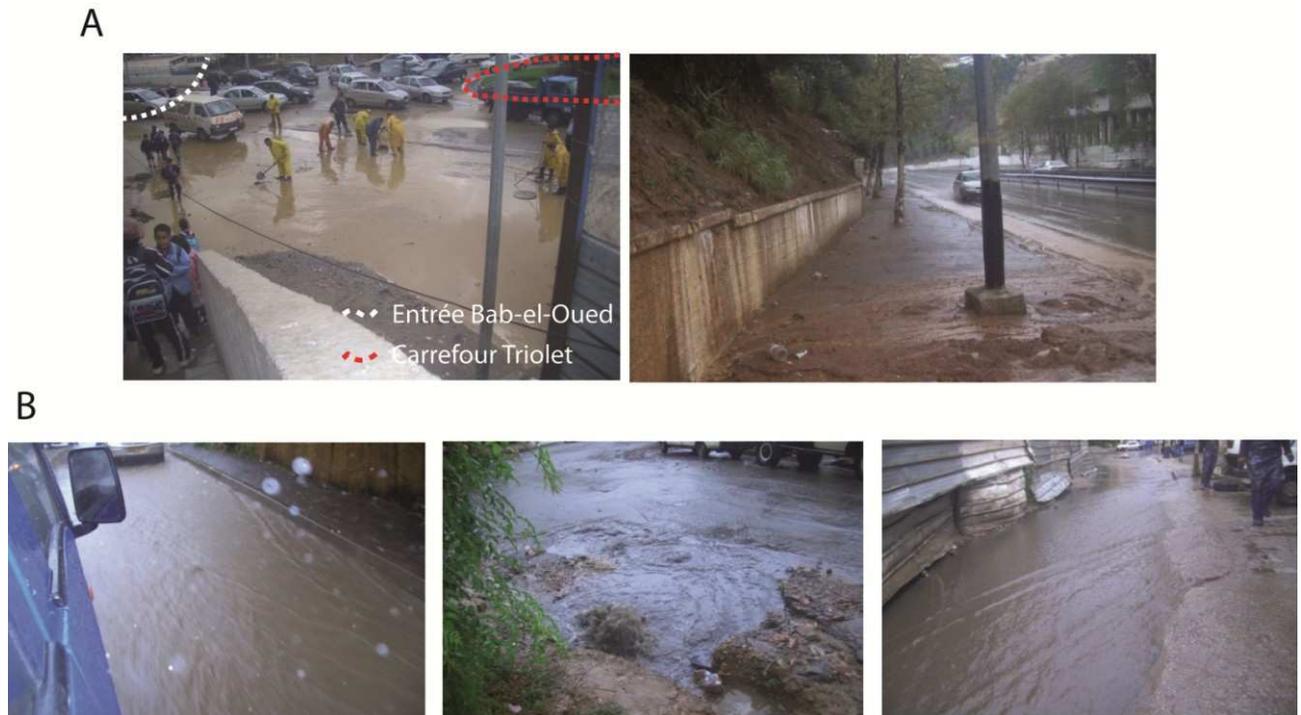


Fig. 7.34. Comportement des eaux pluviales au niveau de la voie rapide (A) et du réseau routier secondaire (B).

Conclusions

L'analyse systémique menée ci-dessus nous a permis de réaliser une synthèse des traitements précédents réalisés plus au moins thématiquement (climat, géomorphologie, hydrologie, simulations numériques) et d'explorer d'autres champs et de chercher des réponses auprès de facteurs non pris en compte avant, tels l'anthropisation et l'évolution spatio-temporelle du réseau hydrographique ; la structure, le mode de fonctionnement et la capacité d'évacuation du réseau d'assainissement ; la configuration spatiale et l'orientation du réseau routier ; l'analyse des modes d'occupation du sol à une échelle encore plus fine que celle du bassin-versant et leur appréhension par rapport aux autres éléments de l'hydrosystème dans lequel ils évoluent.

L'analyse systémique menée dans le bassin-versant de l'Oued Koriche montre tout d'abord que les crues de 9 novembre 2001 sont le résultat de la combinaison d'un aléa météorologique, géomorphologique et hydrologique fort (cf. *supra*, chapitres 4 à 6), accru par l'anthropisation sauvage du bassin-versant.

Les principaux impacts de l'emprise urbaine dans le bassin-versant de l'Oued Koriche se manifeste au niveau du :

1. *Réseau hydrographique* : une grande partie du réseau hydrographique est artificialisée souvent d'une manière irréversible et, en plusieurs endroits, ce réseau est soustrait totalement de l'environnement urbain. Ces pratiques incitent la population à occuper des zones à haut risque (lit moyen et mineur, zones de confluence des drains élémentaires).

2. *Réseau d'assainissement* : la partie artificialisée du réseau hydrographique est majoritairement enterrée et remplacée par des ovoïdes souterrains sous-calibrés, de structure homogène et uniforme, à tracé direct, soumis en totalité à un fonctionnement gravitaire, adoptant ainsi une logique d'aménagement qui favorise une *évacuation rapide des écoulements vers l'aval*. A noter ici qu'après les grands travaux d'entretien qui ont eu lieu en 2008, le collecteur de l'Oued M'Kacel est désormais fonctionnel sur l'ensemble de son tronçon souterrain. Mais ce n'est pas uniquement la structure interne et le sous-dimensionnement des ovoïdes d'évacuation qui fait défaut dans l'Oued M'Kacel : la partie aérienne (canaux à ciel ouvert, ouvrages hydrauliques de réception, avaloirs), qui assure le passage et la connexion entre les différents éléments du réseau hydrographique, est mal localisée ; tel est le cas des ouvrages hydrauliques de réception Baranes, Scotto Nadal et Jaubert. Les ouvrages hydrauliques de réception présentent une autre anomalie, liée à la non cohérence entre la capacité de l'ouvrage et celle de son canal ovoïdal. On trouve tantôt des ovoïdes avec des capacités d'évacuation supérieures à celle de l'ouvrage de réception, tantôt l'inverse. Un certain nombre d'avaloirs (1 m² de surface) sont placés sur de fortes pentes et dans de telles conditions, la vitesse d'écoulement peut rapidement dépasser la capacité d'absorption des avaloirs.

3. *Occupation du sol* : le bassin-versant de l'Oued Koriche connaît une continuelle croissance urbaine, une croissance qui se fait en absence de plans de prévention de risque. Le mode d'aménagement du bassin-versant de l'Oued Koriche a accru l'aléa hydrologique en modifiant l'organisation spatio-temporelle de la réponse hydrologique et en forçant son caractère polygénique. Mais l'emprise urbaine a également accru le niveau de la vulnérabilité en exposant de plus en plus des enjeux (matériel et humain) à cet aléa. Ainsi, l'analyse fine de l'expansion spatiale du tissu urbain appréhendé par rapport à l'hydrosystème dans lequel il se développe nous laisse perplexe. On relève que des zones rouges (le lit mineur et moyen des oueds et/ou en zone de confluence des segments élémentaires du réseau hydrographique) sont occupées par des écoles, des habitations à forte densité urbaine, ou encore par des marchés et des stations de bus très fréquentés, etc. Alors que l'exutoire du bassin-versant très réactif de l'Oued Koriche n'est autre que le quartier de Bab-el-Oued, un quartier connu par sa forte densité urbaine mais surtout par sa très forte densité de population. L'anthropisation a également augmenté le risque hydrométéorologique à travers certains comportements irresponsables et qui relève d'une grande ignorance du risque existant par la plupart des citoyens. L'une des plus dangereuses de ces pratiques c'est le fait de se servir des berges, des lits des oueds, des canaux à ciel ouvert, des avaloirs et des ouvrages de réception comme décharges sauvages. Une telle pratique augmente l'extension spatiale du risque (crues et inondations) mais surtout peut paralyser le fonctionnement du système hydraulique d'évacuation des eaux pluviales en empêchant les eaux de rejoindre le réseau souterrain. Et c'est bien ce qui s'est passé en 2001, le collecteur de l'Oued M'Kacel n'ayant pas fonctionné et la totalité des eaux s'étant retrouvées en surface.

4. *Politique de gestion et de prévention du risque hydrométéorologique* : à l'échelle nationale, l'Algérie présente un retard en matière de législation dans le domaine de gestion et de prévention des risques majeurs. La loi n° 04-20 de 2004 est l'unique loi qui a réellement traité le sujet. Néanmoins, cette dernière reste jusqu'à présent généraliste et dépourvue de décrets d'applications détaillés. Dans cette sphère et en absence de législation capable de définir

l'ordre et la nature des relations entre les différentes administrations concernées (collectivités locales, urbanisme, travaux publics, hydraulique et assainissement, protection civile, etc.), il reste très difficile voire même impossible de pouvoir mener un travail de coordination efficace. C'est bien cette dernière lacune qui explique en grande partie l'absence d'une politique de gestion de risque hydrométéorologique au niveau des collectivités locales.

Certes, le bassin-versant de l'Oued Koriche a été touché par un fort aléa hydrométéorologique le 10 novembre 2001 mais l'ampleur des dégâts observés ne peut être expliquée uniquement à travers la magnitude de cet aléa. Elle a été forcée par de nombreuses pratiques locales dont les principales sont : l'artificialisation du réseau hydrographique, l'imperméabilisation des surfaces, la structure et l'extension spatiale du tissu urbain (désordre foncier) et son réseau routier, la structure et la capacité d'évacuation du réseau d'assainissement non adaptées ainsi que son état externe et interne très dégradé (l'eau a ruisselé en totalité sans s'infiltrer), l'absence de services d'alerte (les citoyens non pas été alertés le jour de l'événement), l'absence d'un plan ORSEC ou tout autre plan de gestion de crise. Si le plan ORSEC avait pu être déclenché à temps, on aurait pu sauver beaucoup de vies humaines (*i.e.*, un lourd bilan avec près de 1000 morts) ainsi que certains biens matériels.

Chapitre 8

Cartographie et gestion du risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

Introduction

- 8.1. Cartographie du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche
- 8.2. Des approches d'interventions raisonnées à l'échelle du bassin-versant

Conclusion

Introduction

A la lumière de l'ensemble des analyses, des simulations et de calculs réalisés dans les chapitres précédents, on a essayé dans le présent chapitre de produire un support cartographique illustrant le niveau du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. L'inexistence d'un tel document est en grande partie à l'origine de l'ignorance qui règne chez les gestionnaires des collectivités locales et chez les citoyens (les chiffres ne parlent pas à la plupart des gens). Mais la carte de risque comme document à part entière ne présente pas un grand intérêt, il faut que ce document fasse partie intégrante des cartes d'occupation du sol, et à ce niveau vient le rôle du législateur qui doit éditer des lois dans ce sens.

Une fois le risque restitué spatialement, on pourra par la suite proposer des solutions *in situ* de type structurel ou non structurel, qui correspondent au mieux : à la nature du risque, à la nature du terrain et aux moyens techniques, financiers et législatifs disponibles. Néanmoins toute solution proposée doit être basée sur le fait qu'on ne peut pas imaginer Alger sans le quartier de Bab-el-Oued, et qu'il faut bâtir des stratégies qui consistent à conserver le quartier et ce, malgré sa localisation à l'exutoire où les crues peuvent prendre une forme torrentielle. Il s'agit donc de favoriser la pensée qui consiste à *réagir en amont pour protéger l'aval*, même si l'application de cette stratégie est compliquée dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche du fait de sa grande réactivité hydrologique en aval.

8.1. Cartographie du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche

La cartographie du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche est loin d'être une tâche facile. Le risque s'inscrit dans un système très complexe non seulement par son aléa aux multiples facettes (activité cyclogénique, réponse hydrologique de nature pluviale et fluviale...) mais aussi à cause d'une anthropisation aux effets souvent irréversibles (réseau hydrographique fortement artificialisé, réseau d'assainissement défaillant et mal adapté, urbanisation mal maîtrisée, etc. ; cf. chapitre 7).

8.1.1. Carte de l'aléa

La cartographie de l'aléa hydrométéorologique proposée ici se base principalement sur les résultats des analyses effectuées dans les chapitres précédents (analyse hydrogéomorphologique et simulations numériques). Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, on a à faire à trois types d'aléa hydrologique, à savoir : l'aléa de ruissellement superficiel, aléa de débordement du réseau hydrographique et l'aléa lié au débordement du réseau d'évacuation artificiel (réseau unitaire, réseau pluviale). Il faut donc analyser les ruissellements superficiels en tout point du bassin-versant, faire ressortir les axes de concentration et localiser spatialement les points de débordement probables (lit d'oued naturel ou réseau d'évacuation artificiel).

En absence de données météorologiques à fines échelles spatiale et temporelle, on suppose ici que les événements météorologiques qui frappent le bassin-versant de l'Oued Koriche sont homogènes, à savoir que l'ensemble de la surface du bassin-versant reçoit en même temps les mêmes quantités de pluies.

Via la carte de l'aléa, on présente à la fois :

1. La carte des simulations numériques dans laquelle le débit instantané est reproduit en tenant compte des différents paramètres de l'hydrosystème (forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement, système de pentes) ;

2. Les bandes des cellules équidistantes impliquées dans la production du débit de pointe ;

3. Les zones de débordement, dans lesquelles le risque de développement des crues et des inondations locales est élevé. Selon l'origine du débordement, on trouve deux principales catégories : 1) des zones de confluence du réseau hydrographique et des anomalies dans le réseau d'assainissement. Les zones de confluence ont été identifiées grâce à l'analyse du réseau hydrographique effectuée dans le chapitre 4 ; 2) des zones de débordement du réseau d'assainissement : pour la partie souterraine du collecteur de l'Oued M'Kacel, on s'est basé sur les documents cartographiques produits par les bureaux d'études BRGM et ILS (2006). Il s'agit de cartes sur lesquelles sont identifiées les parties du collecteur qui présentent un risque de débordement dû au sous-dimensionnement du réseau d'assainissement (partie souterraine). Dans ce cadre, plusieurs cartes illustrant des scénarios distincts (situations réelles ou supposées) ont été établies, dont les plus importantes sont celles intitulées *Cartes des collecteurs et des débits par sous bassin : Etat actuel* (cf. annexe 8.1), qui identifient les zones où le collecteur de l'Oued M'Kacel présente des déficiences en terme de capacité d'évacuation établie en considérant les conditions de terrain de 2006. Une seconde carte, présentant le même type d'informations, est établie, mais cette fois en supposant que le collecteur de l'Oued M'Kacel est dédoublé par un autre tronçon de 4 m de diamètre. Vu que le deuxième cas est celui d'aujourd'hui, non établi sur le terrain, on a fait le choix dans notre démarche cartographique de prendre en compte les informations fournies par la première carte (fig. 8.1).

Les cartes établies par BRGM et ILS ne mentionnent pas les anomalies que présentent la partie aérienne du collecteur de l'Oued M'Kacel. Ainsi, concernant *la partie aérienne du collecteur*, on a calculé la capacité des ouvrages à ciel ouvert qui assurent le raccordement entre l'ouvrage hydraulique d'évacuation et le lit de l'oued naturel. Les valeurs ainsi calculées sont confrontées au débit instantané (résultat de la simulation hydrologique) destiné à être évacué par les ouvrages à ciel ouvert en question. Suite à cette confrontation, on a pu identifier certaines zones où les canaux sont sous-dimensionnés et ainsi localiser des zones à risque de débordement.

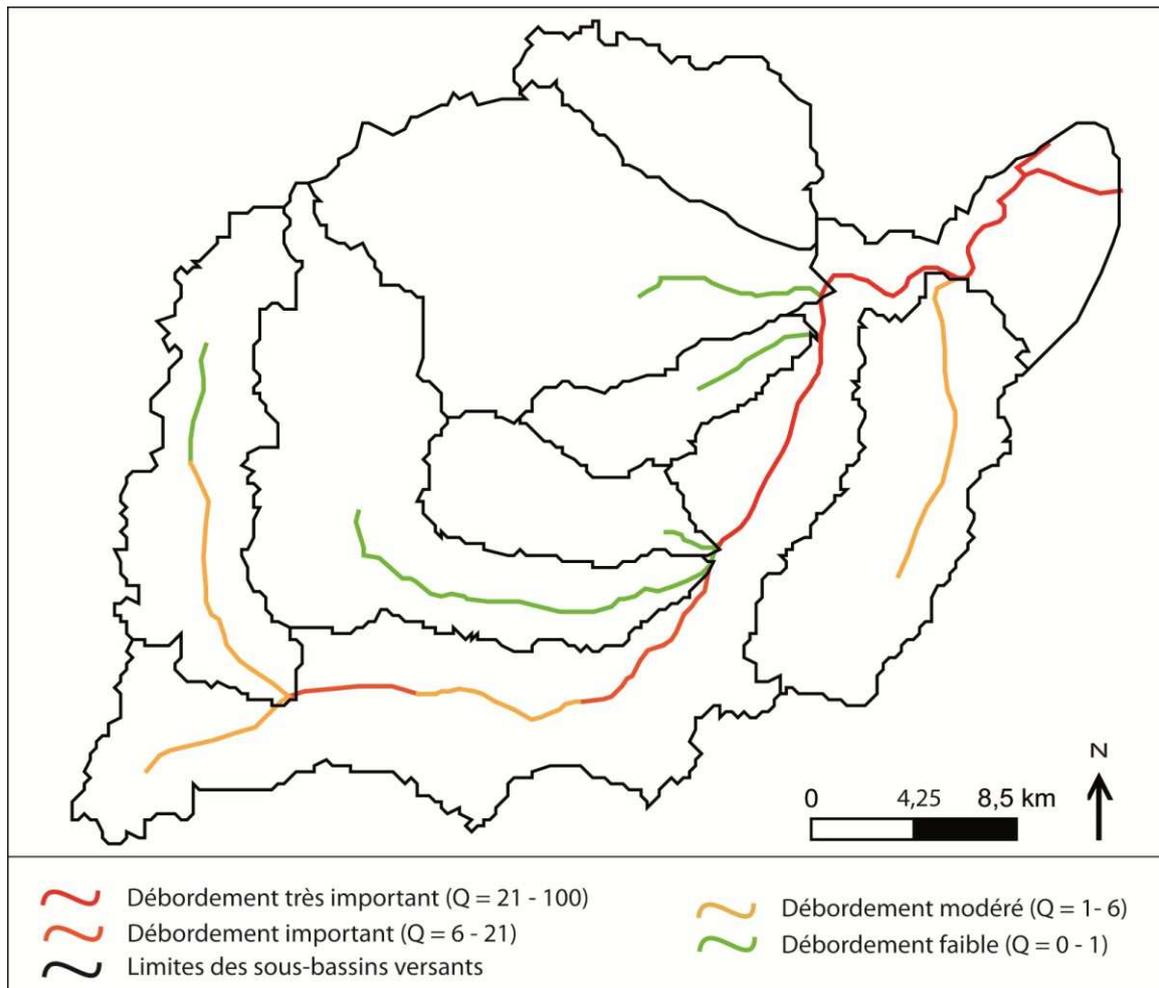


Fig. 8.1. Intensité du débordement du collecteur de l'Oued M'Kacel dans le cas d'une crue de récurrence septennale (modifiée selon BRGM – ILS).

Les cartes établies par BRGM et ILS ne mentionnent pas les anomalies que présentent la partie aérienne du collecteur de l'Oued M'Kacel. Ainsi, concernant *la partie aérienne du collecteur*, on a calculé la capacité des ouvrages à ciel ouvert qui assurent le raccordement entre l'ouvrage hydraulique d'évacuation et le lit de l'oued naturel. Les valeurs ainsi calculées sont confrontées au débit instantané (résultat de la simulation hydrologique) destiné à être évacué par les ouvrages à ciel ouvert en question. Suite à cette confrontation, on a pu identifier certaines zones où les canaux sont sous-dimensionnés et ainsi localiser des zones à risque de débordement.

Les capacités d'évacuation des ouvrages ont été calculées par la formule de Manning-Strickler :

$$Q = K A R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{Equation 14})$$

Où : Q = débit (débit simulé ; m^3/s), A = section transversale mouillée (m^2) ; K = coefficient de rugosité de Manning-Strickler, R = rayon hydraulique et S = pente longitudinale du fond.

$$R = A/P \quad (\text{Equation 15})$$

Où P = périmètre mouillé (m).

$$\text{Cas d'un chenal trapézoïde : } P = 1 + 2y \sqrt{1 + z^2} \quad (\text{Equation 16})$$

$$\text{Cas d'un canal rectangulaire : } P = 1 + 2y \quad (\text{Equation 17})$$

La section mouillée (A) est donnée par l'équation :

$$\text{Cas d'un chenal trapézoïde : } A = (1 + z y) y \quad (\text{Equation 18})$$

$$\text{Cas d'un canal rectangulaire : } A = l y \quad (\text{Equation 19})$$

Où l = largeur du fond et z = facteur de pente des parois latéraux.

$$z = 1/\tan \alpha \quad (\text{Equation 20})$$

a. *Canal à ciel ouvert de Baranes* : il s'agit d'un canal de forme rectangulaire de 1,5 m de largeur et de 1 m de hauteur. Il est doté d'une pente (pente longitudinale du fond) très faible de l'ordre de 0,05 %. Il s'agit d'un ouvrage revêtu de béton coulé non fini, ce qui lui attribue un coefficient de rugosité équivalant à 66,67. En appliquant l'équation de Manning-Strickler, la pleine capacité de l'ouvrage de Baranes est égale à 4 m³/s. Sachant que le débit maximum généré à cet endroit et destiné à être évacué par l'ouvrage est de 3,2 m³/s, on déduit donc que l'ouvrage est théoriquement capable d'évacuer l'ensemble des eaux générées en amont. Néanmoins, le risque de débordement local n'est pas pour autant nul car en tenant compte de son niveau d'entretien, le canal ne peut fonctionner à pleine capacité. On a ainsi un niveau de débordement faible à moyen.

b. *Canal à ciel ouvert de Sidi Medjber* : cet ouvrage a une forme rectangulaire de 5,5 m de largeur en moyenne et une hauteur de 1,5 m. La pente longitudinale du fond est estimée à 0,06 %, elle est donc très faible. L'ouvrage est revêtu de béton coulé non fini, ainsi son coefficient de rugosité sera de l'ordre de 66,67. La pleine capacité d'évacuation de l'ouvrage Sidi Medjber est équivalente à 13,21 m³/s. Le débit généré en amont de cet ouvrage est équivalent à 24 m³/s. Ainsi, près de la moitié des écoulements arrivés de l'amont au moment de la crue maximale déborde sur la route et la zone urbaine développée en parallèle du canal à ciel ouvert. On retient dans ce cas un niveau de débordement élevé.

c. *Canal à ciel ouvert de Scotto Nadal* : cet ouvrage a également une forme rectangulaire. Le fond de l'ouvrage fait 1,5 m de largeur, sa hauteur est de 0,6 m et la pente longitudinale du fond est de l'ordre de 0,44 %. Il est fait de briques soigneusement construites. En tenant compte de la nature de ses parois, on lui attribue un coefficient de rugosité équivalant à 76,92. Ainsi paramétré, la capacité maximale de l'ouvrage sera égale à 2,19 m³/s, elle est de ce fait à peu près équivalente au débit maximal des écoulements générés à son amont. Ainsi, on retient un niveau de débordement moyen dans cette zone.

b. *Canal à ciel ouvert de Jaubert* : l'ouvrage est de forme rectangulaire, de 1,5 m de largeur et de 0,8 m de hauteur. La pente longitudinale du fond est de l'ordre de 0,15 %. L'ouvrage est revêtu de béton coulé non fini, son coefficient de rugosité est alors équivalant à 66,67. Le canal à ciel ouvert Jaubert est capable d'évacuer un débit maximal de 1,65 m³/s. Cet ouvrage est destiné à évacuer l'ensemble des eaux ruisselantes de la partie amont du sous-bassin-versant Jaubert (en amont de la carrière de Jaubert). Sachant que le débit de pointe qui peut être produit dans cette partie du bassin-versant varie entre 3,5 et 4 m³/s, le canal à ciel ouvert de Jaubert est ainsi sous-dimensionné et il ne sera pas capable d'évacuer l'ensemble

des eaux provenant de l'amont et les débordements à cet endroit seront fréquents et importants. De ce fait, on attribue à cette zone un niveau de *débordement élevé et fréquent*. Ici même, si les volumes supposés déborder ne sont pas très importants en comparaison avec l'ouvrage de Sidi Medjber par exemple, ils présentent toute de même un risque important et ce, en raison de la forte pente de la route empruntée par les eaux débordantes, qui atteignent rapidement des vitesses importantes, gênant voire empêchant la circulation des personnes (cf. chapitre 7).

Les seuils de l'aléa crue et ruissellement superficiel, qui conditionnent la circulation des gens et des automobiles, seront présentés sous forme de hauteur et de vitesse d'eaux et fixés selon ceux proposés dans le plan de prévention du risque d'inondation (P.P.R.I) adopté en France (fig. 8.2).

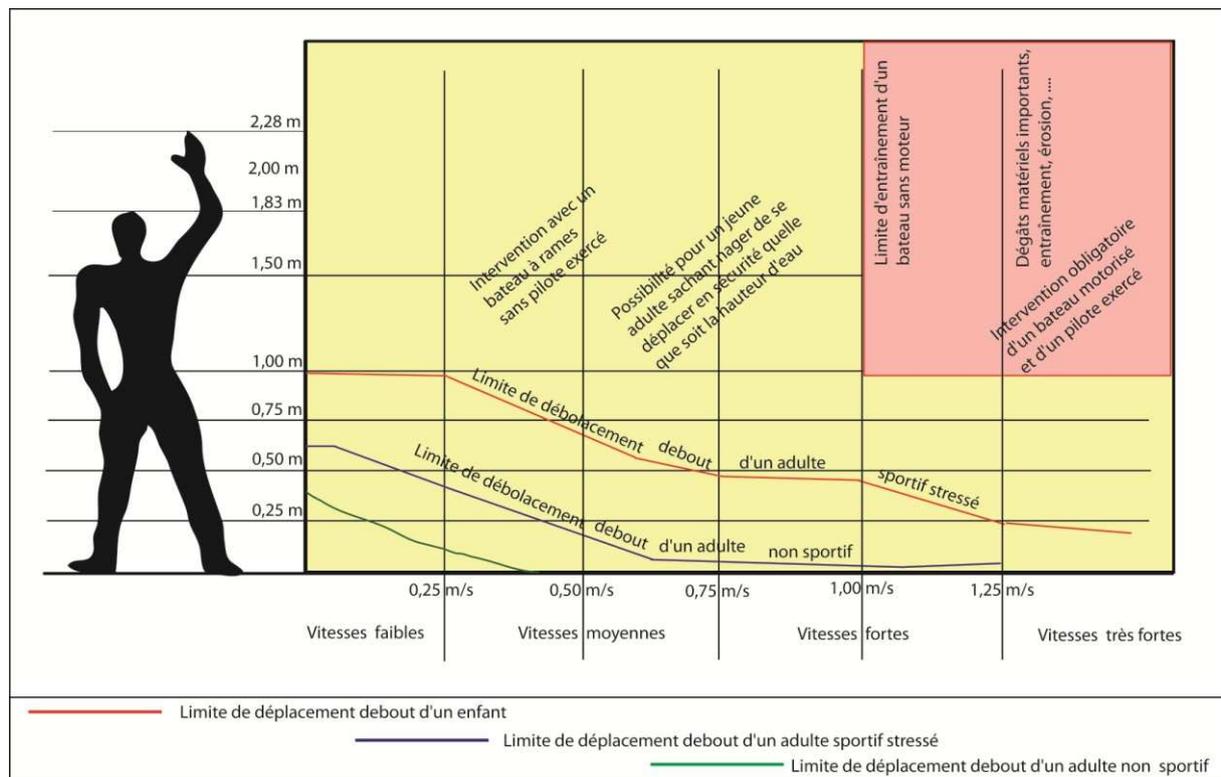


Fig. 8.2. Danger lors du déplacement des personnes dans l'eau (source : DDE du Vaucluse).

Les vitesses et les hauteurs d'eau atteintes le jour de l'événement du 10 novembre 2001 sont également estimées. Les valeurs sont calculées *via* les débits instantanés simulés auparavant (cf. chapitre 6). Les débits se sont convertis en hauteur et en vitesse d'eau grâce à la formule de Manning-Strickler (cf. équation 14).

On assimile le comportement hydrologique observé sur la voie Chevalet-Triolet à celui d'un trapézoïde circulant en régime régulier et uniforme. En d'autres endroits de la voie rapide, le comportement hydrologique est assimilé plutôt à celui d'un chenal rectangulaire du fait que la route est bordée de hauts murs de part et d'autre de ces extrémités.

Dans le cas d'un chenal trapézoïdal, les versants qui bordent la voie rapide sont considérés comme infiniment large et donc :

$$R = y$$

$$(Equation 21)$$

Concernant le canal rectangulaire, le rayon hydraulique R est calculé en utilisant l'équation 15 ci-dessus.

Ici, le coefficient de rugosité de Manning-Strickler (K) est mixte vu que la nature du lit mineur et celle des berges du bassin-versant sont différentes. Pour calculer K mixte, on a eu recours à l'équation 19 (Degoutte, 2006). En tenant compte que le milieu est différent le long de la voie rapide Chevalet-Triolet, plusieurs coefficients de rugosité seront par la suite calculés.

$$\text{Cas d'un chenal trapézoïde : } K = 0,9 K_m^{5/6} K_M^{1/6} = 56,33 \quad (\text{Equation 22})$$

$$\text{Cas d'un canal rectangulaire : } K = 76,92 \quad (\text{Equation 23})$$

Où K_m = coefficient de rugosité du lit mineur et K_M = coefficient de rugosité du lit majeur.

La pente longitudinale du fond est supposée égale à 5 % (cf. chapitre 4).

$L = [20-25]$ équivalente à la largeur de la route.

α des versants [15-25] (cf. chapitre 4)

$$\alpha = 15 \quad z = 3,73 \text{ m}$$

$$\alpha = 25 \quad z = 2,14 \text{ m}$$

On adopte pour la suite une valeur moyenne de $Z = 3$ m.

On déduisant y de la formule de Strickler, on obtient :

$$y = Q^{3/5} k^{-3/5} L^{-3/5} i^{-3/10} \quad (\text{Equation 24})$$

Où L = largeur au miroir. Selon la forme du chenal, cette valeur diffère :

$$\text{Cas d'un chenal trapézoïde : } L = 1 + 2z y \quad (\text{Equation 25})$$

$$\text{Cas d'un canal rectangulaire : } L = 1 \quad (\text{Equation 26})$$

On remplaçant L par sa valeur équivalente dans l'équation 23, on en déduit :

$$\begin{aligned} \text{Cas d'un chenal trapézoïde : } Q^{3/5} k^{-3/5} i^{-3/10} &= y (1 + 2z y)^{-3/5} \\ 8z^3 y^8 + 12lz^2 y^7 + 6l^2 z y^6 + l^3 y^5 - (Q^{3/5} k^{-3/5} i^{-3/10}) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Equation 27})$$

$$\text{Cas d'un canal rectangulaire : } y = Q^{3/5} k^{-3/5} l^{-3/5} i^{-3/10} \quad (\text{Equation 28})$$

L'application numérique des équations 27 et 28 donne :

$$216 y^8 + 2160 y^7 + 7200 y^6 + 8000 y^5 - (Q^{3/5}/4125) = 0 \quad (\text{Equation 27a})$$

$$y = Q^{3/5}/33,25 \quad (\text{Equation 28a})$$

On a choisi de calculer la hauteur et la vitesse d'eau correspondant à quatre endroits différents de la voie rapide Chevalet-Triolet : un premier point en amont du bassin-versant, deux points au niveau du bassin moyen et un dernier point à l'entrée du quartier de Bab-el-Oued. Selon les bureaux d'étude ILS et BRGM (2006), la crue centennale sera dotée d'un débit de pointe de l'ordre de 200 m³/s. En utilisant les mêmes équations développées ci-dessus, on a calculé la hauteur et la vitesse d'écoulement probables en aval suite à un événement centenal.

Du fait que le long de la voie rapide, la section d'écoulement passe d'un chenal de forme trapézoïdale à un autre de forme rectangulaire et *vice versa*, un passage qui se fait d'une manière irrégulière et qui connaît une évolution spatio-temporelle continue, on a décidé d'estimer la vitesse et la hauteur d'eau pour chacun des quatre points en assimilant la section d'écoulement d'abord à un trapézoïde puis à un canal de forme rectangulaire. Les résultats sont représentés dans le tableau 8.1.

Tableau 8.1. Estimation des hauteurs et vitesses d'eau qui peuvent être générées dans le bassin-versant de l'Oued Koriche suite à un événement météorologique équivalent à celui des 9-10 novembre 2001, ou à un événement centennal.

	Points de mesures	Forme du canal	Débit (m ³ /s)	Hauteur (cm)	Vitesse (m/s)
Crue du 10 novembre 2001	Point 1 (Aval)	Trapézoïde	88 m ³ /s	42 cm	9,85 m/s
		Rectangle	88 m ³ /s	44 cm	10 m/s
	Point 2 (bassin_moyen)	Trapézoïde	79 m ³ /s	40 cm	9,31 m/s
		Rectangle	79 m ³ /s	41 cm	9,63 m/s
	Point 3 (bassin_moyen)	Trapézoïde	55 m ³ /s	32,8 cm	7,94 m/s
		Rectangle	55 m ³ /s	33,3 cm	8,25 m/s
	Point 4 (Amont)	Trapézoïde	44 m ³ /s	28,9 cm	7,29 m/s
		Rectangle	44 m ³ /s	29,1 cm	7,56 m/s
Crue centennale théorique	Aval	Trapézoïde	200 m ³ /s	67 cm	13,56 m/s
		Rectangle	200 m ³ /s	72 m	13,85 m/s

Selon les normes utilisées dans le PPRi (fig. 8.2), la circulation des personnes (un adulte sportif) doit être interdite quand la vitesse des écoulements dépasse les 1,15 m/s et cela même si les hauteurs d'eau restent faibles (< 25 cm). La circulation des automobilistes est également interdite au-delà d'une hauteur d'eau de l'ordre de 13,7 cm et d'une vitesse équivalente à 3,6 m/s (BRGM - ILS 2006). Les normes données ici concernent des eaux claires et non des eaux chargées, et plus les eaux sont chargées plus les seuils sont sévères.

En comparant les valeurs (hauteur, vitesse) calculées ci-dessus et les seuils fixés par les normes, on trouve que ces dernières sont de 5 (en amont) à près de 9 fois (en aval) inférieures aux vitesses et hauteurs d'eau générées par l'événement des 9-10 novembre 2001, ce qui explique la gravité des dégâts en particulier en terme de vies humaines observée ce jour là. Ainsi, de l'amont vers l'aval, la voie rapide Chevalet-Triolet et les zones à proximité immédiate (les versants qui la bordent) sont dotées d'un aléa hydrométéorologique très fort (crues rapides à torrentielles) : la circulation (piétonne, automobiliste) sur la voie rapide ne doit être maintenue qu'au prix d'une très haute vigilance.

A noter ici que les valeurs de hauteur et de vitesses d'écoulement sont calculées *via* les débits estimés avec le logiciel *Ruicells* (cf. chapitre 6) : elles sont plus faibles que celles évaluées par les bureaux d'études ILS BRGM (2006). Si on se base sur ces dernières dans nos calculs, les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement seront encore plus élevées que celles

données dans le tableau ci-dessus (*i.e.*, en tenant compte des limites de notre simulation numérique, les valeurs obtenues ici sont à prendre avec précaution. Cette démarche a été menée dans le but de démontrer la hauteur de l'aléa et non pour avancer des valeurs de vitesse et de hauteur d'eau extrêmement précises).

En tenant compte des fortes pentes dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, les écoulements développés par le réseau hydrographique, qui reste encore aujourd'hui à l'état plus au moins naturel, génère un niveau d'aléa fort sur l'ensemble de son lit mineur.

On distingue en totalité quatre niveaux d'aléa dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : *un aléa très fort* attribué au talweg principal qui draine le bassin-versant ainsi qu'aux zones favorables aux débordements (zones de confluence, débordement du réseau d'assainissement) ; *un niveau d'aléa fort* est attribué aux lits mineurs des talwegs principaux des sous-bassins versants ; *un aléa modéré* aux segments élémentaires de premier ordre du réseau hydrographique (les cumuls d'écoulement circulant dans ces derniers sont 300 fois moindres que les volumes d'eau circulant dans le talweg principal du bassin-versant) ; et enfin *un niveau d'aléa faible* attribué au reste du bassin-versant (zones soumises au ruissellement superficiel hors zone de concentration). La répartition spatiale de l'aléa hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche est présentée *in* fig. 8.3.

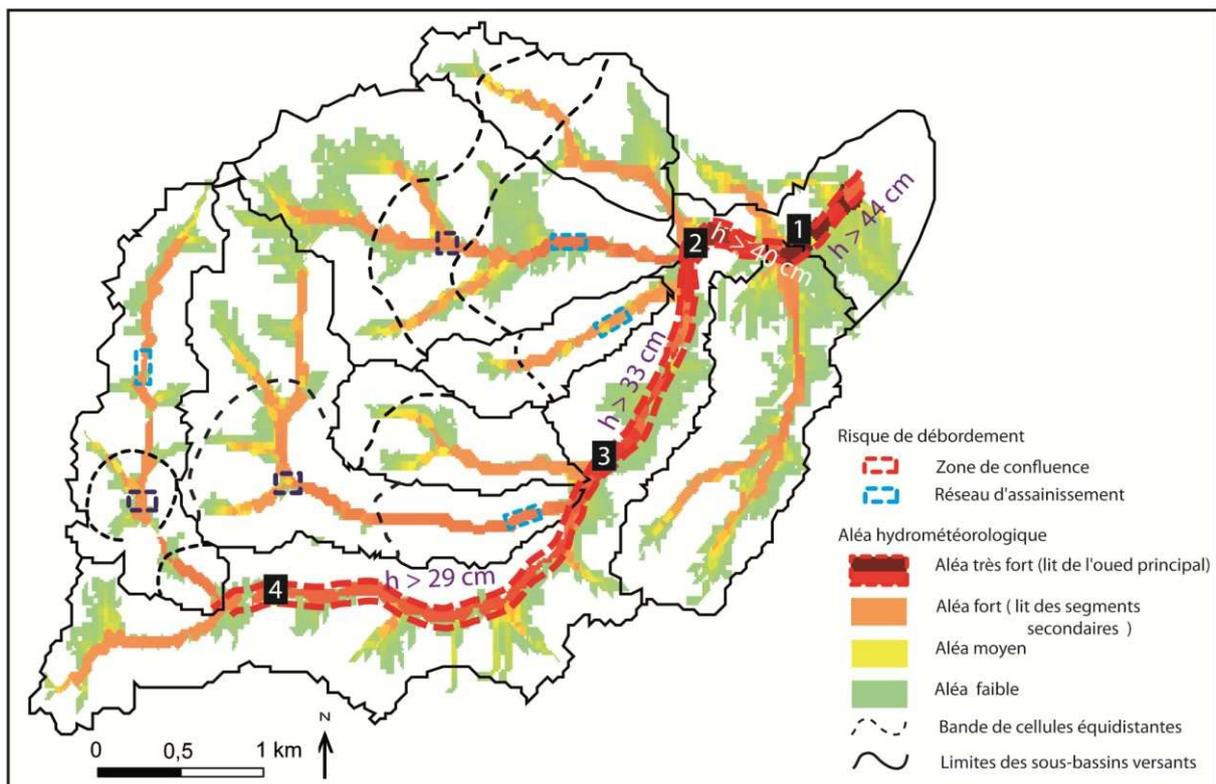


Fig. 8.3. Carte de l'aléa hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

8.1.2. Carte de vulnérabilité

La « vulnérabilité », telle qu'elle est entendue dans notre travail, se limite au sens physique du terme, faisant uniquement référence à l'exposition de la surface physique face à l'aléa (cf. chapitre 6). Ainsi, la cartographie de la vulnérabilité se fait dans cette partie sur la

base de la carte d'occupation des sols ; les niveaux de vulnérabilité sont donc fixés en fonction du mode d'occupation des sols. On distingue quatre niveaux de vulnérabilité dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (fig. 8.4) : un niveau de vulnérabilité *très fort* en zone urbaine dense et sur les routes, un niveau de *vulnérabilité fort* en zones à tissu urbain dispersé, un niveau de *risque moyen* en zone industrielle et un niveau de *vulnérabilité faible* dans les forêts, les espaces verts et les sols nus.

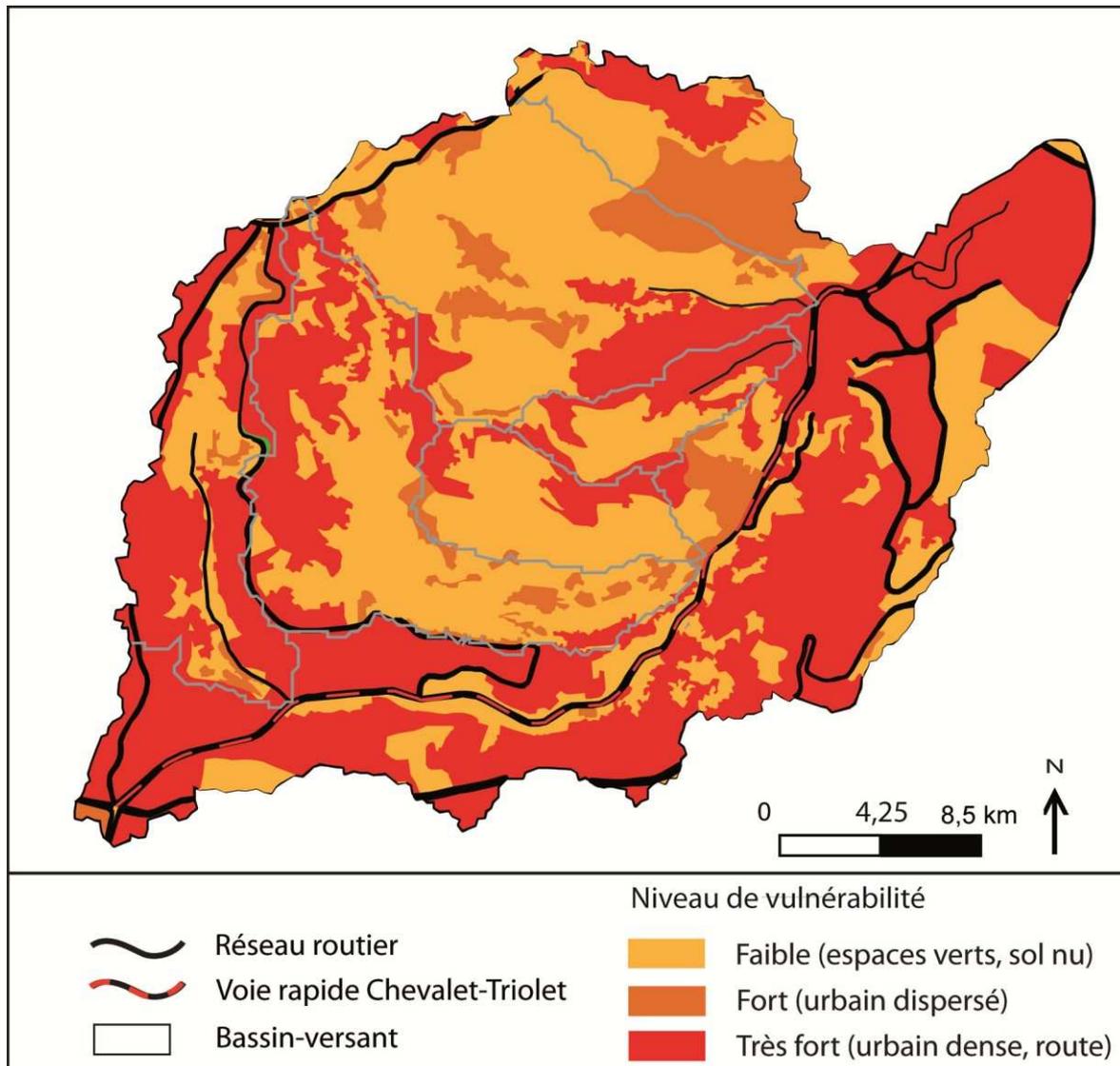


Fig. 8.4. Carte de vulnérabilité versus risques hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

8.1.3. Carte de risque

La carte du risque est le produit de la confrontation de la carte de l'aléa avec celle de la vulnérabilité. La définition des différents niveaux de classes du risque est faite selon les normes d'une hiérarchisation communément utilisée (Ledour, 2006 ; tableau 8.2).

Tableau 8.2. Hiérarchisation des différents niveaux du risque déduits par le croisement des classes de l'aléa et celles de la vulnérabilité.

Niveau d'aléa	Niveau de vulnérabilité		
	Très fort	Fort	Faible
Très fort	Très fort	Fort	Faible
Fort	Fort	For	Faible
Modéré	Modéré	Modéré	Faible
faible	Faible	Faible	Faible (très faible)

Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche, on a identifié quatre niveaux d'aléa et trois niveaux de vulnérabilité différents ; le croisement du document cartographique de l'aléa est celui de la vulnérabilité selon les règles définies dans le tableau 8.2. Il a permis d'obtenir une carte de risque de crue et de ruissellement superficiel à trois niveaux de risque distincts (fig. 8.5). A noter ici que cette carte du risque est produite selon les conditions d'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité fixées dans le cadre de ce travail (cf. chapitre 6).

On observe un niveau de risque très fort le long de la voie rapide Chevalet-Triolet et dans les sous-bassins-versants de Baranes et Chemin du Fort. Sur ces trois sites, le niveau de risque très fort est le résultat d'un même cas de figure : il s'agit du talweg principal (bassin-versant ou sous-bassins versants) enterré, canalisé et remplacé en surface par une route, au bord de laquelle un tissu urbain dense s'est développé. Le réseau de canalisation destiné à remplacer le talweg naturel est souvent sous-dimensionné, mal conçu et non adapté à la nature et la hauteur des écoulements générés dans le bassin-versant. A l'ensemble des anomalies structurales que présente le réseau artificiel, il faut rajouter le fait que sa partie aérienne est très mal entretenue (cf. chapitre 7). Dans le cas de la voie rapide, les crues sont alimentées par les écoulements venant des différents sous-bassins-versants constitutifs de l'Oued Koriche, des écoulements pourtant destinés à être collectés et évacués théoriquement par le collecteur de l'Oued M'Kacel (canal à ciel ouvert, ouvrage hydraulique de réception, réseau souterrain). Cependant, une bonne partie des écoulements formés dans les sous-bassin-versants rejoint la voie rapide. Ce dysfonctionnement est lié principalement au : 1) *mauvais positionnement de certains ouvrages hydrauliques* comme dans le sous-bassin-versant du Baranes, où l'ouvrage de réception se situe en amont bien avant la bande des cellules équidistantes productives du pic de la réponse hydrologique ; ainsi, il faut s'attendre à ce que la grande majorité des écoulements produits au niveau de Barenès ne puisse rejoindre le collecteur souterrain et circule sur la route qui le longe pour rejoindre la voie rapide à son exutoire ; 2) les ouvrages sont également, dans certains cas, *mal conçus et sous-dimensionnés* comme dans le cas du sous-bassin-versant du Chemin du Fort où le canal à ciel ouvert qui assure le passage entre le cours d'eau naturel et l'ouvrage hydraulique de réception est sérieusement sous-dimensionné.

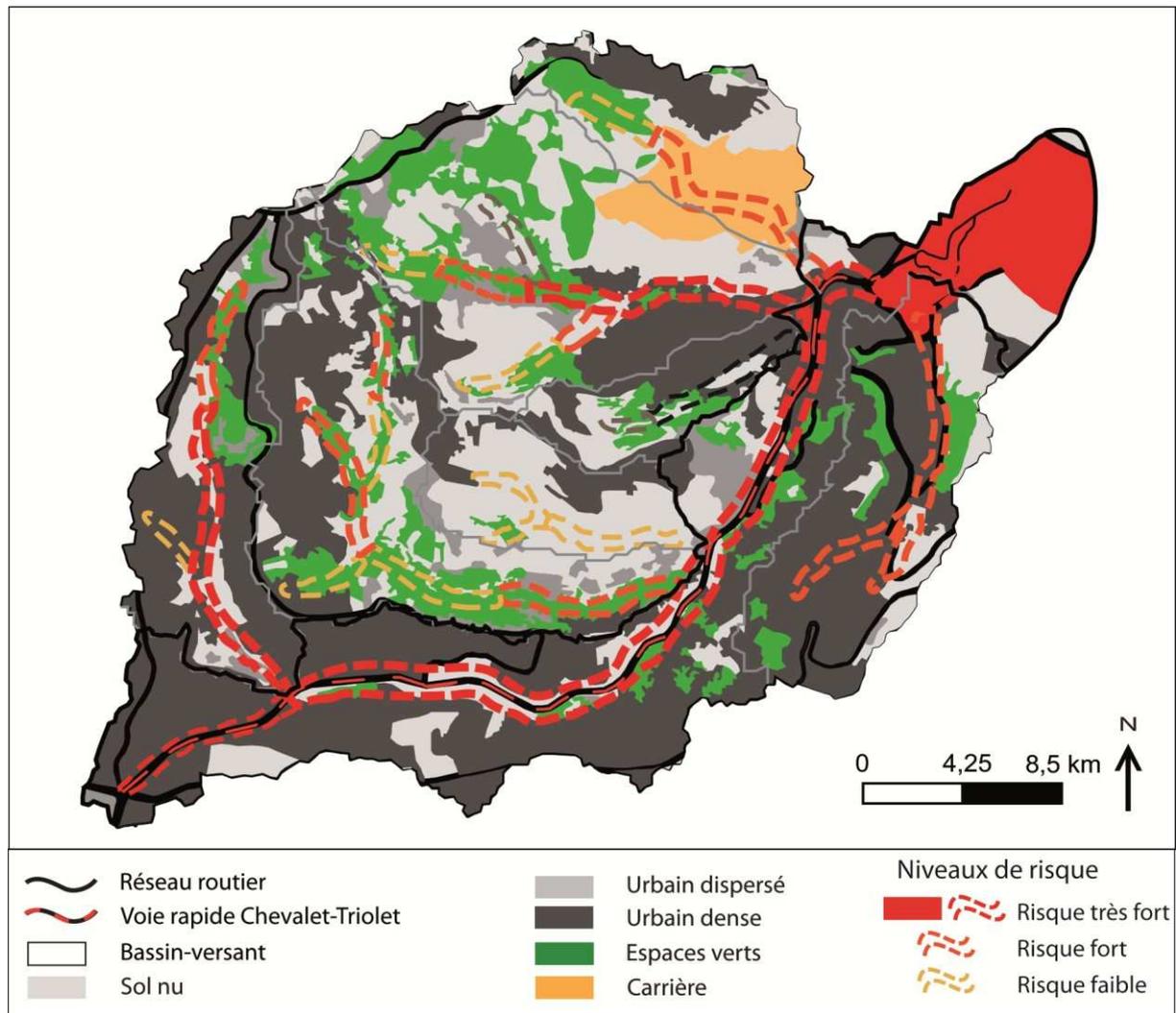


Fig. 8.5. Carte du risque hydrométéorologique dans le bassin versant de l'Oued Koriche.

En aval de l'ouvrage de réception Jaubert, le canal à ciel ouvert, conçu pour récupérer le surplus en cas de besoin et collecter et évacuer les ruissellements superficiels développés en amont, n'assure pas sa fonction à cause de nombreuses anomalies (cf. chapitre 7) ; 3) *la structure interne de la partie souterraine du collecteur* : en dehors du fait que le collecteur de l'Oued M'Kacel est conçu pour évacuer des écoulements d'ordre décennal, il présente de nombreux autres problèmes structurels : la croissance de la capacité d'évacuation du collecteur de l'amont vers l'aval n'est pas équivalente à celle des surfaces drainées, ce qui a causé son effondrement le jour de l'événement 2001.

On relève aussi un niveau de risque très fort au bord des routes, conçues au-dessus des talwegs enterrés. Un tissu urbain très dense s'est installé avec le temps, une urbanisation qui se développe en totale ignorance de la présence du réseau hydrographique. Ainsi, par leur positionnement, ces constructions sont fortement exposées aux écoulements concentrés le long de la route. Un tel constat est le résultat direct d'une politique de gestion ultérieure qui a consisté à faire disparaître entièrement le réseau hydrographique du paysage environnant de la ville.

Un niveau de risque fort, présenté sur la carte avec une couleur orange foncée, est observé en différents endroits du bassin-versant : en amont du sous-bassin-versant Baranes, dans le nord-ouest et en aval du sous-bassin-versant de Sidi Medjber, en amont du Chemin du Fort et dans le sous-bassin de Birtraria. Un niveau de risque fort produit par la combinaison d'un niveau d'aléa fort, provoqué par la présence du réseau hydrographique (lit mineur), et un niveau de vulnérabilité fort dû à l'urbanisation. Ainsi, *la majorité des zones à risque fort sont le résultat d'une extension urbaine à proximité du réseau hydrographique secondaire.*

Le reste du bassin-versant de l'Oued Koriche présente un niveau de risque faible (voire très faible). Il s'agit soit de surfaces non urbanisées (sol nu, couvert végétal), soit de zones urbaines éloignées du réseau hydrographique théorique, des linéaires de concentration des écoulements et des zones de débordement.

8.2. Des approches d'interventions raisonnées à l'échelle du bassin-versant

Après avoir analysé, évalué et cartographié le risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, il convient maintenant de proposer des actions à mener afin de le réduire. La réduction du risque se fait à travers une réduction de l'aléa et/ou de la vulnérabilité et selon qu'on vise à éteindre l'un ou l'autre des aspects, les modes et les techniques d'intervention diffèrent.

« 40 MILLIONS DE DINARDS POUR UN DISPOSITIF DE PROTECTION. Bab-el-Oued ne connaîtra plus d'inondation » (Mesbah, 2010), c'est ainsi qu'un journaliste au journal Le Quotidien a intitulé un article écrit à la lumière des propos tenus par le ministre des ressources en eau et le directeur de l'Assainissement et de la Protection de l'Environnement. Dans cet article l'auteur présentait les projets entrepris ou envisagés par l'Etat afin de protéger les villes algériennes des inondations. Le titre de cet article est d'apparence anodin mais en réalité, il est d'une extrême dangerosité : il laisse croire aux lecteurs que le risque hydrométéorologique est définitivement éliminé (risque 0) dans le quartier de Bab-el-Oued ; or, c'est loin d'être le cas sur le terrain. D'une manière générale, pouvoir éliminer durablement le risque avec des solutions radicales nécessite de pouvoir évaluer avec certitude le risque maximal et définir avec précision les mécanismes qu'ils l'ont induit, chose qui reste très difficiles voire impossible avec les connaissances scientifiques et la technologie dont on dispose actuellement.

Notre démarche ici s'éloigne de la médiatisation et des promesses politiques, elle s'inscrit dans une autre idéologie : on part du principe que le risque 0 n'existe pas, on ne peut donc que le réduire dans le cadre climatique, hydrologique, technique, financier et juridictionnel du territoire dans lequel il s'inscrit. Un cadre qui met de multiples acteurs en jeu, qui doivent discuter et fixer ensemble le *niveau de risque acceptable* (Etat, experts, économistes, écologiste, financiers, élus, citoyens). Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche, des obstacles supplémentaires viennent se rajouter, certaines liées aux caractéristiques intrinsèques du risque hydrométéorologique (risque à multiples facettes inscrit dans un système

complexe), d'autres liés à l'environnement (milieu anthropisé d'une manière irréversible, absence d'une gestion intégrée du risque, manque de moyen de prévision et de prévention...).

8.2.1 Gestion intégrée du risque

Nous nous sommes basés dans cette partie sur la démarche de gestion du risque développée dans le chapitre 1, qui est une démarche organisée en plusieurs phases qui se succèdent dans le temps, en impliquant progressivement les différents acteurs du milieu. Nous avons essayé dans ce qui suit de mettre la lumière l'état actuel de la gestion du risque et de discuter ce qu'il reste à faire (souligner les anomalies, proposer des aménagements ; Ayrault *et al.*, 2004 ; Rivard *et al.*, 2005 ; Ledoux, 2006).

8.2.1.1. Prévision

La prévision est l'une des étapes les plus importantes dans une démarche de gestion du risque. La prévision d'un aléa à caractère intense ne peut pas empêcher sa survenue ; en revanche, elle peut être un facteur déterminant en termes de dommages occasionnés. Plus la prévision est rapide, plus le temps d'anticipation est large et moins sera la hauteur des dégâts, notamment en matière de perte en vies humaines.

A. Prévision météorologique

La prévision du risque hydrométéorologique passe tout d'abord par une prévision de l'événement météorologique, qui reste le premier facteur de la réponse hydrologique.

Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, lors de l'événement des 9-10 novembre 2001, on ne disposait que d'une station météorologique traditionnelle (un seul point de mesure) dans laquelle les prélèvements pluviométriques s'effectuent toutes les 12 h. Une telle donnée n'a guère d'importance dans le cas de l'Oued Koriche et ce, pour plusieurs raisons : 1) les événements météorologiques qui frappent le bassin-versant sont caractérisés par une activité cyclogénétique spatialement localisée de courte durée, ce qui fait que les cumuls prélevés toutes les 12 h ne permettent pas d'identifier et de localiser temporellement le ou les pics pluvieux importants ; 2) le fait de disposer, sur la totalité de la surface du bassin-versant, d'un seul capteur de pluies peut conduire à une évaluation (cumul et intensité) complètement erronée de l'épisode pluvieux. La non disponibilité des données météorologiques à une échelle spatio-temporelle suffisamment fine reste l'un des grands handicaps de toute démarche de compréhension et de reproduction du scénario de la catastrophe de novembre 2001. Ainsi, pour décrire l'intensité de l'événement ou encore pour réaliser des analyses et des simulations hydrologiques, on dispose uniquement de hyétoigrammes approximatifs, *le hyétoigramme réel de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 n'existant pas*. La répartition spatiale de l'événement météorologique quant à elle reste inconnue et donc l'événement est supposé être homogène sur l'ensemble du bassin-versant. Tant de suppositions qui s'accumulent pour produire à la fin une marge d'erreur assez large, ce qui pouvait bien être évitée si on avait disposé d'une station de mesure sophistiquée et adaptée à la nature météorologique de la région. D'autant plus que le bassin-versant de l'Oued Koriche est doté d'une réponse hydrologique rapide (environ 1 h) : pour prévenir une probable crue et, par la suite, lancer l'alerte, il faut absolument disposer de données instantanées.

Actuellement, cet obstacle, ou du moins l'acquisition de la donnée météorologique en temps réel, semble être surmonté. Le 11 juin 2011, a eu lieu le lancement officiel du réseau CHEMS, qui est un réseau de mesure du rayonnement solaire et du potentiel éolien en Algérie. La première station de cette série se situe au niveau de la Station de Mesure Radiométrique et Météorologique de Bouzareah (CDER ; 345 m d'altitude, latitude 36,8°, longitude 3°). Il s'agit d'une station de mesure professionnelle équipée par des appareils de mesure modernes, disposant de trois pyranomètres, d'un pyréliomètre, d'un *sun tracker*, de plusieurs capteurs pour la mesure de la température, de l'humidité, de la pluviométrie, de la pression et de la durée d'insolation, d'un capteur à ultrasons pour la mesure de la vitesse et de la direction du vent et d'un *data logger*. Les mesures du rayonnement solaire et des différents paramètres météorologiques sont mises à jour toutes les 5 min et présentées en temps réel sur la page internet du CDER (fig. 8.6 ; CDER, 2012).

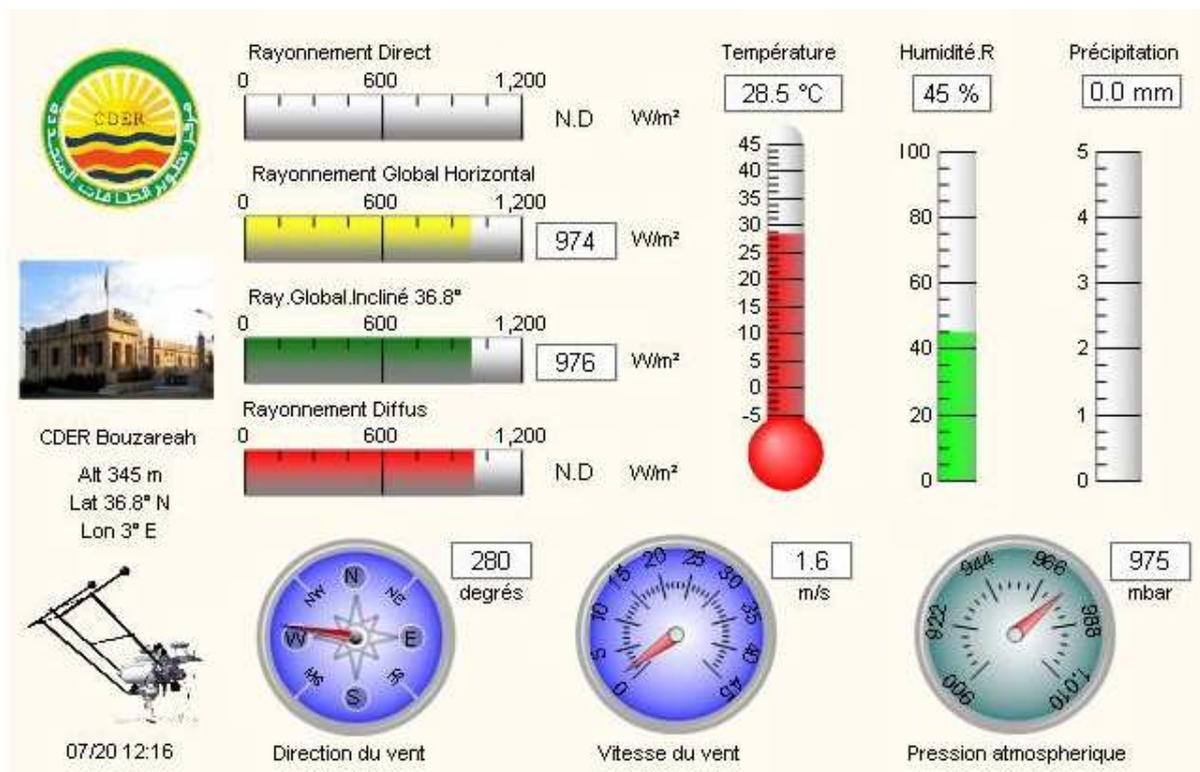


Fig. 8.6. Configuration des mesures radiométriques et météorologiques diffusées en temps réel par CDER.

B. Prévision hydrologique

Les prévisions météorologiques sont très nécessaires mais ces informations à l'état brut ne sont pas suffisantes pour pouvoir fixer le bon moment et le bon niveau de l'alerte à déclencher. Pour pouvoir évaluer le risque réel encouru sur le terrain et déclencher le niveau d'alerte correspondant au bon moment (alerte orange, alerte rouge...), il faut que l'information météorologique se transforme en une information hydrologique (débit, vitesse, hauteur d'eau). La disposition des informations concernant l'inscription hydrologique probable de l'événement météorologique sur le terrain permet également de bien anticiper la crise. Pour pouvoir transmettre en temps réel l'information météorologique en une information hydrologique, il est indispensable de disposer d'une station hydrométéorologique.

Concernant le bassin-versant de l'Oued Koriche, après la mise en marche de la nouvelle station météorologique SHAMS, il est plus que jamais possible de produire ce type de données. En réalité, ce qui coûte le plus cher, ce sont les appareils sophistiqués d'acquisition en temps réel de la donnée météorologique. Avec la station SHAMS, cette question ne se pose plus dans l'Oued Koriche, ni dans les régions avoisinantes d'ailleurs. Ce qu'il reste à faire est de relier la station SHAMS à un centre de calcul hydrologique capable de modéliser les mécanismes de genèse des crues et d'inondation et transformer ainsi, en temps réel, la donnée météorologique en une donnée hydrologique et, selon les seuils adoptés (fig. 8.2), un niveau d'alerte adéquat se déclenchant le plus rapidement possible.

En parallèle des prévisions en temps réel, il ne faut pas négliger les prévisions à moyen et long termes. Actuellement, les météorologues sont capables de fournir, à l'échelle de quelques jours, des prévisions avec un bon niveau de certitude. Ainsi, il est possible de localiser l'échelle spatiotemporelle d'un probable risque hydrométéorologique et, par la suite, prêter une attention particulière à cette région et y renforcer la surveillance en temps réel.

8.2.1.2. Alerte

L'alerte est généralement donnée par la collectivité locale dont les services sont supposés être en contact permanent avec les services de prévision. Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche et de même pour la plupart des régions algériennes, la Mosquée, qui existe dans toute agglomération algérienne, reste un moyen très efficace et totalement gratuit pour lancer l'alerte à la population. Les mosquées sont toutes dotées d'un minaret équipé de hauts parleurs destinés à faire entendre l'appel à la prière à l'ensemble des habitants de l'agglomération. Le lancement de l'alerte avec les minarets des mosquées peut être un réel gain de temps et d'argent. L'alerte doit être également donnée *via* les médias audio et audiovisuels, par téléphone et/ou par sms.

8.2.1.3. Anticipation

Une fois l'alerte donnée, il faut anticiper la crue. Les moyens et les mécanismes d'anticipation diffèrent selon le niveau de l'alerte et la nature du territoire concerné. Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, le risque hydrométéorologique a de multiples facettes (ruissellement superficiel, inondation et crue). Pour cette raison, plusieurs agents et moyens doivent être mobilisés : 1) zone de ruissellement : le bassin-versant de l'Oued Koriche, en raison du système de pente, de la nature de l'occupation du sol et de la spatialisation de son réseau routier, présente un milieu favorable à la formation et à la concentration des ruissellements superficiels. Selon l'endroit où on se trouve et selon l'intensité de l'événement pluvieux, la circulation des personnes doit être limitée (uniquement des personnes adultes par exemple) ou bien interdite ; il en va de même pour la circulation des véhicules. Parmi les endroits favorables à la formation et à la concentration des ruissellements superficiels, on peut citer la route qui relie le sous-bassin-versant de Sidi Medjber à la voie rapide Chevalet-Triolet, la route qui longe Scotto Nadal et celle qui longe Chemin du Fort (cf. chapitre 7). A ces endroits, au moment de la crise hydrologique de 2001, les habitants furent plus en sécurité chez eux qu'à l'extérieur, et en cas de besoin, leur évacuation doit être assurée par des groupes spécialisés, entraînés et équipés pour assurer ce genre d'opération ; 2) *zones de dé-*

bordement : lorsque le réseau hydrographique et/ou le réseau d'assainissement débordent, les zones urbaines à proximité encourent un risque d'inondation fort. Dans ce cas, les citoyens doivent se mettre à l'abri, un abri qui peut être le toit de la maison, l'étage ou encore des endroits prévues par la collectivité locale. Il faut également mettre à l'abri tout objet de valeur susceptible d'être endommagé par l'eau. Il faut couper le gaz et l'électricité mais toujours garder son téléphone (portable) allumé et à portée de main. Les zones sujettes aux débordements dans le bassin-versant de l'Oued Koriche sont localisées sur la carte de risque (fig. 8.5) ; 3) *zone de formation des crues* : concernant les risque de formation des crues dans le bassin-versant, dès que l'alerte est donnée, la circulation des véhicules doit être strictement interdite sur la voie rapide Chevalet Triollet (cf. *supra*). Rappelons que cette dernière s'est transformée le jour de la catastrophe du 10 novembre 2001 en un véritable torrent, prenant au piège les automobilistes (1 mort). La circulation des personnes dans le quartier de Bab-el-Oued doit être également interdite, ce quartier présentant l'unique exutoire des écoulements formés et concentrés le long de la voie rapide. Les habitants des rez-de-chaussée et des premiers étages (s'il y a lieu) doivent être évacués. Rappelant qu'en 2001, les crues ont atteint des hauteurs de 3 m à certains endroits dans le quartier de Bab-el-Oued. *En zones favorables à la formation de ruissellements superficiels et de crues et selon l'intensité de l'événement pluvieux, la circulation des automobilistes peut y être contrôlée voire interdite. La circulation piétonne doit être interdite à proximité du réseau hydrographique.*

8.2.1.4. Gestion de crise

Dès que le risque redouté se révèle sur le terrain, les acteurs concernés par la gestion de la crise doivent se déplacer rapidement sur les lieux et agir en harmonie en appliquant les instructions dictées par le plan ORSEC. En principe, certains d'entre eux devraient y être déjà, tel est le cas des Services de la Protection Civile et des Gendarmes dont le rôle commence avec le déclenchement de l'alerte ; ils doivent assurer l'évacuation de la population vers les centres d'accueil prévus par la collectivité où ils seront en sécurité (ce genre de centre n'existe pas actuellement dans le bassin-versant de l'Oued Koriche), assurer la sécurité des biens (maisons évacuées, locaux commerciaux) et gérer la circulation des automobiles. En plus des Services de la Protection Civile et les gendarmes, d'autres services doivent être mobilisés tels : les services d'assainissement qui sont souvent sollicités pour résoudre certains problèmes de dysfonctionnement ponctuels, en particulier au début de la crise (déboucher les avaloirs, pomper les eaux en dehors de quartier...), les services de santé et de soins d'urgence, les services du réseau routier qui doivent gérer la circulation en dehors de la zone de la crise (trouver des routes de substitution), mais surtout gérer la circulation des véhicules de secours (camions de pompiers, ambulances, véhicules des services de la sécurité) à l'intérieur de la zones de la crise. En Algérie, l'Armée Nationale Populaire (ANP) est aussi mobilisée en cas de risque majeur et leurs principaux rôles au moment de la crise sont : participer aux opérations de sauvetage, assurer la sécurité de la population ainsi que celle de leurs biens matériels. Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche, l'ANP peut jouer un rôle déterminant dans la gestion de la crise : en faisant appel à leurs forces terrestres mais surtout aux forces aériennes, capables d'évacuer les personnes prises au piège par la crue ou encore les gens isolés sur les toits de leur maison.

Malheureusement, en novembre 2001 la gestion de la crise a été grandement défailante, le plan ORSEC n'a pas pu être déclenché car en pratique ce dernier n'a jamais existé. Les secours n'ont pu être organisés qu'après le passage de la crue. Et durant plusieurs heures, la région est restée complètement isolée (sans aucun moyen de télécommunication ou communication classique). Les services responsables de la gestion de la crise étaient au moment de celle-ci fermés. Dans les rapports officiels, le plan ORSEC (imaginaire) a été déclenché à 12 h, donc 1h30 après l'arrêt total de la pluie et près de 3 h après l'arrivée des premières vagues de crue dans le quartier de Bab-el-Oued. L'arrivée des forces terrestres de l'ANP n'a eu lieu qu'à 16h30 : avec cette arrivée très tardive, ils ont assuré uniquement les travaux du déblaiement des décombres et la recherche des corps de victime.

Les vies sauvées au cœur de la crise ne doivent leur merci qu'aux membres de la société civile (en particulier les jeunes de quartier), qui se sont aussitôt organisés pour assurer l'évacuation des maisons menacées, porter secours aux automobilistes et aux piétons emportés par la crue, etc. Ils se sont organisés en un temps très court, ils ont fait preuve d'une grande discipline et ils ont improvisé des outils de secours avec les moyens du bord, commençant par leur propre force physique. Au début de l'événement, les jeunes se sont liés les uns aux autres formant ainsi un cordon humain auquel les victimes prises au piège dans leurs voitures, dans les bus, ainsi que certains piétons, s'accrochaient pour se mettre à l'abri. Entre temps, d'autres confectionnaient des cordes avec leur propre vêtement ou essayaient de se procurer de cordes et des échelles. Nombre de ces jeunes « héros » ont trouvé la mort en essayant de sauver la vie d'autrui et sont gravés à jamais dans la mémoire de la population locale. De nombreux facteurs sont à la base de cette organisation spontanée et rapide de la société civile : 1) les facteurs cultureux-religieux, qui obligent les gens d'une même communauté (un même quartier, une même ville ou encore un même pays) de s'entre-aider voire de se sacrifier pour le reste de la communauté ; 2) la nature de la société de Bab-el-Oued (quartier populaire), où les liens sociaux restent relativement forts, ce qui explique également pourquoi certaines personnes mettaient leur vie en danger pour pouvoir sauver celle des autres. Bouaouli-Ait Ouarab (2006) explique que « *Les citoyens de cette ville, à l'image de toute l'Algérie, ont vécu durant de longues années (1990-2000) dans une ambiance très complexe caractérisée par un terrorisme barbare et une quasi-absence de l'État : les citoyens ont appris à s'adapter à ce contexte de risques en développant leurs capacités de vigilance et de créativité, leurs pratiques et techniques de défense, leurs circuits de communication, etc., mais surtout en solidifiant les liens sociaux afin de pouvoir faire face ensemble à un danger commun* ». A noter aussi que si l'organisation de la société civile s'est faite spontanément, c'est que la population manque de confiance envers la rapidité et l'efficacité des services de secours officiels.

8.2.1.5. Mitigation

Après le passage de l'événement hydrométéorologique intense qui a frappé le bassin-versant de l'Oued Koriche le 10 novembre 2001, de nombreux secteurs se sont retrouvés sous plusieurs mètres de boue mais les dégâts les plus spectaculaires ont été observés au-delà du carrefour Triolet, dans le quartier de Bab-el-Oued, où les personnes et les biens ont été recouverts de 3 à 4 m de boue. Les principaux travaux à réaliser pour minimiser le risque sont :

- Immédiatement (court terme) : les premiers travaux de mitigation ont eu comme but de déblayer la boue et récupérer les corps des victimes. Cette tâche a été assurée par les services de la Protection Civile, l'ANP et les bénévoles de la société civile. Les services d'hydraulique eux se sont occupés du déblaiement du réseau d'assainissement et le pompage des eaux au niveau des zones urbaines sinistrées ; la réhabilitation des voies et des réseaux routiers endommagés ont été pris en charge par les services des travaux publics.

- Moyen terme : curage du réseau hydrographique du bassin-versant de l'Oued Koriche ainsi que l'aménagement de leur versants avec un système de gabionnage ; réhabilitation et curage du collecteur de l'Oued M'Kacel ; installation d'un système d'évacuation au niveau de la voie rapide ; restauration du réseau d'assainissement au niveau de trois horloges situé au cœur de Bab-el-Oued ; réhabilitation de l'ensemble du réseau routier urbain, la conservation et l'entretien des forêts.

- Long terme : dédoublement du collecteur de l'Oued M'Kacel avec un autre tronçon consacré uniquement à l'évacuation des eaux pluviales (projet en cours) ; réalisation d'un grand projet de recherche intitulé *Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles*, établie dans le but de mieux appréhender des différents types de risques qui encourent le Massif de Bouzaréah ; une série de lois (loi n° 01-20 de décembre 2001, loi n° 03-10 du 13 juillet 2003 et loi n° 04-20 de 2004) ont été éditées après la catastrophe de 2001 afin de faire face aux risques majeurs.

Pour plus de détails concernant les travaux de mitigation, voir la partie 5.2., chapitre 5.

En raison de l'indisponibilité des plans cadastraux de la commune de Bab-el-Oued, il reste très difficile de recenser avec précision les interventions au niveau du tissu urbain. On ne peut donc s'appuyer que sur le témoignage des citoyens, ainsi que sur les images de Google Earth prises avant et après la crue du 10 novembre 2001. D'une manière générale, le tissu urbain n'a pas connu de profondes transformations, du fait que les crues n'ont pas démolies le bâti, à l'exception de certaines vieilles maisons situées principalement au bord de la voie rapide, qui se sont effondrées (témoignage de la population locale). Les seules transformations notables dans le quartier de Bab-el-Oued sont : le remplacement de l'ancien marché (situé en aval du carrefour Triolet) par une placette et un espace récréatif ; plus en aval encore, deux jardins et un terrain de jeux ont également remplacé du bâti (fig. 8.7).



Fig. 8.7. Principales modifications du tissu urbain de Bab-el-Oued après 2001.

8.2.1.5. Retour d'expérience

De nos jours, le travail mené en 2006 par les bureaux d'étude ILS et BRGM ainsi que la présente thèse restent les uniques travaux ayant essayé de comprendre et de reproduire le scénario de catastrophe.

A la lumière de notre travail (Menad *et al.*, 2012 ; cf. chapitres 4, 5, 6 et 7), on a pu démontré que le bassin-versant de l'Oued Koriche présente une prédisposition naturelle au développement de phénomènes de crue et de ruissellement superficiel, cette prédisposition est aggravée par une anthropisation non contrôlée du territoire.

Cependant, les résultats de nos simulations (cf. chapitre 6), ainsi que ceux des bureaux d'études BRGM et ILS restent moindres que les hauteurs et les vitesses d'écoulement réellement observées le jour de la catastrophe, une différence qui peut avoir plusieurs explications : 1) le hyétogramme de l'événement météorologique qui a implémenté les calculs hydrologiques a peut être sous estimé les valeurs. Mais en absence de mesures fines effectuées sur place le jour de l'événement, cette hypothèse ne peut être vérifiée, d'où la nécessité *d'installer une station hydrométéorologique* ; 2) la sous-estimation peut être expliquée également par le fait que dans les simulations effectuées jusqu'ici, la charge solide n'a pas pu être prise en compte : les deux études ont donc simulé des eaux claires alors qu'en réalité, la crue du 10 novembre 2001 était très chargée en matières solides. Par rapport à ce dernier point, il reste beaucoup à faire, car *on ignore encore aujourd'hui la source exacte de cette charge solide* ; certes, le bassin-versant de l'Oued Koriche est inscrit en grande partie dans des schistes qui, déjà très tectonisés par nature, sont d'autant plus altérés sur près de 0,5 à 1 m de profondeur. Les schistes sont donc très sensibles aux phénomènes de glissement de terrain et de ravinement mais leur présence ne peut à elle seule expliquer les 800 000 m³ de charge solide (Behlouli, 2001) charriés ce jour là. La réponse est alors à chercher auprès des pratiques liées à l'anthropisation et en particulier à l'urbanisation du bassin-versant. En raison de son système de pentes, les constructions dans le bassin-versant nécessitent des travaux de nivellement du sol. Les déblais résultant de cette opération sont jetés sans contrôle sur les versants, sans aucune compaction préalable, si tant est que ce processus soit favorable à leur meilleur maintien sur les pentes (au mieux, il donnera plus de cohésion au volume de déchets abandonnés mais renforcera le ravinement en surface du fait d'une capacité d'infiltration réduite). Ces matériaux sont extrêmement sensibles aux phénomènes d'érosion hydrique, ce qui laisse à penser que les matériaux résultant de travaux de déblaiement ont fourni une grande partie de la charge solide à la crue du 10 novembre 2001. Le problème qui se pose actuellement sur le terrain est celui de pouvoir localiser ces déblais, car aussitôt déposés, ils sont envahis par de la végétation (climat méditerranéen humide) et avec le temps, ils ne sont plus identifiables à l'œil nu. Pour les localiser, il faut faire appel à des analyses géotechniques. Mais en absence de contrôle des pratiques sur le terrain, ça ne sert à rien de s'investir dans des analyses géotechniques coûteuses alors que les déblais en question ne sont pas statiques mais en évolution spatio-temporelle continue (des nouveaux chantiers font régulièrement leur apparition). *La solution de cette problématique doit tout d'abord être d'ordre législatif suivi par une application stricte sur le terrain (zones de rejet interdites, rejets conditionnés, rejet possibles), pour qu'au final, l'établissement d'une carte de localisation des remblais et des sols sensibles à l'érosion hydrique puisse avoir un sens à moyen et à long terme.*

Le 10 novembre 2001, le réseau d'évacuation des eaux pluviales a été sujet à de nombreuses anomalies et dysfonctionnements. A commencer par l'insuffisance de la capacité générale d'évacuation (*i.e.*, réseau urbain dimensionné pour évacuer des événements d'une période de retour de 10 ans) : le calcul de la capacité de l'ancien tronçon du collecteur de l'Oued M'Kacel reste très délicat voire impossible à cause de ses nombreux changements de section et les singularités qui en ont résulté. La difficulté de pouvoir évaluer sa capacité est liée également au fait qu'il s'agit d'un réseau mixte qui assure l'assainissement simultané des eaux usées urbaines et des eaux pluviales. Le collecteur s'est effondré le jour de l'événement au niveau de la confluence des oueds Sidi Medjber et Frais Vallon : à cet endroit, la surface drainée par le collecteur double (comme la pression exercée sur le collecteur) alors que la capacité d'évacuation reste la même depuis l'amont du bassin-versant, et c'est bien ce qui a très probablement causé son effondrement à cette confluence. Le reste du tronçon lui aussi n'a pas assuré l'évacuation des écoulements : les nombreux déchets acheminés par le ruissellement ont rapidement formé des embâcles au niveau des grillages qui protègent les entrées des principaux ouvrages hydrauliques de réception, empêchant ainsi les eaux pluviales de rejoindre le collecteur de l'Oued M'Kacel.

On conclut donc que le réseau d'évacuation des eaux pluviales n'a pas fonctionné le jour de la crue du 10 novembre 2001, en raison 1) de sa structure interne et sa capacité défaillante et 2) de sa structure externe et les points d'infiltration qui ne sont pas adaptés aux phénomènes de crue rapide (dépassement des capacités d'infiltration des avaloirs) et très chargés (formations d'embâcles au niveau des ouvrages hydrauliques, obstruction des avaloirs). *C'est pour cela qu'il est désormais nécessaire que les points d'accès au tronçon souterrain (ouvrages hydrauliques de réception, avaloirs) soient régulièrement entretenus, contrôlés et nettoyés en période de crise*, du fait que le risque de formation d'embâcles, au niveau des ouvrages hydrauliques de correction et de réception, surtout que les crues sont observées en automne, donc après une longue saison de sécheresse. Pour augmenter la capacité d'évacuation du collecteur de l'Oued M'Kacel, un grand projet de dédoublement de l'ancien tronçon est actuellement en cours ; le nouveau tronçon sera dédié uniquement à l'évacuation des eaux pluviales (cf. chapitre 6). Théoriquement, ce nouveau tronçon va réduire d'une manière remarquable le risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, à condition que les pratiques (ouvrages hydrauliques de réception, ouvrages à ciel ouvert et avaloirs mal entretenus, bouchés et totalement non fonctionnels par endroits) autrefois observées au niveau de l'ancien collecteur ne se reproduisent pas sur ce nouveau tronçon.

La gestion de la crise a été catastrophique, les services concernés ont été absents au moment où la région subissait l'événement hydrométéorologique, une absence qui est due à plusieurs raisons : l'alerte n'a pas été donnée, par la suite il y a pas eu un travail d'anticipation ; l'absence d'un plan ORSEC met tout le monde en panique au moment de la crise. Pour la crue du 10 novembre 2001, le temps d'organisation et de coordination des secours a été extrêmement long ; les forces de l'ANP et les Services de la Protection Civile ont assuré ce jour là plutôt des travaux de mitigation (cf. *supra*). *Encore aujourd'hui, le plan ORSEC n'existe pas au niveau des collectivités locales et si demain le bassin-versant de l'Oued Koriche est frappé par un événement météorologique semblable à celui des 9-10 novembre 2001, les secours seront encore aussi inefficaces qu'ils ne l'étaient il y a 11 ans.*

Finalement, le travail de retour d'expérience nous montre que l'ampleur des dégâts, en particulier en matière de vies humaines, a été le résultat tout d'abord *d'un travail de prévision non effectué, une alerte non donnée et une gestion désastreuse de la crise.*

8.2.1.6. Prévention

A travers les informations fournies par le travail du retour d'expérience et les différentes analyses météorologiques, géomorphologiques, hydrologiques et urbanistes effectuées, on a cherché des dispositifs capables de réduire le risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Les outils de prévention du risque de crue et de ruissellement superficiel sont traditionnellement classés en mesures structurelles et non structurelles (Pottier, 1998 ; Scarwell et Laganier, 2004 ; Beck, 2006). Encore aujourd'hui, les techniques structurelles sont les plus favorisées en milieu urbain. Le choix des techniques d'intervention est également conditionné par le niveau et la nature de l'anthropisation du territoire.

8.2.1.6.1. Mesures structurelles

Il s'agit en grande partie d'interventions lourdes de type génie civil visant à modifier la réponse hydrologique. Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, c'est uniquement ce type de mesures qui sont entreprises : une grande partie du réseau hydrographique canalisé avec des ovoïdes enterrés ou à ciel ouvert, quelques versants gabionnés. Le choix d'appliquer des mesures structurelles lourdes a été pris afin de pouvoir évacuer le plus rapidement possible l'ensemble des écoulements vers l'aval jusqu'à la mer. Ces mesures ont eu des effets irréversibles sur le terrain. L'analyse du comportement hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche a mis en évidence que le choix l'évacuation rapide des écoulements vers l'aval, longtemps adopté, a été un mauvais choix, cette technique renforçant le caractère polygénique de la réponse hydrologique. Le plus convenable dans l'Oued Koriche, c'est d'intervenir en amont pour résoudre les problèmes des crues en aval. *Pour pouvoir réduire les débits de pointe, les vitesses d'écoulement et les hauteurs de submersion en aval, il faut augmenter les capacités de stockage des écoulements en amont. Gérer le caractère polygénique de la réponse hydrologique peut se faire également en décalant l'arrivée concomitante des réponses hydrologique des principaux sous-bassins versants impliqués dans la génération du débit de pointe à l'exutoire.*

A. Augmentation des capacités d'évacuation (i.e., débits)

Jusqu'ici, c'est cette approche qui a été privilégiée sur le terrain. Après la crue du 10 novembre 2001, les autorités ont lancé le projet du dédoublement du réseau d'assainissement de l'Oued M'Kacel, avec un nouveau tronçon dédié uniquement à l'évacuation des eaux pluviales (cf. chapitre 7). Aujourd'hui dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, la politique de gestion des problèmes hydrométéorologiques n'a pas changé et la logique de tout évacuer vers l'exutoire reste privilégiée. Les analyses hydrauliques effectuées auparavant montrent que le réseau hydraulique aérien est également sous-dimensionné avec de nombreux probables points de débordement dont les plus critiques sont les canaux à ciel ouvert de Sidi Medjber et de Jaubert. L'augmentation de la capacité d'évacuation de ces deux ouvrages est nécessaire.

B. *Atténuer le caractère polygénique de la réponse hydrologique (intervenir au niveau des bandes de cellules équidistantes)*

Le débit de pointe du bassin-versant de l'Oued Koriche est provoqué principalement par l'arrivée concomitante des écoulements développés dans les sous-bassins-versants Chemin du Fort, Frais Vallon et Sidi Mebdjber. Pour pouvoir induire un décalage dans l'arrivée concomitante de leur réponse hydrologique, il faut réagir à l'échelle du sous-bassin-versant, au niveau des bandes des cellules équidistantes qui sont à l'origine de la génération du débit de pointe à l'exutoire final. Ainsi, plusieurs types d'intervention sont possibles : Installation d'un système en escalier, de gabionnage, bandes enherbées, ruptures de pente pour créer des zones de stockage temporaire, etc. Pour le cas du sous-bassin-versant de Sidi Medjber : en superposant la bande des cellules équidistantes à la carte d'occupation du sol actuel (i.e., la bande des cellules équidistantes a été localisée en tenant compte uniquement de la topographie sans tenir compte de l'occupation du sol ; cf. chapitre 6), plus des deux tiers de la bande des cellules équidistantes coïncident avec une zone urbaine dense. De ce fait, l'intervention dans Sidi Medjber sur reste difficile et délicate. En réalité, l'urbanisation change les caractéristiques topographiques locales, ce qui va sans doute modifier la spatialisation de la bande des cellules équidistante. Pour relocaliser avec précision la bande des cellules équidistantes, il faut établir un Digital Elevation Model (DEM)⁸, et développer des équations spéciales pour simuler le comportement des écoulements sur la toiture des bâtiments, car selon la forme et les matériaux de construction des toits, ainsi que la hauteur des bâtiments, le comportement hydrologique change. Un autre facteur, lié à la nature du foncier, rend également l'intervention dans le sous-bassin-versant de Sidi Medjber très difficile. Actuellement, la bande des cellules équidistantes s'étale majoritairement sur des terrains privés, ce qui complique l'opération d'appropriation des terrains nécessaire pour réaliser un aménagement structurel. Concernant le sous-bassin-versant de Frais Vallon, la majeure partie de la bande des cellules équidistantes se trouve encore sur des terrains non anthropisés, rendant possible une intervention au niveau du Frais Vallon. En tenant compte de la petite taille du sous-bassin-versant, cette mesure à elle seule ne peut entraîner une réduction significative du débit de pointe à l'exutoire. L'intervention dans Frais Vallon peut toutefois être appliquée comme un aménagement complémentaire d'autres mesures de prévention. Dans le sous-bassin-versant du Chemin du Fort, le débit de pointe observé à l'exutoire est alimenté principalement par les écoulements venant du sous-bassin-versant de Chemin du Fort. Aujourd'hui, la bande de cellules équidistantes de ce dernier, s'étale sur des terrains très peu anthropisés.

On en déduit donc que dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, l'atténuation du caractère polygénique de la réponse hydrologique via une modification des propriétés de la bande des cellules équidistante ne peut se faire qu'en intervenant dans le sous-bassin versant du Chemin du Fort.

Néanmoins, l'intervention au niveau de la bande de cellules équidistantes n'est pas la solution la plus facile à appliquer. Un tel aménagement demande des calculs hydrauliques très

⁸ Ne pas confondre MNT et DEM. Dans ce dernier, on n'intègre pas seulement la topographie mais aussi la canopée si la forêt est présente.

précis car il nécessite une modification locale des caractéristiques topographiques du sous-bassin-versant. Dans le cas de l'Oued Koriche, si la réponse du sous-bassin versant du Chemin du Fort n'est pas suffisamment retardée, elle risque de coïncider avec l'arrivée des écoulements provenant du sous-bassin-versant Baranes. Vu l'importance des volumes générés au niveau de ce dernier, on peut créer un nouveau débit de pointe d'intensité semblable ou encore plus intense que celui généré naturellement par le bassin-versant de l'Oued Koriche.

C. Augmentation des capacités de stockage

En augmentant la capacité de stockage des écoulements en amont, on peut retarder l'arrivée des écoulements à l'exutoire et écrêter ainsi la crue. Plusieurs techniques sont classiquement utilisées afin d'augmenter la capacité de stockage dans le bassin-versant :

1. Préservation des zones d'expansion de crue (pratique courant) ou création de nouvelles zones de submersion qui ne soient pas naturellement inondables (moins pratiquée).

2. *Création de zones de rétention* : c'est une pratique très largement répandue, qu'il est possible d'appliquer sur des échelles allant de la parcelle à des bassins-versants de centaines d'hectares. Ces bassins prennent des formes très variables : des bassins secs à ciel ouvert ou des bassins en eau, tous les deux nécessitant une importante emprise foncière ; ou encore des bassins enterrés qui restent plus coûteux que les deux premiers mais nécessaires en cas de manque de foncier (Cornie, 2007 ; Bourgeois, 2011). Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche, c'est ce dernier type d'ouvrage qui s'accorde le mieux avec la nature de l'occupation du sol actuelle et les orientations des pratiques d'aménagement adoptées. A noter que même si les bassins de rétention sont enterrés, on ne peut pas les construire dans n'importe quel sous-sol. Pour des raisons techniques et de sécurité la surface topographique située au-dessus des ouvrages peut être un terrain de jeux, un parking, un espace vert, des routes, etc.

Pour influencer significativement l'intensité du débit de pointe, il faut que le (les) bassin(s) de rétention soient construits dans le (les) sous-bassin(s)-versant(s) les plus réactifs de l'Oued Koriche. La mise en place du bassin de rétention en aval est déconseillée, du fait de la forte densité urbaine (niveau de vulnérabilité très fort), mais surtout en raison du caractère torrentiel des crues en aval. Ainsi le problème des crues doit être absolument géré en amont du bassin-versant sans compter sur la protection d'un ouvrage situé dans le quartier de Bab-el-Oued. A moins que celui-ci vienne compléter d'autres aménagements effectués en amont, dans ce cas l'ouvrage est considéré comme un moyen supplémentaire de protection.

En se basant sur l'analyse de l'hydrosystème, des mécanismes de genèse et de développement de la réponse hydrologique, de l'état actuel d'occupation des sols et du retour d'expérience, on a pu identifier un certain nombre d'emplacements possibles capables d'abriter des ouvrages de rétention :

La voie rapide Chevalet-Triolet : la construction d'un ouvrage de rétention au niveau du bassin moyen sur l'une des rives de la voie rapide Chevalet-Triolet afin de stocker les eaux provenant de l'amont (sous-bassins versants Baranes et Sidi Medjber), s'avère d'une utilité évidente. Les probables bassins construits au niveau de la voie rapide peuvent être alimentés soit *via* le réseau d'assainissement et donc *via* le collecteur de l'Oued M'Kacel ; on parle dans

ce cas de bassin d'orage (alimenté par un réseau d'évacuation unitaire), soit *via* des avaloirs qui collectent et évacuent les eaux ruisselantes en surface. Un mode d'alimentation mixte est également possible, où l'ouvrage sera lié simultanément au réseau d'assainissement et aux avaloirs en surface. Au premier abord, ce type d'ouvrage semble être un bon remède pour faire face à la capacité d'évacuation défaillante que présente le collecteur de l'Oued M'Kacel. Mais le retour d'expérience relève que le 10 novembre 2001, le collecteur n'a pas fonctionné (cf. chapitre 7) : nous pensons donc que *la mise en place d'un ouvrage d'orage dont l'alimentation se fait par le réseau d'assainissement n'est pas une solution convenable, en tenant compte de la situation actuelle du bassin-versant de l'Oued Koriche*. Dans ce cas, il est conseillé d'envisager plutôt des ouvrages de réception et de stockage des eaux superficielles.

Nous avons ensuite supposé que le nouveau réseau pluvial en cours de construction était achevé et que son fonctionnement s'avérait efficace. On a donc cherché un emplacement stratégique qui permettra une atténuation significative des crues en aval et dont les conditions d'occupation du sol actuelles permettent son installation. Nous pensons qu'en aval du puits de chute du nouveau réseau pluvial, situé entre les sous-bassins-versants Frais Vallon et Scotto Nadale (cf. chapitre 7), l'installation d'un bassin de rétention est convenable. Le fait de placer l'ouvrage de stockage en aval du puits de chute peut résoudre les problèmes liés aux vitesses trop fortes des eaux entrant dans le bassin de rétention, une problématique qui nécessite souvent un équipement supplémentaire afin d'assurer la protection de la structure de l'ouvrage. On propose ici un bassin de rétention à alimentation mixte, relié au réseau pluvial pour recevoir le surplus débordant. Grâce aux avaloirs, il sera aussi capable de stocker les eaux ruisselant sur la voie rapide.

Sous-bassin-versant de Sidi Medjber : étant donné qu'il s'agit de l'un des principaux sous-bassins-versants productifs du débit de pointe à l'exutoire, le stockage temporaire des écoulements générés dans le sous-bassin-versant de Sid Medjber peut influencer significativement la réponse hydrologique globale. On propose de placer un *bassin de rétention à l'exutoire de Sidi Medjber*, juste avant l'ouvrage hydraulique de réception. Par son emplacement, le bassin permettra de stocker une grande partie des eaux concentrées le long du réseau hydrographique. Dans ce cas, l'alimentation se fera par déversement direct (le passage de l'oued vers le bassin de rétention se fait *via* un déversoir). Le reste des volumes concentrés en surface seront collectés et transférés au bassin avec des avaloirs connectés à l'ouvrage. Ainsi, le problème de concomitance des réponses des sous-bassins versants de Sidi Medjber et Chemin du fort pourra être résolu, et le débit de pointe à l'exutoire revu à la baisse.

Sous-bassin-versant du Chemin du Fort : deux types d'ouvrage peuvent être envisagés dans le Chemin du Fort, à s'avoir : un *ouvrage* placé à l'exutoire connecté simultanément au réseau d'assainissement et aux avaloirs assurant la collecte des eaux de surface. Le stockage des écoulements produits dans le Chemin du Fort présente un véritable gain en matière de débit de pointe (réduction de 50 %). Un *ouvrage de rétention* pourrait être situé près de l'ouvrage hydraulique de réception Jaubert, qui collecte une partie des eaux du sous-bassin Jaubert et les eaux de la partie nord-est du Chemin du Fort. A cet endroit, les débordements sont fréquents (cf. *supra*). Cet ouvrage limitera localement les débordements du collecteur à ciel ouvert, mais ses effets sur la réponse globale ne seront pas significatifs.

A noter ici, que les propositions concernant les emplacements des bassins de rétention cités ci-dessus ne sont basées que sur notre étude préalable de l'hydrosystème anthropisé ; la faisabilité ou pas de ces ouvrages nécessiteraient d'autres types de travaux complémentaires. D'une manière générale, la réalisation d'un ouvrage de rétention nécessite un protocole d'action, où on doit tout d'abord identifier et déterminer la nécessité de l'ouvrage. On effectue par la suite des analyses climatologiques, hydrographiques (*i.e.*, ces étapes sont déjà réalisées dans notre travail) et géotechniques *in situ*. L'ensemble de ces analyses permet de fixer les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage : capacité de stockage, orifices de contrôle, régime hydrologique de mise en fonction, etc. Selon la destination ultime des eaux stockées, une étude qualitative peut être également exigée. Toutes ces caractéristiques doivent être définies avec précision, afin d'éviter que l'ouvrage soit sous-dimensionné, ce qui peut mettre les zones urbaines en danger (très fort niveau de vulnérabilité), ou au contraire surdimensionné (perte financière). Le coût de construction d'un bassin de rétention est généralement important. Dans l'Oued Koriche, ce coût va être plus élevé que la moyenne en raison de prix élevés du foncier et des conditions de travail plus délicates en milieu urbain. La concrétisation finale de l'ouvrage de rétention doit être confiée à une entreprise de génie civil spécialisée, afin d'assurer la sécurité et la fonctionnalité de l'ouvrage.

Les bassins de rétention sont théoriquement un très bon remède contre les phénomènes de crue et des ruissellements superficiels. Cependant, ils peuvent s'avérer rapidement inefficaces dans notre cas pour plusieurs raisons : 1) en réalité, la fonctionnalité de ce genre de bassin est conditionnée directement par leur niveau d'entretien, ce qui explique la présence obligatoire, dans les fiches techniques de construction, d'un volet consacré aux travaux de suivi et d'entretien de l'ouvrage. Notre travail sur le terrain et les travaux de retour d'expérience révèlent clairement que les ouvrages hydrauliques (canaux à ciel ouvert, ouvrages de réception, avaloirs,...) déjà en place sont très mal entretenus voire abandonnés et ce, malgré le fait que l'entretien des ouvrages ne demande pas de mobiliser des outils et de la main d'œuvre très coûteux. Ce n'est pas le cas pour les bassins de rétention, qui nécessitent un budget d'entretien souvent jugé important. La teneur élevée en charge solide qui caractérise les crues du bassin-versant de l'Oued Koriche augmente le risque de colmatage des ouvrages et ainsi la fréquence et le coût des travaux de leur entretien (la fréquence et le coût des travaux d'entretiens variant selon la structure et l'environnement de chaque ouvrage) ; 2) les bassins de rétention peuvent devenir inefficaces quand on a à faire à des épisodes pluvieux avec des pics d'intensité multiples et temporellement rapprochés comme ce fut le cas les 9-10 novembre 2001. Dans cette situation, les bassins se remplissent et amortissent la réponse hydrologique provoquée par le premier pic, mais ils sont sans effet vis-à-vis des autres pics. De ce fait, et tenant compte des conditions qui règnent sur le terrain (absence de textes législatifs, répartition de tâches confuse entre les services de gestion, absence de services de contrôle du genre : *Police des eaux* en France), *la mise en place des ouvrages de rétention peut ne pas être la meilleure solution à envisager actuellement.*

Les bureaux d'étude ILS et BRGM (2006) ont également étudié la possibilité d'aménager des ouvrages de rétention dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Ils ont proposé de réaliser six bassins de rétention, distribués de l'amont en aval comme suit : deux ouvrages dans le sous-bassin-versant de Baranes, l'un en amont, l'autre à l'exutoire ; un ouvrage

à l'exutoire du sous-bassin-versant de Sidi Medjber ; deux ouvrages situés en rive gauche de la voie rapide, l'un dans le bassin moyen, l'autre plus vers l'aval près de l'exutoire du sous-bassin versant Scottot Nadale ; enfin un ouvrage situé à l'entrée du quartier de Bab-el-Oued au niveau de la placette à la place de l'ancien marché du quartier (fig. 8.7). Les bureaux d'étude proposent de réaliser l'ensemble de ces ouvrages sans indiquer un ordre de priorité. Les ouvrages proposés ici sont conçus comme un aménagement complémentaire au nouveau collecteur pluvial. Il est prévu qu'ils assureront un gain de débit de pointe de $32 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une pluie centennale de 175 à $200 \text{ m}^3/\text{s}$. La réalisation de l'ensemble de ces ouvrages de rétention coûtera 120 millions Dinars algériens (*i.e.*, 47 millions euros) hors taxes (30 % de marge d'erreur), auquel il faut rajouter le coût de la réalisation du nouveau collecteur (près de 6 milliards de Dinars algériens ; *i.e.*, 2,3 Milliards d'euros). On aperçoit que finalement *les ouvrages de rétention n'ont d'intérêt que pour des événements fréquents : quand il s'agit d'événements intenses, leur effet sur le débit de pointe à l'exutoire devient marginal ($32 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une crue de $200 \text{ m}^3/\text{s}$), et quand on a à faire à des événements météorologiques intenses à pics multiples, le rôle des ouvrages de rétention s'efface complètement.*

3. *Réservoirs au niveau de l'habitat* : près de la moitié de la superficie du bassin-versant de l'Oued Koriche est urbanisée et la grande majorité des eaux reçues sur les toits des maisons est évacuée, *via* un système de tuyauteries, sur les trottoirs pour rejoindre ensuite le réseau routier (ruissellements superficiels ; fig. 8.8).



(Menad, 2010)

Fig. 8.8. Système de récupération et d'évacuation des eaux pluviales ruisselant sur les toits dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

La récupération et le stockage local des eaux de toiture peuvent réduire considérablement les écoulements circulant en surface et/ou dans le réseau d'assainissement en zone urbaine. Les outils de récupération des eaux de toiture sont très variés et peuvent être classés en deux principales catégories :

Les citernes, les cuves enterrées : ce sont des ouvrages fabriqués spécialement pour assurer un stockage adéquat des eaux de pluie ; un certain niveau d'hygiène doit être respecté (selon l'usage ultime des eaux) et on doit empêcher la pénétration des insectes, des débris végétaux ou encore le développement des microorganismes. Pour cela, des réservoirs de stockage sont dotés de filtres, d'un système auto-nettoyant, d'un système d'épuration, etc. Actuellement, une large gamme de réservoirs de stockage est disponible sur le marché, mettant à dis-

position des citoyens des formes et des capacités de stockage adaptables aux différentes tailles et structures de leurs maisons. Leur installation est facile, rapide et souvent de coût abordable. La mise en place d'un système de récupération des eaux pluviales, proposé ici comme un moyen de réduction des eaux de ruissellement superficiel et de crue en milieu urbain, possède de nombreux autres avantages : il permet aux particuliers de réaliser des économies sur leur facture de consommation des eaux en réutilisant les eaux pluviales stockées pour les tâches domestiques (arrosage du jardin, chasses d'eau des toilettes, lavage de voitures, piscine, etc.) ; il s'agit également d'un geste écologique qui permet de remplacer une partie de la consommation des eaux de robinet (nécessitant de différents traitements) par l'eau de pluie (ressource *quasi* « inépuisable » dans les conditions climatiques actuelles) ; les eaux de pluie sont également des eaux douces, limitant donc l'utilisation des adoucissants et des produits anti-calcaires (MEDDE, 2012).

Les toits stockants : en matière de stockage des eaux pluviales, il existe une autre technique beaucoup moins utilisée mais utile en zone urbaine dense où les espaces libres font défaut. Il s'agit des toits stockants, une technique de microstockage qui consiste à retenir temporairement les eaux pluviales sur les toits des maisons. La technique des toits stockants est appliquée uniquement sur des toits plats ou de faible pente. Selon la structure du toit, les techniques d'aménagement diffèrent : un parapet est installé tout autour des toits plats, alors que pour les toits en pente douce, le stockage est assuré grâce à des caissons cloisonnant la surface. Pour les deux types de toit stockants, des dispositifs de régularisation et d'évacuation des eaux doivent être mis en place. Pour que le stockage soit efficace et sans danger pour la structure du bâti, le toit doit être couvert par un revêtement d'étanchéité, protégé souvent par une couche de gravillons afin de limiter l'effet de colmatage.

Une étude restant l'efficacité de la technique des toits stockants a été réalisée par les bureaux d'étude ILS-BRGM (2006b) dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Pour tester cette technique, ils ont choisis la partie amont du bassin-versant de Birtraria qui est une zone urbaine dense favorable à la génération des ruissellements. Il s'agit d'une zone qui fait 53 ha où la superficie des toits atteint 14 ha. Ils ont fait l'hypothèse que 25 % des toits sont convertis en toits stockants *avec une hauteur de stockage de 10 cm*. Puis ils ont évalué, grâce à une modélisation hydraulique réalisée sous le logiciel SWMM, l'effet de cet aménagement sur les volumes et les débits des eaux. Les résultats de cette modélisation sont présentés dans le tableau 8.3.

Tableau 8.3. Gains obtenus avec les toits stockants (ILS-BRGM, 2006).

	Gain en volume	Gain en débit	Coûts
T=10 ans	3500 m3 (16 % sur une heure) (6 % sur 24h)	1 m3/s (9 %)	5000 DN / m ²
T=100 ans	3500 m3 (10 % sur une heure) (4 % sur 24h)	1,7 m3/s (8 %)	

Les résultats sont significatifs et encouragent pour généraliser ce mode d'intervention afin de réduire les volumes et les débits observés en surface. Néanmoins, en pratique, la mise en place des toits stockants n'est pas systématique pour les bâtiments déjà en place. Il faut d'abord effectuer des analyses techniques afin de vérifier si la structure du bâtiment est capable de supporter un tel aménagement. En tenant compte du coût relativement élevé et en absence de législation réglementant ce genre de pratiques sur le terrain (obligation pour les nouveaux bâtiments par exemple), il est rare, voire impossible de s'attendre à ce que les particuliers prennent l'initiative d'aménager les toits de leurs maisons.

8.2.1.6.2. Mesures non structurelles

Les mesures non structurelles visent principalement à réduire le niveau de vulnérabilité, en modifiant certains comportements sur le terrain capables de minimiser l'exposition des enjeux à l'aléa. Elles ne nécessitent pas la mobilisation de moyens d'intervention, matériels et financiers importants. Les mesures non structurelles peuvent être classées en quatre principales catégories :

A. *Modification des modes d'occupation et d'usage du sol*

Le quartier le plus touché par la problématique des crues dans le bassin-versant de l'Oued Koriche fait partie de l'ancien tissu urbain d'Alger. Toute solution visant à résoudre le problème des crues sur le terrain doit être conçue en tenant compte de la présence du quartier de Bab-el-Oued et ce, malgré le niveau de risque très fort. Concernant le reste du bassin-versant, tout comme Bab-el-Oued, de nombreuses zones à risque fort ont été urbanisées en raison de l'absence de cartes de prévention des risques de crue et d'inondation. Actuellement et malgré la catastrophe du 2001, et malgré la mise en évidence de certaines zones à haut risque par le rapport des bureaux d'études ILS et BRGM (2006), on observe de nouveau projets de construction entamés au bord de la voie rapide et au niveau du lit mineur des oueds. *Nous pensons que le vrai problème sur le terrain est plutôt l'absence d'un contrôle sérieux du développement urbain.* Les cartes de risque de crue et d'inondation doivent faire partie intégrante des plans d'occupation du sol, ce qui limitera sans aucune ambiguïté les zones où la construction est autorisée, là où la construction est conditionnée et les zones où la construction est interdite. Le contrôle des pratiques urbanistes sur le terrain doit être fait avec fermeté vu que c'est la vie des personnes qui est mise en jeu. Ces démarches doivent être absolument appuyées par des textes pénaux.

B. *Modification de la vulnérabilité des éléments physiques, tout en gardant les usages initiaux*

A ce niveau, il suffit de changer certaines pratiques du quotidien et/ou réaliser des aménagements à l'échelle de l'habitation, pour pouvoir protéger d'une manière significative les biens matériels. Dans les pays anglo-saxons, les stratégies d'intervention sont divisées en trois principales catégories : éviter, résister, céder (CEPRI, 2009 ; Prime.net, 2009). En se servant principalement du rapport de CEPRI publié en 2009, les plus importants outils et des modes opérationnels développés pour chacune des trois stratégies, sont cités ci-dessous. Ces outils ainsi que d'autres sont par ailleurs détaillés dans l'annexe 8.2.

1. *Stratégie « Eviter »* : en comparaison aux deux autres stratégies, elle est celle dont le niveau de protection et la rentabilité économique sont les plus certaines. Il s'agit de surélever les nouvelles habitations au-dessus de la hauteur d'eau maximale enregistré dans le passé, mettant ainsi les maisons entièrement à l'abri des inondations (risque d'endommagement direct nul). Pour ce faire, de nombreuses techniques sont connues: *création d'un vide sanitaire, pilotis, remblais, premier niveau habitable sur sous-sol ou garage non enterré, etc.* Le choix de l'une ou de l'autre technique est lié directement aux caractéristiques de l'inondation (hauteur d'eau, durée de submersion, force du débit,...). A noter ici que cette stratégie supprime uniquement les endommagements directs de l'habitation et de ses biens physiques, les particuliers subissant d'autres impacts indirects : problèmes de circulation sur le réseau routier, interruption des moyens de communication, coupure électrique et d'alimentation en eau potable, etc. Plus la durée de la crue est longue, plus les impacts indirects sont ressentis par les citoyens. Néanmoins, cette stratégie d'efficacité et de rentabilité, indiscutable, est bien entendue applicable uniquement aux nouvelles constructions seulement.

En zones à risque fort dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, on devrait interdire toute construction de plain pied (maisons ou immeubles). Concernant les zones dont le niveau de risque est très fort, en particulier dans la voie rapide, l'application de la stratégie « Eviter » et la mise hors eau des nouvelles constructions restent délicates et nécessitent des mesures techniques particulières, permettant d'assurer la résistance de la structure des constructions face aux fortes vitesses d'écoulement possibles. Le problème de développement des embâcles est également à prendre en compte, car des maisons sur pilotis par exemple peuvent être favorables au développement d'embâcles, ce qui présente un risque pour les personnes et les biens en aval mais aussi pour la structure de la maison elle-même.

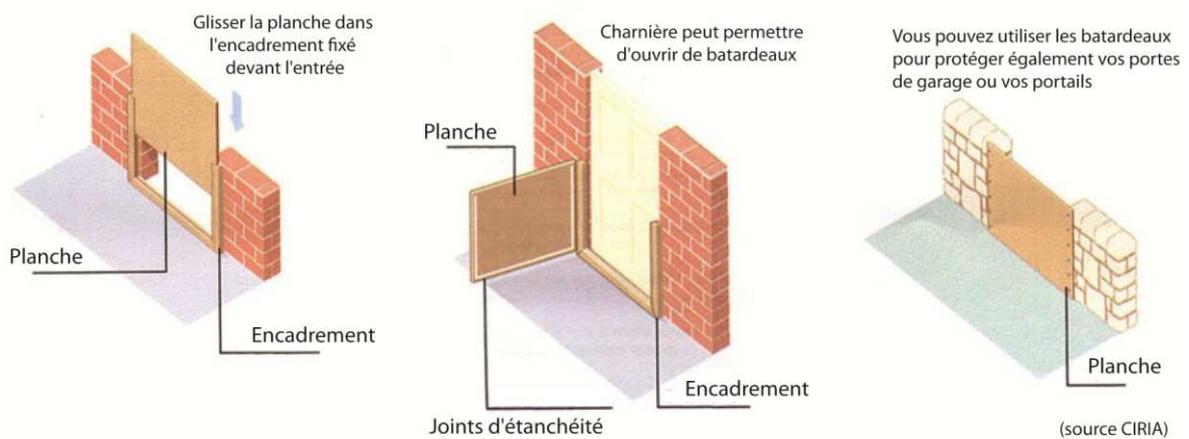
2. *Stratégie « Résister »* : elle consiste à maintenir au sec, temporairement ou de façon pérenne, l'intérieur des bâtiments construits en zone à risque (fig. 8.9). Elle permet de réduire de manière importante les impacts des crues et des inondations vis-à-vis des constructions. Cette stratégie s'applique aux anciens bâtiments, exposés à des épisodes de crue de durée limitée (moins 48 h) et dont la hauteur ne dépasse pas 1 m. Un certain délai d'anticipation est également indispensable afin de pouvoir mettre les outils de protection en place. Pour ce faire, de nombreux outils ont été développés avec le temps, il s'agit en grande partie de dispositifs temporaires de protection tels : batardeau, rehausse de plancher, utilisation de matériaux hydrofuge (peinture de mur), retaper les murs extérieurs avec des revêtements d'imperméabilisation, prévoir des clapets anti-retour pour le réseau d'assainissement, etc.

Ces techniques de protection peuvent être appliquées dans les zones à risque très fort observées dans les sous-bassins-versants de Baranes et Chemin du Fort, où les hauteurs d'eau ne dépasse pas 1 m. Néanmoins, les écoulements peuvent atteindre des vitesses importantes, mettant en danger certains outils de protection tels les batardeaux par exemple. Pour cela, le choix des matériaux et le mode d'installation des outils de protection doivent être soigneusement faits afin de résister aux forts débits d'eau.

Les techniques de protection sont théoriquement inapplicables au niveau de la voie rapide, vu la forme torrentielle que prennent les écoulements (débit très fort, hauteur d'eau >

1 m). Néanmoins, en connaissant le terrain, l'adaptation de ces outils peut être utile. Au départ, il faut se mettre d'accord sur le principe que les outils de protection proposés dans le cas de la voie rapide ne justifient en aucun cas la non évacuation des domiciles. Ces outils sont proposés ici à titre expérimental et ils peuvent s'avérer rapidement inefficaces au moment de la crise. Les maisons qui se trouvent à proximité de la voie rapide peuvent être protégées de l'inondation grâce à des batardeaux et le renforcement et l'imperméabilisation de leurs murs extérieurs peuvent empêcher les eaux de pénétrer dans les maisons. Avant de commencer les aménagements de protection, il faut qu'au niveau de chaque maison il y ait une sortie secondaire sur les versants. La conception et la réalisation des aménagements de protection doivent être supervisées par des experts (ingénieurs en génie civile ou géotechnique, hydrologue), et c'est aux experts uniquement de juger la faisabilité ou non d'un aménagement et c'est à eux de concevoir le mode opératoire.

Batardeaux



Sacs de sable



Fig. 8.9. Dispositifs de protection : batardeaux, sacs de sables.

L'équipement des maisons avec des outils de protection peut être en lui-même une source de risque. Ces outils donnent un faux sentiment de protection, ce qui réduit la vigilance des personnes et les incite à rester à l'intérieur de leurs maisons au détriment parfois des consignes données par les services responsables de la gestion de crise.

3. *Stratégie « Céder »* : pour certaines constructions exposées au risque de crue et d'inondation (hauteur d'eau > 1 m, durée de submersion supérieur à 48 h), les deux stratégies précédentes ne sont pas efficaces. Dans ce cas, on ne peut qu'accepter le risque et laisser la libre pénétration des eaux à l'intérieur des bâtiments. Les particuliers qui se retrou-

vent dans ce cas de figure peuvent tout de même prendre une série de mesures afin de réduire le plus possible les dégâts causés par le passage des crues, ainsi que la durée et les frais des travaux de remise en état :

Adapter les équipements à l'inondation : l'adaptation des équipements de la construction aux inondations permet non seulement de sécuriser la vie des personnes mais aussi de réaliser des économies. En doit prioritairement assurer la sécurité des personnes et pour cela, il faut commencer par *sécuriser le système électrique* en surélevant les compteurs, vérifier l'étanchéité (tableau, disjoncteur, interrupteur, câbles, fusibles, prises, etc.), pour la partie en contact avec les crues (telles les prises du rez-de-chaussée). Il faut prévoir des *disjoncteurs différentiels à haute sensibilité 30 Ma*. Il faut également *rehausser le réseau de gaz naturel et de l'eau potable et le réseau d'assainissement* et vérifier l'étanchéité de leur réseau. De la même manière, le *réseau de communication* doit être sécurisé car, au moment de la crise, c'est le principal moyen de communication avec l'extérieur (recevoir l'alerte, demande de secours). Pour *protéger les appareils électroménagers*, très sensibles au contact des eaux (réfrigérateur, climatiseur, télévision, machine à laver...); il faut les mettre hors d'eau, en les soulevant en permanence, ou juste au moment de la crise (mettre ces appareils sur des tables par exemple); se procurer une pompe pour refouler les eaux vers l'extérieur, etc. Concernant le réseau d'assainissement, il est indispensable de disposer de clapets anti-retour.

Adapter les techniques constructives et le choix des matériaux à l'inondation : revêtement de mur facilement arrachable (papier peint); revêtement de sol en carrelage et éviter les revêtements sensibles telle la moquette; revêtir les portes et les encadrements de fenêtres d'une matière hydrofuge (le vernis par exemple); recouvrir les murs maçonnés avec de la faïence jusqu'au niveau habituel de la montée des eaux, etc.

Adapter l'aménagement de l'habitat à l'inondation : on a recours à cette mesure comme dernière solution, car il s'agit de laisser volontairement l'eau rentrer et inonder certaines parties de la maison (sous sol, rez-de-chaussée, cave...). En laissant l'eau rentrer librement on engendre une égalité des pressions hydrostatiques entre l'intérieur et l'extérieur de la construction, minimisant ainsi les dégâts causés par cette pression. Néanmoins, cette démarche n'est pas spontanée, il faut d'abord faire intervenir un expert afin de s'assurer que la structure interne et les matériaux de construction sont résistants à une probable submersion par l'eau. Cette pratique est appliquée principalement sur des maisons individuelles à étage, où la création d'un espace refuge est possible.

Cette mesure ne peut guère être appliquée dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche, car souvent les maisons à étage situées en bordure du réseau routier (zone à fort et à très fort risque) ont un rez-de-chaussée utilisé comme local de commerce (garages et concessionnaires automobile, grossistes ou vendeurs de détail en produits alimentaires...). Il est très difficile d'imaginer que ces personnes vont sacrifier leur fond de commerce, l'enjeu économique étant trop important. Dans le quartier de Bab-el-Oued, le rez-de-chaussée des habitations (collectives) est également utilisé pour des fins commerciales.

C. Engagement d'une gestion dynamique afin de traiter les enjeux mobiles

Nous pensons que cette étape est une étape clef dans les mesures de prévention des risques de crue et d'inondation, en particulier quand il s'agit de crues rapides. Cette gestion doit commencer bien avant la crise, dont plusieurs mesures de prévention doivent être entreprises sur le terrain. Le retour d'expérience dans le bassin-versant de l'Oued Koriche montre que la plupart des pertes humaines ont été enregistrées sur des enjeux mobiles (piétons, automobilistes).

La voie rapide Chevalet-Triolet : les piétons et les automobilistes déjà engagés sur la route parcourent un réel danger ; il faut pour cela absolument établir des accès au niveau des versants qui bordent cette route. Cela peut être un aménagement permanent ou temporaire peu coûteux (fig. 8.10). L'aménagement permanent : un chemin piéton longeant les versants, au dessus des niveaux d'eau. Pour des raisons esthétiques, en certains endroits cet aménagement peut être également temporaire : au lieu de créer des escaliers en béton, on opte pour des échelles de corde placées au moment de la crise (la seule chose à faire alors sur le terrain est de créer des aménagements permettant la fixation de ces échelles). Les échelles en corde présente l'avantage d'être bon marché, facilement et rapidement mises en place en cas de besoin, et ne nécessitant pas de grands espaces de stockage. Dans le cas où l'alerte est donnée trop tard (ou ne pas être donné), les mesures proposées ci-dessus peuvent s'avérer inefficaces. Lorsque le courant devient trop fort, les personnes ne peuvent atteindre les chemins en escalier ou les échelles pour rejoindre les hauteurs des versants. Dans ce cas de figure le *seul moyen est d'assurer un sauvetage par l'air en utilisant des hélicoptères*. Les embarcations ne peuvent être utilisés vue le caractère torrentiel des écoulements et leur charge solide importante. Les 4x4 des pompiers eux aussi sont à éviter vu la vitesse et les hauteurs d'eau qui peuvent être atteintes sur la voie rapide et dans le quartier de Bab-el-Oued.

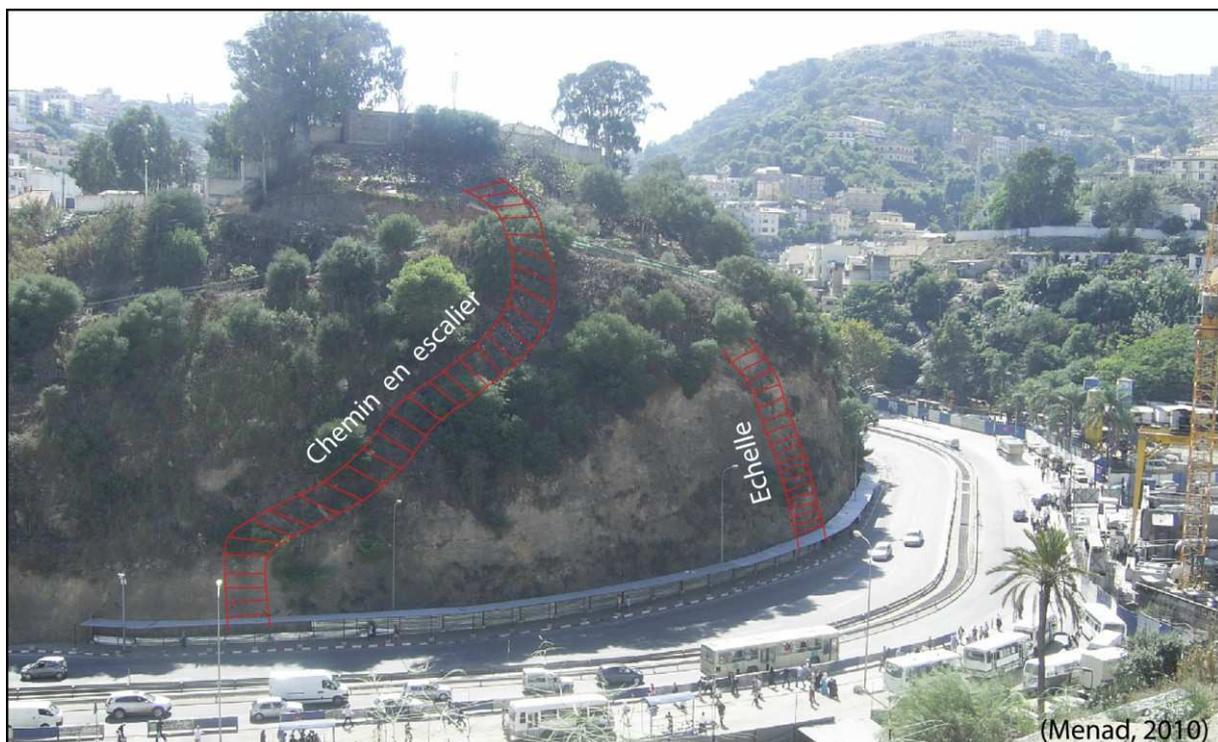


Fig. 8.10. Gestion dynamique des enjeux mobiles sur la voie rapide Chevalet Triolet.

Le quartier de Bab-el-Oued : il est formé d'immeubles à plusieurs étages, ce qui fait qu'en cas de crise, l'ensemble des citoyens du quartier dispose à priori d'une zone de refuge (étages supérieurs). Ce qui pose le plus grand problème dans le quartier, ce sont les enjeux à l'extérieur des immeubles. Bab-el-Oued est l'un des quartiers les plus denses d'Alger, où les rues sont encombrées en permanence. Ainsi, pour diminuer d'une manière significative les pertes en vie humaine dans ce quartier, il faut gérer prioritairement les enjeux en dehors des bâtiments. Au moment de la crise, les jeunes du quartier, pour pouvoir sauver de nombreuses vies humaines, ont utilisé principalement des cordes et des échelles. Nous pensons que leur choix d'outils d'intervention a été très adapté à la forme qui prennent les crues à Bab-el-Oued. La corde ou l'échelle en corde sont des outils de sauvetage à distance (pas d'engagement corporel dans la crue) ; ils présentent l'avantage d'être suffisamment solides tout en ayant un volume réduit empêchant ainsi la formation d'embâcles. Dans le cas de crues fortes et très chargées, les autres outils de sauvetage aquatique (natation, embarcation, 4x4...) font défaut. Pour ce type de crue, l'engagement corporel présente un double risque : sauveteur emporté par la crue (courant très fort), sauveteur atteint par les objets flottant dans les eaux de crue.

On propose ci-dessous quelques mesures de prévention à prendre chez les particuliers ainsi que par les services de la protection civile :

Chez les particuliers : on propose d'aménager, sur les balcons des appartements en étages, un emplacement pour échelle en corde (adaptés pour des crues rapides et chargées, pratique pour le stockage chez les particuliers), afin de permettre aux personnes prises au piège dans les rues de trouver une issue. Il peut être également utile de se procurer des gilets de sauvetage, qui peuvent diminuer le risque de noyade des enjeux en attendant l'arrivée des secours.

Chez les services de la protection civile : il faut tout d'abord former *des équipes spécialisées* dans les interventions en cas de crues rapides chargées, car l'intervention des pompiers polyvalents est beaucoup moins efficace, et met en danger la vie des victimes et celles des membres des Services de la Protection Civile. Prévoir *des interventions aériennes* est indispensables dans ce genre de crue. Tous ceux qui ont vécu ou observé le scénario de 2001 garde en mémoire l'image des personnes sur le toit des bus ainsi que celles bloquées dans leur voiture en plein milieu des rues : les personnes bloquées dans ce genre de situation ne doivent leur salut en général que grâce à des interventions aériennes. Il faut également réaliser *des exercices de simulation de crise* afin, d'entraîner 1) la population à réagir avec rationalité et de prendre les bonnes dispositifs au moment de la crise et 2) les différents services impliqués dans la gestion de la crise. Les exercices de simulation sont également un bon moyen pour tester l'efficacité et le niveau d'entraînement des équipes d'intervention, et tester en même temps l'efficacité du mode opérationnel prévue pour gérer la crise (donner l'alerte, outils et techniques d'intervention, coordination entre les différents services concernés...). On propose ici que les exercices de simulation soient initiés par les services de la Protection Civile et les collectivités locales, car une démarche top-down *via* les politiques et les médias est peu probable.

D. *Système de mutualisation ou d'assurance*

Il joue un rôle très important dans la répartition des coûts de la catastrophe sur une échelle plus étendue et peut ainsi rétablir l'équilibre plus rapidement sur le lieu de la catastrophe. En Algérie, les souscriptions en assurances catastrophes naturelles (Cat Nat) chez les particuliers ont atteint à peine les 7 %, malgré que cela fasse sept ans que les assurances Cat Nat sont devenues, par la valeur de l'ordonnance n°03-12 du 26 août 2003, obligatoires à l'échelle nationale (Amarni, 2011 ; Hamida, 2012). Le désintéressement que présentent les particuliers à l'égard des assurances Cat Nat est lié en grande partie au manque de campagnes d'informations sur l'intérêt et l'obligation des assurances Cat Nat, mais la non souscription des particuliers est due également au non contrôle et à l'impunité des autorités envers les pratiques sur le terrain.

Conclusions

La cartographie des zones à risque de crue et de ruissellement superficiel a révélé que le bassin-versant de l'Oued Korche présente actuellement plusieurs zones à niveau de risque alarmant (risque très fort, risque fort).

Les zones à risque très fort (route principale qui longe Baranes, voie rapide Chevalet-Triolet, partie aval du Chemin du Fort, quartier de Bab-el-Oued), résultent toutes de la même configuration sur le terrain : *le lit de l'oued principal (du bassin-versant ou des sous-bassins-versant) a été canalisé et enterré avec des ovoïdes sous dimensionnés qui présentent des anomalies structurales ; en surface, à la place du lit canalisé, une route a été installée en bordure de laquelle un tissu urbain s'est développé.* Le quartier de Bab-el-Oued fait exception puisque le niveau de risque très fort ne résulte pas exactement de la configuration citée ci-dessus. Dans ce quartier, le risque résulte principalement du fait qu'il soit développé dans la partie extrême aval du bassin-versant (exutoire) où l'ensemble des ondes de crue convergent pour donner un caractère polygénique marqué à la réponse hydrologique.

Les zones à risque fort (amont de l'oued Baranes, nord-ouest et aval du sous-bassin versant de Sidi Medjber, amont du Chemin du Fort, sous-bassin de Birtraria) résultent d'une extension des zones urbaines à proximité du réseau hydrographique. Une urbanisation qui s'est développée, en certains lieux, directement dans le lit mineur du réseau hydrographique (partie amont du sous-bassin-versant du Baranes).

Les zones à risque faible (le reste du territoire du bassin-versant) correspondent soit à des zones urbaines éloignées du réseau hydrographique, soit à des zones de concentration des écoulements ou des zones de débordement, soit à des zones non urbanisées (sol nu, couvert végétal) à niveau de vulnérabilité très faible.

La lecture de la carte du risque révèle que le risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche est important. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la façon dont ce risque est géré sur le terrain. En utilisant l'une des démarches scientifiques appliquée à la gestion du risque, on a pu à la fois évaluer l'état actuel de la gestion du risque, souligner les anomalies que présente le système de gestion local, et *in fine* de proposer des outils de prévention dans le but d'améliorer la situation actuelle :

1. A travers cette étude on a pu constater que les outils de prévision météorologique ont connu de gros progrès avec le lancement du réseau CHEMS, qui est capable de fournir de nombreuses données météorologiques avec un très bon niveau de précision.

2. Les prévisions hydrologiques et hydrométéorologiques, qui permettent de prévoir la transcription hydrologique de l'événement météorologique sur le terrain, reste aujourd'hui inexistante dans l'Oued Koriche. A noter ici que les prévisions hydrométéorologiques sont indispensables dans la gestion du risque de crue et de ruissellement superficiel : sans cette donnée, on ne peut ni fixer la hauteur de l'alerte à donner, ni bien organiser la phase d'anticipation et, par la suite, on ne peut tout simplement pas assurer une gestion efficace de la crise.

3. Les citoyens n'ont pas été alertés le jour de l'événement du 10 novembre 2001. Aujourd'hui encore, les services responsables et les outils utilisés pour donner l'alerte restent non définis sur le terrain. On pense que l'Oued Koriche ainsi que l'ensemble des villes algériennes possède un moyen très efficace et totalement gratuit pour déclencher l'alerte en cas de risque, à savoir la mosquée. Les médias audio et audio-visuels, le téléphone et/ou le sms sont aussi des outils utiles pour lancer l'alerte.

4. Une fois l'alerte donnée, il faut anticiper la crise, les moyens d'anticipation étant très nombreux et différant selon la nature (inondation, crue, ruissellement superficiel) et le niveau de risque. Dans l'Oued Koriche, en zones soumises au risque de ruissellement superficiel, dès que l'alerte est donnée, il faut : gérer et conditionner la circulation des personnes et des véhicules ; en zones de ruissellement superficiel, l'évacuation des personnes de leur maison doit être assurée par des services spécialisés (souvent les sujets sont plus en sécurité chez eux qu'à l'extérieur). En zone de débordement, les personnes risquent l'inondation, de ce fait il faut disposer d'une zone d'abri (l'étage de la maison elle-même, un endroit désigné par la collectivité locale) afin de mettre les personnes et les objets de valeurs hors d'eau. En zone exposée aux crues, il faut non seulement évacuer les maisons situées en zones à niveau de risque très fort, en particulier les habitants de rez-de-chaussée et des premiers étages du quartier de Bab-el-Oued et les maisons qui se trouvent au bord de la voie rapide, mais aussi gérer la circulation des enjeux mobiles (piétons et automobilistes).

5. La gestion de la crise, pour être efficace, doit être organisée et assurée selon des consignes développées dans *le plan ORSEC*. Ces types de plan sont, encore aujourd'hui, absents dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Cette absence de plan ORSEC est l'une des principales causes de la désastreuse gestion de la crise du 10 novembre 2001.

6. Après le passage de la crise vient les travaux de mitigation, qui assurent la reprise progressive de la fonctionnalité du territoire. Dans le bassin-versant de l'Oued Koriche, ces travaux ont commencé immédiatement après le passage de la crise, malgré la rapidité des réactions et la volonté de rétablir l'ordre dans le bassin-versant, ces travaux ont été menés pour la plupart dans la précipitation (structure des canaux à ciel ouvert installé dans le Chemin du Fort et au niveau de la voie rapide à titre d'exemple) et dans une logique de reconstruire le territoire à l'identique. Ce type de démarche n'est pas propre à Alger ; elle est par exemple signalée dans le temps de l'après crue 1999 dans l'Aude, décrit par G. Arnaud-Fassetta et M. Fort (2009).

7. Le travail de retour d'expérience nous a amené à déduire que l'ampleur des dégâts de 2001 est le résultat tout d'abord *d'un travail de prévision non fait, d'une alerte non donnée et d'une gestion désastreuse de la crue*.

En se servant de l'ensemble des informations, des analyses, des simulations et du retour d'expérience, on a essayé de trouver des outils et des techniques de prévention (structurelles et non structurelles) capables de réduire le risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Concernant les mesures structurelles, elles restent jusqu'à présent les plus favorisées par les collectivités. Plusieurs de ses approches peuvent être théoriquement appliquées au bassin-versant de l'Oued Koriche (augmentation des capacités d'évacuation, atténuation du caractère polygénique de la réponse hydrologique, augmentation des capacités de stockage), chacune présentant des avantages et des inconvénients. *Les mesures structurelles dans le bassin-versant de l'Oued Koriche ne peuvent pas régler définitivement le problème des crues et du ruissellement superficiel* car il est impossible d'opter pour un dimensionnement optimal du réseau pluvial ou des ouvrages de rétention, capable d'évacuer ou de stocker une crue centennale (le rapport coûts-bénéfices n'est pas favorable à cela). Même si les aménagements sont suffisamment bien dimensionnés pour faire face à une crue centennale, le caractère intrinsèque des événements météorologiques (cyclogenèse très intense, à plusieurs pics) peut rapidement inhiber le fonctionnement de ces derniers : 1) en raison du caractère très intense des pluies et les pentes raides du bassin-versant de l'Oued Koriche, la capacité d'infiltration et d'évacuation des eaux dans le réseau pluvial peut être rapidement dépassée ; 2) en raison des pics multiples observés pour un même épisode pluvieux, les aménagements de type ouvrage de rétention, une fois remplis, n'assureront plus aucun rôle et, lors du second pic d'intensité, le bassin-versant reprend un fonctionnement hydrologique normal. D'un autre côté, ces aménagements peuvent être eux-mêmes une source de risque car il donne un faux sentiment de sécurité aux citoyens.

Les mesures non structurelles visent à atténuer le risque en minimisant l'exposition des enjeux à l'aléa. Il existe de nombreuses approches d'intervention possible dont les principales sont : la modification des modes d'occupation et d'usage des sols ; la modification de la vulnérabilité des éléments physiques, tout en gardant les usages initiaux ; l'engagement d'une gestion dynamique afin de traiter les enjeux mobiles. Ces mesures sont beaucoup moins coûteuses, en comparaison avec les mesures structurelles, et plus respectueuses du fonctionnement hydrologique naturel et de l'environnement. Dans le cas de l'Oued Koriche, ces dernières peuvent être un très bon remède contre les crues et les ruissellements rapides et intenses, en particulier pour une gestion dynamique des enjeux mobiles destinée à réduire significativement les pertes en vies humaines.

Synthèse de la troisième partie

Dans cette partie on a essayé de faire avancer les connaissances et la gestion des risques de crues et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.

Dans un premier temps, on a démontré que la configuration météorologique (épisode cyclogénique très actif) des 9-10 novembre 2001, analysée dans le contexte général du climat méditerranéen, ne présente aucune exception. De ce fait l'ampleur exceptionnel des dégâts ne s'explique pas uniquement à travers l'événement météorologique, comme laisse penser certains discours politique, des médias, et même de certains scientifiques.

Afin de comprendre au mieux le fonctionnement de l'hydrosystème dans sa complexité et de chercher des explications à l'ampleur de dégâts occasionnés par l'événement des 9-10 novembre 2001, on a eu recours aux outils de simulations numériques (l'automate cellulaire *Ruicells*). Grâce à ce dernier, on a pu caractériser les mécanismes de la genèse et du développement de la crue en tous points du bassin-versant, et souligner une complexité particulièrement remarquable de cette genèse de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (réponse hydrologique polygénique), tandis que celle du bassin-versant de Beni Messous est beaucoup plus simple (partie amont réactive à l'origine de la réactivité observée à l'exutoire). Les bassins versants Côtiers et tenant compte de leur petite taille, présentent un faible risque de développement de phénomène de crues à caractère intense. Après avoir évalué l'efficacité du système géomorphologique, on a reproduit la réponse hydrologique en intégrant dans nos calculs numériques le paramètre "emprise urbaine". A travers cette opération on a pu quantifier l'impact de l'emprise urbaine sur le développement de la réponse hydrologique à tout point du bassin-versant. On a pu démontrer que pour un état d'occupation antérieure (cas du 1986) à celle du 2001, les débits de pointe et les volumes ruisselés auraient été moins importants pour une occupation du sol moins dense. Cependant, l'évolution de la densité urbaine n'est pas proportionnelle à celle de la réponse hydrologique (débit de pointe en particulier). Ce constat peut être expliqué par le fait que lors des épisodes pluvieux à caractère intense la capacité infiltration des eaux est rapidement dépassée, masquant ainsi, en partie, l'effet d'imperméabilisation des sols provoqué par l'extension urbaine. On déduit donc que dans certains cas la magnitude même de l'aléa trouve une explication dans la distribution spatio-temporelle de la pluie. On retient des différents analyse et traitement numérique que *les variables environnementales (météorologie, physiographie, géomorphologie/formations superficielles, mode d'occupation du sol) ne peuvent être considérées séparément. L'hydrosystème est à examiner dans sa globalité et complexité.*

Puis à travers une étude systémique on a pu déterminer les facteurs prédisposant, déclenchant et aggravant des phénomènes de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. On a pu constater à travers cette analyse que les facteurs prédisposant et déclenchant n'expliquent pas, à eux seuls, l'ampleur des dégâts observés le 10 novembre 2001, l'explication est alors à chercher auprès des autres facteurs aggravants non pris en compte dans les simulations numérique. Cette démarche analytique a pu mettre en évidence que de nombreuses facteurs d'ordre politique (manque de texte législatif, manque de volonté politique), d'ordre anthropique (artificialisation irréversible du réseau hydrogra-

prique, urbanisation en masse, la structure et l'orientation des linéaires, la structure et la capacité défaillante du réseau d'assainissement, l'imperméabilisation des surfaces, déforestation,...), et d'ordre gestionnaire (manque d'entretien du réseau d'assainissement, construction en zones à haut risque, absence d'une gestion intégrée du risque, absence de services d'alerte, l'absence d'un plan ORSEC, ...), étaient à l'origine de l'amplification des dégâts matériels mais surtout en vies humaines (augmentation de l'exposition de la population à l'aléa).

L'ensemble des informations collectées ou générées au cours de notre travail ont servi à produire des supports cartographiques (carte d'aléa, carte de vulnérabilité, carte de risque), le but était de fournir des documents simples, synthétiques et facilement assimilables par les gestionnaires des collectivités ainsi que la population locale. La cartographie du risque a mis en évidence que le risque de crue et de ruissellement superficiel est largement étendu dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : risque très fort (route principale qui longe Baranes, voie rapide Chevalet-Triolet, partie aval du Chemin du Fort, quartier de Bab-el-Oued), risque fort (amont de l'oued Baranes, nord-ouest et aval du sous-bassin versant de Sidi Medjber, amont du Chemin du Fort, sous-bassin de Birtraria), le reste du bassin-versant présente également un risque de développement des ruissellement superficiel mais ça reste faible. Ce niveau de risque alarmant nous a incité à s'interroger sur la manière avec laquelle le risque est géré sur le terrain. Commençant par le premier maillon dans la chaîne de la gestion, à savoir les services de prévision, on constate que à part les prévisions météorologique qui sont actuellement correctement faites (installation de la nouvelles station CHEMS), les autres services de prévision (prévisions hydrologiques et hydrométéorologiques) sont quasiment absents. Les services et les moyens pour donner l'alerte restent encore aujourd'hui non définis. L'absence d'un plan ORSEC limite l'efficacité et la bonne organisation des travaux d'anticipation et de gestion de la crise. Les travaux de mitigation sont souvent immédiatement pris en charge par les autorités afin que la vie puisse reprendre rapidement, néanmoins ces travaux sont souvent menés avec une logique *de reconstruire le territoire à l'identique*.

Après une mise au point sur l'état actuel de la gestion du risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche et à la lumière du travail de retour d'expérience, on a essayé de proposer des mesures d'intervention (structurale et non structurale) afin de diminuer le niveau de risque dans l'Oued Koriche. On retient de cette dernière démarche que dans l'Oued Koriche les mesures structurelles (augmentation de la capacité d'évacuation des écoulements, augmentation de la capacité de stockage) ne peuvent résoudre radicalement le problème de crue et de ruissellement superficiel, ces mesures peuvent même avoir un effet inverse en donnant un faux sentiment de protection à la population. Dans le cas du bassin-versant de l'Oued Koriche (crues rapides, intenses aux pics multiples) les mesures structurelles doivent être obligatoirement accompagnées de mesures non structurelles qui visent principalement à réduire le risque à travers une minimisation de l'exposition des enjeux à l'aléa (réduire la vulnérabilité des enjeux).

Conclusion générale

Notre travail a porté sur l'une des plus dangereuses formes du risque hydrométéorologique dans le bassin méditerranéen, à savoir les crues et les ruissellements superficiels à caractère rapide et intense, déclenchés par des configurations orageuses convectives de forte intensité et d'extension spatio-temporelle réduite, et qui frappe une (ou des) métropole(s) du bassin méditerranéen. La partie ouest du grand Alger a été choisie pour analyser ce type de risque. Un choix justifié par le fait qu'elle présente un tissu urbain très riche où on trouve la ville occidentale, la ville arabe et un tissu urbain mitigé par deux civilisations, mais surtout ce terrain a été choisi car dans le passé, il a connu un événement de crue et de ruissellement superficiel sans précédent dans le bassin méditerranéen.

L'objectif principal de cette thèse était dans un premier temps d'analyser le risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah (nord ouest de l'Algérie) avec des outils de traitement classique et de simulation numérique, dans le but de pousser plus loin les connaissances liées aux mécanismes de la genèse et de l'évolution temporelle de la crue en tout point du bassin-versant. Cette démarche a permis de surpasser les analyses habituellement sectorielles et de pouvoir *réaliser un traitement plus global de la problématique en prenant en compte l'ensemble des facteurs (naturels et anthropiques) de l'hydrosystème*. Le second objectif était de donner un caractère plus universel (ville du nord algérien voire même du bassin méditerranéen) à la démarche d'analyse utilisée pour traiter des problèmes des crues et de ruissellements superficiels dans le Massif de Bouzaréah. Pour cela, on s'est contraint à mener notre démarche avec une base de données et des outils de traitements disponibles et accessibles pour l'ensemble des régions nord-algériennes. Les objectifs cités ci-dessus ont nécessité un travail pluridisciplinaire qui a fait appel aux sciences de la Terre et de la vie, aux sciences sociales et humaines ainsi qu'un travail de collecte et de génération de données très important.

Afin de pouvoir restituer la problématique traitée dans ce travail (risques de crue et de ruissellement superficiel dans les métropoles méditerranéenne) dans un cadre conceptuel général, et en tenant compte de son caractère pluridisciplinaire, on a consacré la première partie à préciser les sens des différents concepts tel qu'ils sont entendus dans ce travail. Il était également nécessaire dans cette première partie d'expliquer les facteurs et les mécanismes de formation de crue et de ruissellement superficiel en milieu urbain et de souligner que, en plus de la complexité spatio-temporelle des processus de genèse du ruissellement de surface et des crues, dans le milieu urbain se rajoute le problème des différentes formes d'anthropisation dont les conséquences sont majoritairement imprévisibles au départ par l'aménageur. Les conséquences de l'anthropisation du territoire ne peuvent être identifiées que par le passage d'un événement intense, d'où tout l'intérêt de développer des approches qui permettent d'anticiper en évaluant au préalable les impacts de cette anthropisation.

Après avoir précisé les concepts et expliqué le cadre dans lequel évolue le risque de crue et de ruissellement superficiel en milieu urbain, dans la deuxième partie de notre travail, on a commencé l'analyse des différents aspects de terrain à travers un travail de collecte et de production de l'information.

Le *contexte social* a été étudié *via* une reconstitution de l'histoire urbaine de la ville d'Alger, ce qui nous a permis de mettre en évidence la richesse de son tissu urbain (l'architecture arabe et occidentale), mais surtout de comprendre l'anarchie apparente dans certains de ses quartiers. Dans un moment de stress politique, la planification et le contrôle des pratiques sur le terrain deviennent secondaires, le tissu urbain s'étend alors d'une manière sauvage et des zones à risques peuvent être anthropisées d'une manière irréversible. L'urbanisation des zones à risque est également le résultat d'une longue absence de textes législatifs relatifs à la gestion des risques majeurs, dont la première apparition dans la législation algérienne est très récente (première loi 1985). La reconstitution de l'évolution spatio-temporelle du tissu urbain dans le Massif de Bouzaréah s'est faite *via* un travail de photo-interprétation et/ou de traitement numérique d'images (documents et informations bruts) tels les cartes topographiques, les images Google Earth et les images satellitaires ; tous accessibles et disponibles sur l'ensemble de la région nord-algérienne et dont les frais d'acquisition sont nuls ou symboliques. On a démontré à travers une confrontation des résultats obtenus avec des méthodes de traitements différentes que : 1) l'identification des *principaux types d'occupation du sol existant dans le Massif de Bouzaréah* par un travail de photo-interprétation basé sur un fond de carte topographique au 1/25 000, nécessite d'être complété par d'autres documents (photographies aériennes, plans cadastraux) et un travail de terrain, 2) une image *LANDSAT de 30 m de résolution, gratuite et facilement acquise, donne accès à une fiable classification qualitative et quantitative des principales classes d'occupation du sol (tissu urbain dense, tissu urbain dispersé, zones industrielles, couvert végétal, sol nu)*.

L'analyse du *contexte physique* du risque de crue et de ruissellement superficiel dans le Massif de Bouzaréah a été, dans un premier temps, effectuée avec des méthodes d'analyse classiques, donc sectorielles. Le Massif de Bouzaréah est un massif primaire aux roches cristallophylliennes, qui se structurent en plusieurs unités tectoniques qui se superposent et se séparent par des contacts anormaux orientés est-ouest. *Les formations sédimentaires (calcaires, grès, marnes, argiles) du Tertiaire sont plus au moins sensibles à l'érosion. L'anthropisation du milieu est à l'origine d'autres formations propices à l'érosion, à savoir les remblais disposés sauvagement en surface.* D'un point de vue hydrologique, le Massif de Bouzaréah comprend trois unités hydrologiques, le bassin-versant de Beni Messous, le bassin-versant de l'Oued Koriche ainsi qu'une vingtaine de petits sous-bassins versants côtiers. Des unités qui présentent une prédisposition naturelle (avec de degrés d'aggravation différents d'une unité à l'autre) à la formation des crues, des ruissellements superficiels et des inondations : on retiendra un relief de forme allongé ou compact, des pentes moyennes à fortes, un réseau hydrographique théorique dense et très efficace par endroits et, de par les caractéristiques climatiques du bassin méditerranéen, en particulier les événements cyclogénétiques à développement rapide, observés particulièrement en automne et en hiver.

La troisième partie de notre travail a permis d'analyser les phénomènes de crue et de ruissellement superficiel dans Massif de Bouzaréah avec *une approche systémique où l'ensemble des facteurs (naturel et anthropique) de l'hydrosystème sont considérés simultanément.*

Selon les archives exploitées, l'événement météorologique cyclogénèse le plus intense (cumul pluviométrique, dégâts occasionnés) qui a frappé le Massif de Bouzaréah dans le pas-

se est celui des 9-10 novembre 2001. Il s'agissait d'une configuration synoptique de vaste étendue spatiale et qui a duré plusieurs jours et dont les conséquences, variables, ont été observées sur les deux rives du bassin méditerranéen. Dans notre étude, on a analysé uniquement les deux jours (9 et 10 novembre 2001) qui correspondent à l'arrivée et l'installation de la dépression au-dessus de l'ouest algérien. Dans cette région, l'événement météorologique s'est manifesté sous forme d'une configuration de cyclogenèse très active. En termes de précipitation, l'événement s'est décomposé en deux séquences (*i.e.*, la cellule convective s'est divisée en deux après avoir été associée au front froid des basses couches de la troposphère) : des pluies régulières dans la soirée du 9/11 (avec un cumul de 114 mm en 5 h) suivies par deux pics d'intensité (55 mm en 30 min entre 8 h et 8h30 puis de 9h30 à 10 h) dans la matinée du 10/11 ; le cumul total était de l'ordre de 263 mm. De ce fait (intensité record) et en raison de la difficulté de retracer la cinématique et le hyétogramme des événements du passé, on a choisi l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 comme l'événement de référence et sur lequel se sont basées l'ensemble des simulations numériques ainsi que l'analyse systémique. L'un des principaux intérêts de l'analyse de la configuration météorologique de l'événement de référence et de leur restitution dans le cadre général du climat méditerranéen est d'avoir démontré que celle-ci n'a rien d'exceptionnelle et qu'elle fait partie des épisodes cyclogéniques très récurrents dans ce genre de climat. Un constat qui remet en cause les nombreuses hypothèses lancées par certains médias, scientifiques et politiciens, qui ont justifié la hauteur des dégâts exceptionnelle et sans précédent dans le bassin méditerranéen causé par cet événement par l'intensité exceptionnelle de l'événement météorologique lui même. Ce grand écart entre l'intensité de l'événement météorologique et l'ampleur de la catastrophe restait inexplicé, d'où l'intérêt d'approfondir l'analyse du fonctionnement interactif des différents paramètres constitutifs de l'hydrosystème (forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement, système de pentes, hyétogrammes, cartes d'occupation du sol, coefficients de ruissellement, taux de refus d'infiltration, etc.).

Afin d'analyser l'évolution spatio-temporelle des processus hydrologiques en tenant compte de leur complexité systémique, on a eu recours au logiciel *RuiCells* : c'est un outil de simulation numérique qui appartient à la famille des automates cellulaires géographiques (ACGs). Les hydrosystèmes des trois unités hydrographiques du Massif de Bouzaréah ont été analysés en deux temps. Les *inputs* (MNT, hyétogramme, carte d'occupation du sol) utilisées dans les simulations réalisées dans ce travail ont été reproduites tout en utilisant des documents bruts facilement et gratuitement accessibles.

En premier lieu, leur efficacité morphologique a été étudiée en tout point de l'espace à travers une mise en jeu progressive des différents paramètres du système hydromorphologique (forme, efficacité structurale du réseau d'écoulement, système de pentes). Les outputs de ces simulations sont nombreuses, importantes et originales, elles permettent de considérer le comportement hydrologique à des échelles plus fines que celle du bassin-versant (sous-bassins-versant, tout point de l'espace). Les principales outputs de ces simulations sont : la signature surfacique (configuration de la réponse hydrologique interne), la carte des isodistances (cellules équidistantes productrices du débit de pointe), la carte de l'évolution spatio-temporelle des écoulements (surfaces, débits) en tout point de l'espace, les surfaçogrammes,

les distançogrammes et les morphogrammes. A travers ces *outputs*, de nombreuses informations ont pu être déduites, dont les principaux sont :

- *Identification de la nature des mécanismes qui gèrent les interactions entre les composantes morphologiques (forme des unités hydrodologiques, structure spatiale du réseau hydrographique, systèmes des pentes) ainsi que leur inscription spatiale et temporelle dans le bassin-versant ;*
- *Quantification de l'effet exercé par chacune des composantes morphologiques sur la réponse hydrologique théorique, à travers des indices morphosynthétiques ;*
- *Analyse de la réponse hydrologique, en étudiant son évolution en tout point de l'espace, ce qui fait ressortir certains comportements locaux (anomalies) masqués à l'échelle de la réponse globale.*

Grâce à ces simulations, on a pu mettre en évidence *la complexité remarquable qui caractérise les mécanismes de la genèse et du développement de la crue dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. Un niveau d'aléa élevé (crues rapides à forte intensité) a été observé à différentes échelles spatiales de l'Oued Koriche, mais tout particulièrement dans sa partie aval où les ondes de crue venant des différents sous-bassins-versants se rejoignent pour exprimer le fort caractère polygénique de la réponse hydrologique de ce bassin-versant.* Le comportement hydrologique du bassin-versant de Beni Messous, en comparaison avec celui de l'Oued Koriche, est beaucoup moins complexe, *le Beni Messous est doté d'une partie amont réactive qui est à l'origine de la réactivité observée à l'exutoire.* Vu leur petite taille, le risque de développer des crues ou des ruissellements superficiels de forte intensité au niveau des bassins versants côtiers reste faible. Ces derniers sont exposés à un autre type de risque lié à l'entraînement des eaux vers le littoral, qui est causé par les rafales de vents qui accompagnent ce type d'événement météorologique. Ces eaux, en regagnant la mer, emportent tout ce qui trouve sur leur chemin.

En second lieu, et après avoir analysé et évalué l'efficacité morphologique de chacune des unités hydrographiques du massif de Bouzaréah, *on a mesuré l'impact de l'emprise urbaine sur le développement spatio-temporel de la réponse hydrologique.* Le rôle de l'emprise urbaine dans l'aggravation des dégâts observés le 10 novembre 2001 est évoqué dans de nombreux articles mais cet impact n'a jamais pu être quantifié. Pour plusieurs raisons liées principalement à l'indisponibilité des données nécessaires à une simulation de ce type (principalement la répartition spatiotemporelle fine des épisodes pluvieux), l'impact de l'emprise urbaine n'a pu être quantifié qu'au niveau du bassin-versant de l'Oued Koriche. Il s'agit d'un bassin-versant fortement urbanisé dont la croissance urbaine ne cesse d'augmenter. En utilisant un épisode de pluie identique (événement des 9-10 novembre 2001), on a effectué une simulation du comportement hydrologique pour deux états d'occupation du sol antérieurs (1986, 2005) de l'Oued Koriche. *Les résultats de ces simulations démontrent que les débits de pointe et les volumes ruisselés auraient été moins importants pour une occupation du sol moins dense.* On enregistre une croissance de débit de pointe de 6 % pour une croissance de 13 % de zones urbanisées, *on déduit ainsi que la croissance des espaces urbanisés n'est pas proportionnelle à celle de la réponse hydrologique.* Ce peut être expliqué par le fait que le caractère intense des pluies rend les surfaces rapidement ruisselantes, masquant en partie le

rôle aggravant de l'imperméabilisation des sols causée par l'extension urbaine. Par la suite, *la magnitude même de l'aléa trouve une explication dans la distribution des pluies dans le temps, qui a forcé le caractère polygénique de la réponse hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche. On déduit alors que les variables environnementales (météorologie, physiographie, géomorphologie/formations superficielles, mode d'occupation du sol) ne peuvent être considérées séparément.*

En plus de l'ensemble des résultats cités ci-dessus, les simulations hydrologiques révèlent un tout autre constat : les valeurs de débit de pointe calculées (dans le cadre des limites de calcul mentionnées) ne reflètent pas tout à fait l'ampleur de la catastrophe du 10 novembre 2001. Pour cette raison, on a réalisé une analyse systémique afin de chercher des explications dans d'autres facteurs de l'hydrosystème qui n'ont pas pu être pris en compte dans nos analyses (sociales, physiographiques et simulation numérique). Parmi ces facteurs, on cite : la structure et la capacité du réseau d'assainissement, les effets indirects de l'extension urbaine.

L'étude systémique nous a permis de mettre en évidence les facteurs prédisposants, déclenchants et aggravants à l'origine du risque de crue dans ce bassin. L'étude systémique nous a permis également d'effectuer une sorte de synthèse de l'ensemble des acquis obtenus au cours des chapitres précédents (facteurs prédisposants, déclenchants) et *de mettre en évidence la prédisposition naturelle de l'Oued Koriche à la génération des phénomènes de crue et de ruissellement superficiel déclenchés par un événement météorologique d'intensité remarquable.* Mais à travers cette analyse, on a surtout exploité les facteurs aggravants des crues et des ruissellements superficiels observé le 10 novembre 2001 : *les principaux sont : l'artificialisation du réseau hydrographique, l'imperméabilisation des surfaces, la structure et l'extension spatiale du tissu urbain (désordre foncier) et son réseau routier qui est orienté dans le sens des pentes (linéaire favorable à la formation et la concentration des crues), la structure et la capacité d'évacuation du réseau d'assainissement non adaptées et défectueuses ainsi que son état externe et interne très dégradé (l'eau a ruisselé en totalité en surface), l'absence de services d'alerte, l'absence d'un plan ORSEC ou tout autre plan de gestion de crise, d'où la gestion catastrophique de la crise du 10 novembre 2001.* Si le plan ORSEC avait pu être déclenché à temps, on aurait pu sauver beaucoup de vies humaines ainsi que certains biens matériels (*i.e.*, un lourd bilan en perte de vie, près de 1000 morts).

En ce basant sur l'ensemble des analyses, des simulations et de calculs réalisés au cours de ce travail, on a essayé de cartographier le risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche. A travers cette cartographie, on a pu distinguer trois niveaux de risque : *les zones à risque très fort* (route principale qui longe Baranes, voie rapide Chevalet-Triolet, partie aval du Chemin du Fort, quartier de Beb-El-Oued) ; les zones à risque fort (amont de l'oued Baranes, nord-ouest et en aval du sous-bassin-versant de Sidi Medjber, en amont du Chemin du Fort et dans le sous-bassin de Birtraria) ; zones à risque faible (le reste du territoire du bassin-versant). Les deux premiers niveaux de risque résultent d'une anthropisation anarchique du terrain où le concept d'une gestion intégrée du risque est absente. Partant de ce constat, on a proposé une démarche, non exhaustive certes, mais à travers laquelle on a pu : 1) évaluer l'état actuel de la gestion du risque et souligner les anomalies que présente le système de gestion local (prévision météorologique bonne, prévision hydrométéorologique absente, outils de lancement de l'alerte et plan de gestion de crise inexistant). Le

travail de retour d'expérience nous démontre que l'ampleur exceptionnelle des dégâts observés le 10 novembre 2001 fut le résultat tout d'abord *d'un travail de prévision non fait, une alerte non donnée et une gestion désastreuse de la crise* ; 2) proposer des mesures de préventions dans le but d'améliorer la situation actuelle. Cette démarche nous a permis de relever que *les mesures structurales dans le bassin-versant de l'Oued Koriche ne peuvent pas régler radicalement le problème des crues et du ruissellement superficiel. Ces mesures doivent être obligatoirement complétées par d'autres dites : non structurelles*, qui visent à réduire le risque en minimisant l'exposition des enjeux à l'aléa et qui sont de ce fait moins lourdes, beaucoup moins coûteuses et ne modifiant guère le fonctionnement physique de l'hydrosystème.

Perspectives de recherches

L'ensemble des travaux menés sur le Massif de Bouzaréah et tout particulièrement sur le bassin-versant de l'Oued Koriche nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème au-delà de l'unité « bassin-versant » communément utilisée dans les études hydrologiques. Ça nous a permis également de tracer un premier état des lieux (analyse et cartographie) concernant le niveau du risque de crue et de ruissellement superficiel. Cependant, ce travail nous a amené à poser de nombreuses questions qui sont restées sans réponse, d'où la nécessité de compléter les analyses réalisées ou entrepris ici afin de pouvoir comprendre au mieux l'inscription des phénomènes de crues et de ruissellements superficiels dans ce terrain très complexe, et pouvoir par la suite les gérer convenablement :

1. L'un des facteurs les plus aggravants du risque de crue et de ruissellement superficiel observés dans le bassin-versant de l'Oued Koriche est la forte charge solide. Un problème qui n'a pas pu être pris en considération dans le présent travail, ni d'ailleurs par les autres travaux réalisés sur ce terrain. On a pu simuler uniquement des eaux claires et non des eaux chargées, cette dernière simulation reste très difficile à réaliser correctement, du fait que la source exacte qui alimente les eaux par leur charge solide reste méconnue. Pour pouvoir avancer sur cet aspect, il faudrait mener un travail plus fin dans le but d'établir une carte des formations superficielles à l'échelle du bassin-versant.
2. Suite à notre travail de terrain, on a constaté que le réseau d'assainissement est rapidement inhibé en particulier les avaloirs de collecte des eaux de ruissellement en zone urbaine. Cela est dû au fait que les capacités d'infiltration des eaux sont dépassées par le caractère torrentiel des écoulements en surface, ce qui maintient la circulation des écoulements en surface. Il est donc nécessaire d'engager un travail en hydraulique dans le but de concevoir d'autres structures d'ouvrage (canaux à ciel ouvert, ouvrages de réception, avaloirs) spécifiques à la collecte et à la réception des crues rapides s'écoulant sur un relief à fortes pentes.
3. Les événements cyclogénétiques observés en climat méditerranéen sont souvent accompagnés de rafales de vent très fortes, provoquant l'écrasement brutal des vagues sur le littoral. Sachant que l'exutoire du bassin-versant de l'Oued Koriche, les points de rejets du réseau d'assainissement ainsi que celui du réseau pluvial (en cours de construction) se trouvent tous au niveau du littoral en contact direct avec la mer, la question qui se pose ici est : quel effet ce

phénomène aura-t-il sur la capacité d'évacuation de la crue à l'exutoire du bassin-versant ou au niveau des points de rejet des réseaux d'évacuation hydraulique ? Un effet qui reste, à notre connaissance, non quantifié, ce qui peut mettre en cause les valeurs de capacité d'évacuation des collecteurs (réseau d'assainissement et réseau pluvial) communiquées, car elles étaient estimées en supposant que le réseau d'évacuation fonctionne en pleine capacité. On peut également se demander l'effet qu'ont les eaux marines au débouché de l'Oued M'Kacel sur l'évacuation de la crue à l'exutoire : l'hypothèse que celles-ci ont pu ralentir (voire stopper) l'évacuation des eaux au niveau de l'exutoire naturel de l'Oued Koriche est plus que probable.

L'exploitation des données climatiques du Massif de Bouzaréah nous a permis de relever un événement météorologique au cumul comparable à celui des 9-10 novembre 2001 (263 mm). Ce dernier a été observé les 28-29 novembre 2007 (233,5 mm), les dégâts ont été incomparables au niveau du Grand Alger : quelques dégâts matériels, 3 morts et 6 blessés légers. Ce qui permet de poser la question : pourquoi des événements météorologiques de cumuls proches reçus par un territoire semblable génèrent-ils des réponses hydrologiques très différentes ? De nombreuses réponses peuvent être fournies à cette question : 1) *répartition spatio-temporelle de l'événement météorologique différente* : on a pu constater avant que *la magnitude même de l'aléa s'explique dans la distribution des pluies dans le temps*, mais également dans l'espace (épicode de l'événement), ce qui laisse penser qu'en 2007, la distribution de l'événement météorologique a sans doute été différente de celle de 2001. D'où l'intérêt dans ce contexte climatique de mettre en place des stations météorologiques capables de prévoir et de mesurer à une échelle spatio-temporelle très fine les différents données météorologiques ; 2) *autres facteurs inconnus* : il est possible que la différence de la réponse ne vienne pas uniquement de la répartition dans le temps et dans l'espace de l'événement météorologique, et que ce très grand écart puissent venir d'autres facteurs qui restent pour l'heure non étudiés.

Références Bibliothèques

- Abbott M.B., 1991. Hydroinformatics: Information technology and the aquatic environment. *Avebury Technical*, Aldershot, UK, 145.
- Abbott M.B., Lindberg S et Havno K., 1991. The fourth generation of numerical modeling in hydraulics. *Journal of hydraulic Research*, vol. 29, n°5, 581-600.
- Amarni A., 2011. La réassurance lui coûte 246 millions de dollars : L'Algérie se protège contre les séismes. *L'EXPRESSION dz.com*. Disponible sur : <http://www.lexpressiondz.com/actualite/136918-l-algerie-se-protege-contre-les-seismes.html>.
- Abdul A.S., Gillham R.W., 1989. Field studies of the effects of the capillary fringe on steamflow generation. *Jour of Hydrol*, n°112, 1-18.
- Aït Ouarab-Bouaoulis., 2006. « L'auto-organisation de la population en situation de crise : cas de la catastrophe de Bab El Oued ». *Risques*, n° 66, 172-180.
- Albergel B., 1987. *Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso*. Collection Etude et Thèse. Paris, ORSTOM, 361 p.
- Alpert, P., Neeman B. U., Shay-El Y., 1990. Climatological analyses of Mediterranean cyclones using ECMWF data. *Tellus*, 42A, 65-77,
- Ambroise B., 1986. Rôle hydrologique des surfaces saturées en eau dans le bassin de Ringelbach à Soultzeren (hautes Vosges), France ; in Rentz O., Streith J., Zilliox L (éd.), 2006. Recherches sur l'environnement dans la région. *1^{er} Coll.sc. des universités du Rhin supérieur*, Strasbourg, ULP/Conseil de l'Europe, 620-630.
- Ambroise B., 1998. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant, processus, facteur modèle*. Bucarest, HGA. 200 p
- Amina A., Nefla B., 2001. Le plan ORSEC n'a pas fonctionné. *Le Jeune Indépendant*. Disponible sur : http://www.algeria-watch.de/farticle/inondations/protection_civile.htm.
- Antoni J-P., 2006. Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort. *Cybergeo*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, 347. Disponible sur : <http://cybergeo.revues.org/2436>
- Argence S., 2008. *Prévisibilité de précipitations intenses en Méditerranée : impact des conditions initiales et application aux inondations d'Alger de novembre 2001*. Thèse de doctorat en physique de l'atmosphère, Université Paul Sabatier (Toulouse 3), 160 p.
- Arnaud-Fassetta G., 2009. Palaeohydrographic, palaeohydrological and palaeohydraulic investigations in Mediterranean geoarchaeology. Case studies of the Rhône River (France) and Isonzo River (Italy) deltas. In (De Dapper M., Vermeulen F., Deprez S., Taelman D. Eds.) *Ol' Man River. Geo-archeological Aspects of Rivers and River Plains*. Archaeological Reports Ghent University 5, Academia Press, Ghent, 21-42.
- Arnaud-Fassetta G., Astrade L., Bardou E., Corbonnois J., Delahaye D., Fort M., Gautier E., Jacob N., Peiry J.-L., Piégay H., Penven M.-J., 2009. Fluvial geomorphology and flood-risk management. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 109-128.
- Arnaud-Fassetta G., Carre M.-B., Marocco R., Maselli-Scotti F., Pugliese N., Zaccaria C., Bandelli A., Bresson V., Manzoni G., M.E. Montenegro, Morhange C., Pipan M., Prizzon A., Siché I., 2003. The site of Aquileia (northeastern Italy): example of fluvial geoarchaeology in a Mediterranean coastal plain. In (Arnaud-Fassetta G., Provansal M. Eds.) *Deltas 2003. Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 223-241.
- Arnaud-Fassetta G., Landuré C., 2003. Hydroclimatic hazards, vulnerability of societies and fluvial risk in the Rhône Delta (Mediterranean France) from the Greek period to the Early Middle Ages. In (Fouache E. Ed.) *The Mediterranean World Environment and History. Proceedings of the International Conference "Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas"* held in Paris, 24-26 April 2002. Elsevier, Paris, 51-76.

- Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2009. The integration of space of good functioning in fluvial geomorphology, as a tool for mitigating flood risk. Application to the left-bank tributaries of the Aude River, Mediterranean France. In Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. (Eds.) *IVth ECRR International Conference on River Restoration 2008*. Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale, 313-322.
- Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2011. Dix ans de recherches hydrogéomorphologiques dans le département de l'Aude et une question : comment parvenir à réduire le risque de crue en domaine méditerranéen ? *Actes du colloque international « Risques naturels en Méditerranée occidentale »*, 16-21 novembre 2009, arcassonne, France, sous presse.
- Ayrault N., Bolvin C., 2004. *Analyse des Risques et Prévention des Accidents Majeurs (DRA-34)*. Guide pour la prise en compte du risque inondation (Version 2004). Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. INERIS, 82 p.
- Azzout Y., Cres F.N., Barraud S., Alfaki E., 1994. *Technique Alternative en Assainissement Pluvial: choix, conception, réalisation et entretien*. Lavoisier. 372 p.
- Badariotti D., Banos A., Moreno D., 2006. Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus. *Cybergeo*, Dossiers, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2006, 403. Disponible sur : <http://cybergeo.revues.org/10993>
- Bailly A., et Béguin H., 1996. *Introduction à la géographie humaine*. Paris, Armand Colin, p 55.
- Banque Mondiale., 2002. Algérie : *Un Projet De La Banque Mondiale Atténuera L'impact Des Catastrophes Naturelles Sur La Population Pauvre Des Villes*. Communiqué de presse n°:2002/055/MENA.
- Barles S., 1993. *La pédosphère urbaine : le sol de Paris XVIII° - XX° siècles*. Thèse de doctorat, ENPC, Paris, 570 p.
- Barroca B. ; 2006. *Risque et vulnérabilités territoriales. Les inondations en milieu urbain*. Thèse de Doctorat en Génie Urbain - Discipline: Aménagement de l'espace, urbanisme (24°CNU). Université de Marne-La-Vallée, 317 p.
- Barroca B., Mouchel J.-M., Bonierbale T., Hubert G., 2008. Chapter 13: Flood Vulnerability Assessment Tool (FVAT). In (Thévenot D.R. Ed.): *DayWater: Adaptive Decision Support System for Integrated Urban Stormwater Control*. IWA Publishers, London, 119-127.
- Batty M., Torrens P.M., 2001. Modeling complexity : the limits to prediction ». *Cybergéo*. Disponible sur : www.cybergeo.presse.fr
- Beck E., 2006. *Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)*. Thèse de doctorat, Université Strasbourg I (Louis Pasteur), 283p.
- Beck U., 1986. *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*, [trad. fr. 2001], Aubier, Alto, 528 p.
- Behloul L., 2001 : *Note technique sur l'évènement pluvieux du 09 au 10 novembre 2001. Région d'Alger*. Services des études et de prévisions, 53 p.
- Beltrando G. 2004. *Les climats. Processus, variabilité et risques*. Armand Colin, Paris, 261 p.
- Ben Allal K., Ourabia K., 1992. Bibliographie géophysique de l'Algérie (liste arrêtée à décembre 1987), *O.P.U*, Alger.
- Bendjoudi H., Hubert P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, n° 47, 292-930. Disponible sur : http://iahs.info/hsj/470/hsj_47_06_0921.pdf.
- Benseddik M., Djabri H., 2003. *Les intempéries catastrophiques du 10/11/2001, causes et conséquences dans le bassin de l'Oued Lazhar (Bouzaréah-Bab el Oued)*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du grade d'ingénieur d'état, Faculté des sciences de la Terre, de la géographie et de l'aménagement de territoire, USTHB, Alger, 92 p.

- Berg M., Dobrindt K., 1998. On levels of detail in terrains. *Graphical Models and Image Processing*, n°60, 1-12.
- Bertrand-Krajewski J.L., 2007. *Cours d'Hydrologie Urbaine, partie 2: La pluie*. URGC – Hydrologie Urbaine. INSA, Lyon, 37 p.
- Bigot S., Cosandey C., Dacharry M (Dir.), Gille E., Laganier R., Salvador P-G., 2004. *Les eaux courantes*. BELIN, Paris, 239 p.
- Bocher E., Martin J.-Y., 2009. TANATO : An approach to evaluate the impact of natural and anthropogenic artefacts with a TIN-based Model. *OGRS*, Nantes, France, 56-59.
- Boiffin J., 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Doc. Ing. INA Paris-Grignon, 320 p.
- Borah D.K., Asce M., Jeffrey G.A., Bera M., Edward C. K., Liang X-Z., 2007 : Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *SWAT*, 40 p. Disponible sur : <http://swatmodel.tamu.edu/>.
- Bost F., 2002. La localisation des activités économique. In Chavet J-P., Sivignon M., Géographie humaine. Question et enjeux du monde contemporain, Paris, Armand Colin, Coll. « U », 221-254.
- Boudaqa F., 2007. Urbanisation et risques naturels à Alger et son aire métropolitaine. *La revue géographique égyptienne*, n 80, Caire, 13 p.
- Bourgeois N., Royer M., Calandre C., Lorente A., Monnier N., 2011. Bassin de rétention enterré des eaux pluviales. Grenoble, INP, ENSE. 76 p.
- Bousbara K., 2008 : Crue par ruissellement en milieu urbain : cas des inondations de Bab El Oued du 10 novembre 2001. In A. Giret (Ed.) *Le risque hydrologique – Du concept à sa gestion*, Editions Le Manuscrit, Paris, 215-231.
- Breaden J. P., 1973. The generation of flood damage time sequences. *Water Resources Institute Paper 32*, University of Kentucky, 21p.
- Buzzi A., Foschini L., 2000: Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern Alpine region. *Meteorol. Atmos. Phys.*, n°72, 131-146.
- Cannon T., 2000. Vulnerability analysis and Disaster. IN : Parker, D. Eds., *Floods*, Routledge, London, 24p.
- Cary E., 1917. *Din's Roman History, VI*. Londres-New Yourk, Heinemann – Putnam's.
- Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (CEPRI), 2009. Un logement « Zéro dommage » face au risque d'inondation est-il possible ? *Néologis*. Disponible sur : www.néologie.fr.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., Souchère V., 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil & Tillage Research*, n° 67, 99-108.
- Chaboureau J-P., Claud C., Cammas J.P., Mascart P., 2001. Large-scale cloud, precipitation and upper-level features during FASTEX as inferred from TOVS observations, *J. Geophys. Res.*, 106 (D15), 17293-17302.
- Chocat B., 1989. *La crue de l'Yzeron du 29 avril 1989 ; premiers éléments d'analyse*. Rapport interne INSA-LYON.
- Chocat, B., 1997. *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement*. EURYDICE 92, 1124 p.
- Chorley R.J., Malm D.E., Pogorzelski H.A., 1957. A new standard for estimating drainage basin shape. *American Journal of Sciences*, n°255, 138-141.
- Coanus T., Pérouse J-F., 2006. *Villes et risques: Regards croisés sur quelques cités « en danger »*. Paris, Economica, Anthropos, 125-140.
- Conesa G., 1970. *Bab El Oued notre paradis perdu*. Robert Laffont, 39 p
- Conte M., 1986. The meteorological bomb in the Mediterranean: a synoptic climatology. Geneva, Switzerland, *WMO/TD*, n°128, App. 4, 17-31.

- Cornier N., 2007. *Rétention des eaux de ruissellement dans les opérations d'aménagement : Dimensionnement, Mise en œuvre, Fonctionnement*. Mémoire d'Ingénierie de l'ESGT, 61 p.
- Cosandey C., 2003. *Les eaux courantes, Géographie et environnement*. Paris. Belin, "Sup géographie", 239 p.
- Côte M., 1996. *L'Algérie*. Editions Masson, Paris, 254 p.
- Couclelis H., 1985. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and Planning A*, n° 17, 585-596.
- Cras A., 2005. Etude de la dynamique de fonctionnement hydrologique des bassins versants torrentiels marneux. Apport du traçage naturel. *Application aux Bassins Versants de Recherche d'Expérimentation (BVRE) de Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France*. Présentation orale. 43 p.
- Cros-Cayot S., 1996. *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn*. Thèse de L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 218 p.
- Dauphiné A., 2001. *Risques et catastrophes, Observer Spatialiser Comprendre Gérer*. Armand Colin, Paris, 288p.
- De Lamothe (Général)., 1911. Les anciennes lignes de rivage du Sahel d'Alger et d'une partie de la côte algérienne. *Mémoires de la Société Géol. de France*, 4^{ème} série, I, Mémo, n°6.
- Degardin F., 1996. Mécanismes et évaluation des risques d'inondation, in *Formation « Gérer et valoriser les zones inondables »*, Ecole nationale des ponts et chaussées.
- Degoutte G., 2006. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*. LAVOISIER Tec et Doc, 384 p.
- Delahaye D., 2002. *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 2 tomes, Université de Rouen, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques (MTG), 250 p.
- Delahaye D., Guermont Y., Langlois P., 2001. Spatial interaction in the runoff process. *Cybergeog. Dossiers, 12ème Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative*, St-Valéry-en-Caux, France, 213.
- Delrieu G (Dir)., 2005. *Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen ; Cévennes-Vivarais. Rapport établie dans le cadre de l'évaluation/labellisation des dispositifs d'observation de l'environnement par le Comité Inter-Organisme*, p. 26. Disponible sur : http://www.cnrn.meteo.fr/cyprim/global/documents_chantier_mediterranee/extr_dossier_ORE.pdf.
- Dervaux I., 1983. Risque et sécurité. *Culture et Technique*, n°11, 8-9.
- Desbordes M., 1989. *Principales causes d'aggravation des dommages dus aux inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé*. Technical report, SHF Bulletin d'hydrologie urbaine.
- Desbordes M., 1984. *Modélisation en hydrologie urbaine. Recherches et Applications*. Université Montpellier II-Laboratoire de l'Hydrologie amthématique-STU, 183p.
- Desbordes M., 1995. *Etude de faisabilité d'un modèle simplifié de simulation d'inondation pluviale urbaine*. Euroflood 2. The management of consequence of climatic change UMII, 20 p.
- Deutsch J-C., 2000. *Les techniques alternatives*. 8 p.
- Devau-Ros C., 1999. Évaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations de la Loire moyenne — In : Hubert G et Ledoux B, Dir. : *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socioéconomiques des inondations*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 139-142.
- Dion R., 1968. *Le Danube d'Hérodote*. RPh42, 7 p.
- DIREN Languedoc-Roussillon., 2008. le plan de prévention des risques inondation *un outil au centre d'une stratégie globale de prévention des inondations*.

- Djellouli Y., Saci A., 2003. Catastrophe « Naturelle » : Les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Beb El Oued (Alger, Algérie). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. n° 23, 236-242.
- Doswell C-A., III, 1982. The Operational Meteorology of Convective Weather. Volume I: Operational Mesoanalysis, *NOAA Technical*.
- Douvinet J., 2010. Le traitement des inondations en catastrophe naturelle : un système à adapter. *Risques - Les cahiers de l'assurance*, n°83, 104-112.
- Douvinet J., Delahaye D., 2010. Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, 73-90.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., 2008. Modélisation de la dynamique hydrologique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergéo*, 412.
- Dubos-Paillard E., Guermont Y., Langlois P., 2003. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle. *L'Espace Géographique*, Tome 32, vol 4, 357-378.
- Duclos G., 1977. Les analyses des sols et leur interprétation en vue du Conseil fertilisation. *Eau et Aménagements*, n° 15.
- Ducrocq V., Nuissier O., Ricard D., Lebeauapin C., Thouvenin T., 2007. A numerical study of three catastrophic events over Southern France. Part II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 134, 131-145.
- Dunne T., Moore T.R., Taylor C.H., 1975. Recognition and prediction of runoff producing zones in humid regions. *Journ des Sci hydrol*, XX(3). 305-327.
- Dupraz C., 1984. *Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétations contrastées (Mont Lozère, France)*. Thèse doct. ing., Pniv. d'Orléans, 363 P. + annexes.
- Dureau F., 1990. Observation de la terre par télédétection spatiale : principes généraux. *Villes et citadins du tiers-monde*, n°4, Bondy, Orstom, 13-21.
- El kadi Abderrezzak K., Paquier A., Rivière N., Leblois E., Guinot V., 2007. Vers une meilleure connaissance et gestion du risque d'inondation dans les zones urbaines : le projet RIVES. *NOVATECH*. 8 p.
- El Kadi I., 2001. Un mois après la dramatique journée du 10 novembre : Un rescapé raconte ses trois heures sur le toit d'un bus. *Quotidien d'Oran*. 2 p.
- Fernandes N. F., 1990. Hidrologia subsuperficial e propriedades fisico-mecanicas dos "complexo de rampa" Bananal (SP), tese de maestrado, Universidade federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geosciências, Rio de Janeiro, Brazil.
- Ferretti R., Low-Nam S., Rotunno R., 2000. Numerical simulations of the Piedmont flood of 4-6 November 1994. *Tellus*, 52A. 162-180.
- Ficheur E., 1896. Réunion extraordinaire en Algérie (*Bull. Soc. Géol. de France*. III^{ème} sér., XXIV. P. 917-1185)
- Fournier d'Albe E- M., 1979. Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society*, London, n° 136, 321-326.
- Gaber J, Orignac P, Masse E, Beaumont G, Deronzier P., 2007. *Évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations*, Collection « Études et synthèses ». Paris. 4 p.
- Gaillard D., Delahaye D, Langlois P., 2006. *Modélisation du Ruissellement-érosif par automate cellulaire. Intérêt d'une approche déterministe du risque*. Actes du Colloque International « Interactions Nature-Société, analyse et modèles », La Baule, 5p.
- Gaillard J.-C., Liamzon C.C., Villanueva J.D., 2007. Natural disaster ? A retrospect into the causes of the late 2004-typhoon disaster in Eastern Luzon, Philippines. *Environnemental hazards* 7-3, 257-270.

- Galland J-P., 1998. Les responsabilités des experts et le principe de précaution. *Nature, Science et Société*, Vol. 6, n°1. 21p.
- Gardner, M., 1971. On cellular automata, self-reproduction, the Garden of Eden and the game of 'life'. *Scientific American*, n° 224, 112-117.
- Garry G., 1997. *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide Général*. La Documentation Française. 76 p.
- Garry G., Grask E., 1999. *Plan de prévention des risques naturels (PPR): risque d'inondation, guide méthodologique*. La documentation française, Paris.
- GECOTEC (Groupement Economique de Contrôle Technique de la Construction) (2002) – Intempéries du novembre 2001. Retour sur une catastrophe. *Le Contrôle Technique de la Construction*, n°25, 16 p.
- GEM Risques., 2002. Terminologie en science du risque. *Document de travail du colloque international Dire le risque : le risque mis en examen*, Mètze, Documents recueillis et présentés par Griot C et Ayrat P-A Chloé, (EMA), p83.
- Gendreau N., 1999. *La méthode Inondabilité*. Disponible sur : <http://www.cemagref.fr>
- Ghidaglia J-M et Rittaud B, 2004. La simulation numérique, *La recherche*, n°380, pp 73-76
- Gilard O., 1998. *Les bases techniques de la méthode inondabilité*. Cemagref Edition, Antony, pp. 83-84
- Glangeaud L., 1932. Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Thèse Doct. Es Sc., Bull.Serv. Carte Géol. Algérie, 2, 8, 608 p., 110 fig., 28 pl. photo, 5 pl. h. t.
- Glatron S., 2003. Question de géographie : les risques. *Ouvrages collectif coordonné par Vincent MORINIAUX*, édition du temps, 71-87.
- Gomez M., Gonzalez J., Malgrat P., Guerra W., 1998. Experimental analysis of gutter intel in high discharge conditions. *NOVATECH* (3^{ème} Conférence), Vol. 1. Lyon, France. 91-98.
- Governance., 1995. *Our Global Neighbourhood*. The Report of the Commission on Global Governance. Oxford: Oxford University Press.
- Graillot D., Londiche H., Dechomets R., Batton-Hubert M., 2001. Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations, Actes du Colloque *SIRNAT*, Sophia-Antipolis.
- Gray D.M., Wigham J.M., 1972. Etude générale de ruissellement et de la précipitation. In : Manuel des principes hydrologie (Ed par Gray D.M). Chap. VII. *Publication du Comité National Canadien de la Décennie d'Hydrologie Internationale, Conseil national des recherches du Canada*, Ottawa, Canada.
- Grelot F., 2004. *Gestion Collective des Inondations : peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ?*. Thèse d'économie, L'École Nationale Supérieur D'Arts et Métiers, 413 p.
- Grimaldi S.; Teles V., Bras R-L., 2004. Sensitivity of a physically based method for terrain interpolation to initial conditions and its conditioning on stream location. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 29, 587-597.
- Gros E., 1866. *L'Histoire romaine de Dion Cassius*. Paris, Firmin Didot.
- Hakimi Z., 2002. Du plan communal au plan régional de la ville d'Alger (1931-1948). *Labyrinthe*, Actualité de la recherche, n°13, 131-136. Disponible sur : <http://labyrinthe.revues.org/index1493.html>.
- Hamadache B., Terchi A., Brachemi O., 2002. Study of the meteorological situation which affected the west and the center of Algeria in general and Bab-el-Oued in particular on the 10th November 2001. *Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca*, Universitat de les Illes Balears, Spain, 8 p.
- Hamida B., 2012. Assurance Cat-Nat contre les catastrophes naturelles : Un produit encore peu prisé des Algériens. *El Moudjahid*. Disponible sur : <http://www.elmoudjahid.com/fr/actualites/28154>.

- Hatlan H., 2011. *LE VIVANT POST-GENOMIQUE OU QU'EST-CE QUE L'AUTO-ORGANISATION*. Odile Jacob. 336 p.
- Hauchard E., 2001. *De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie. Application aux bassins versant de la marge Nord-occidentale du Bassin de Paris*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 3 Volume, 730 p.
- Harvey D.P., 2002. *A Generic Modelling Framework Component for Hydroinformatics Systems*. PhD thesis, University of Bridtol, Bristol, U.K. xix, 193 p.
- Hémain J.-C., 1986. *Modélisation de l'écoulement dans les réseaux*. Guide de construction et d'utilisation des pluies de projet. STU, Paris, 63 p.
- Wind H.G., Nierop T.M., Blois C.J., Kok J-L., 1999. Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods. *Water Resour. Res.*, n°35, 3459-3465.
- Hewith K., 1997. *Regions of Risk: a Geographical Introduction to Disasters*. Singapore : Addison Wesley Longman Limited, 12-13.
- Hewlett J.D., Nutter W.L., 1970. The varying source area of streamflow from upland basins. Interdisciplinary aspects of water management. *Am. Soc. For Civil Ing.* New York, 65-83.
- Hingray B., 1999. *COMPORTEMENT ET MODELISATION HYDRAULIQUE DES ZONES BATIES EN SITUATION D'INONDATION: le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou*. Thèse de Doctorat en Mécanique, génie mécanique, génie civil. Université des "Sciences et Techniques du Languedoc. 390p.
- Homar V., Romero R., Stensrud D. J, Ramis C., Alonso S., 2003. Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean : Dynamical vs. boundary factors, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, n°129, 1469–1490
- Horton R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. AGU*, n°14, 446-460.
- Howard A.D., 1967. Drainage analysis in geology interpretation: a summation, *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, Tulsa, n°51, 2246-2259.
- Hubert G et Ledoux B., 1999. Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations. *Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 20-83.
- ISL-BRGM., 2006. *Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles*. Rapport de tâche R3114, volume 2, 6-42.
- Joos F., 2006. *Contribution à la gestion intégrée de l'eau pluviale en milieu urbain. Un système d'information pour l'aide à la planification urbaine et pour l'aide à l'élaboration et au suivi de projet d'aménagement*. Thèse de doctorat (spécialité : génie civil et urbain), université d'Artois, 288 p.
- Jordan J.P., 1992. *Identification et modélisation des processus de génération des crues. Application au bassin versant de la Haute-Mentue*. Thèse N 1014, Ecole Polytechnique de Lausanne, Suisse, 370 p.
- Lajoie G., Hagen-Zanker A., 2007a., La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. *Cybergeog*, 405. Disponible sur : <http://cybergeog.revues.org/11882> ; DOI : 10.4000/cybergeog.11882.
- Lajoie G., 2007b., *Recherches en modélisation urbaine*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 131-208. Disponible sur : <http://personnel.univ-reunion.fr/glajoie/rech.html>.
- Lambert J., 1996. *Géographie du cycle de l'eau*. Géographie, 7. Presses Universitaire du Mirail. 439 p
- Lambert R., Prunet C., 2000. L'approche géographique de l'inondation. L'exemple de la Garonne à l'aval de Toulouse. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, p. 39-53.

- Langlois P. 2007. FONDLEMENTS THEORIQUES POUR LA SIMULATION DE SYSTEMES COMPLEXES EN GEOGRAPHIE. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen. 241 p. URL : http://www.umr-idees.fr/IMG/pdf/HDR_LANGLOIS.pdf.
- Langlois P., 1994. Formation des concepts topologiques en géomatique. *Revue Internationales de Géomatique*, 4 (2), 181-205.
- Langlois P., 2002. *Quelques éléments de présentation du modèle RuiCells*. Fiche explicative. p. 11. Disponible sur : <http://www.univ-rouen.fr/MTG/langloisPDF/mod%E81e%20RuiCells.pdf>.
- Langlois P., Delahaye D., 2002. Ruicells, un automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 12-4, 461-487.
- Lasat M-C et Rodriguez R., 1997. Towards a regionalization of extreme rainfall events in the Mediterranean area. In TRIEND'97; Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management.. IAHS Press. Wallingford, Oxfordshire, n°246, 215-222.
- Lascoumes P., 1996. La précaution comme anticipation des risques résiduels et hybridation de la responsabilité. *L'année sociologique* 46, 359-382.
- Lebeaupin C., Ducrocq V., Giordani H., 2006. Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on highresolution numerical forecasts. *J. Geophys. Res.* n°111. 19 p.
- Lebeaupin C., 2007. *Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne*. Ph.D. thesis, Université Toulouse III, 180 p.
- Ledoux B., 2006. *La gestion du risque inondation*. TEC & DOC. Paris. 770 p.
- Lemaire J-P., 1997. *Stratégies d'internationalisation. Développement international de l'entreprise*. Paris, Donod, 370 p.
- Léone F., 2003. *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par des mouvements de terrain*. Collection Thèse à la carte, Presses Universitaires du Septentrion, villeneuve d'ascq, 245 p.
- Llasat M-C et Rodriguez R., 1997. Towards a regionalization of extreme rainfall events in the Mediterranean area. In TRIEND'97; Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management.. IAHS Press. Wallingford, Oxfordshire, n°246, 215-222.
- Loye-Pilot M. D., Jusserand C., 1990. Décomposition chimique et isotopique d'un hydrogramme de crue d'un torrent méditerranéen. *Réflexions méthodologiques. Rev. Sci. Eau* 3, 211-231.
- Lvovich M.I., 1973. *The World's Water*. MIR, Moscou. 213 p
- Hadji L., 2007. Le Grand Projet Urbain : Un instrument de dynamique territoriale de la métropole algéroise. *XLIII Colloque de l'ASRDLF : Les dynamiques territoriales : débats et enjeux des différentes approches disciplinaires. Grenoble et Chambéry*, 9 p.
- Machane D., Bouhadad Y., Cheikhounis G., Chatelain J.-L., Oubaiche H., Abbes K., Guillier B., Bensalem R., 2008 : Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria Nat Hazards. Publication de Springer. Volume 45, n°2 ,14 p.
- Machane D., Chatelain J-L., Cheikhounis G., Guemache M.A., Guillier B., Dahmani K., Bichi N., Bensalem R., Oubaiche E., Kasmi H., 2007. Apport du bruit de fond dans l'estimation de l'extension de la coulée de boue suite aux inondations de Bab el Oued (Alger) de novembre 2001. *7ème Colloque National Association Française de Génie Parasismique. Ecole Centrale de Paris*, 8 p.
- Mahdjoub Y., 1981. *La déformation plastique d'échelle microscopique dans les unités tectoniques du massif d'Alger. Un écaillage contemporain de la mylonitisation épizonale*. Thèse Doc. 3ème Cycle, USTHB, Alger (Algérie), 196 p

- Maheras P., Flocas H-A., Patrikas I., Anagnostopoulou C., 2001. A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution. *International Journal of Climatology*, n°21, 109- 130.
- Manéglier H., 1991. *Histoire de l'eau. Du mythe à la pollution*, Paris, Éditions François Bourin, 233 p.
- Mantilla R., Gupta V.K., Mesa O.J., 2006. Role of coupled dynamics and real network structures on Hortonian scaling of peak flows. *Journal of Hydrology*, 322, 1-13.
- Menad W., Douvinet J., Beltrando G., Arnaud-Fassetta G., 2012. Evaluer l'influence de l'urbanisation face à un aléa météorologique remarquable : les inondations des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie). Vol. 03. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, sous presse, 81-94
- Menad W., Douvinet J., Arnaud-Fassetta G., 2011. Le risque d'inondation dans l'oued Koriche (Massif de Bouzaréah, Alger ouest) : analyse systémique de l'aléa et facteurs de vulnérabilité. *Actes du colloque international Risques naturels en Méditerranée occidentale*, Carcassonne, ville d'édition, 11 p.
- Ménard A., Filotas É., Marceau D. J., 2004. Automates cellulaires et complexité : Perspectives géographiques. l'Institut d'Analyse Géographique. Disponible sur : <http://www.iag.asso.fr/articles.htm>
- Mérot P., Bourguet M., Leleuche M., 1981. Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18. Mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. *Catena*, vol. 8, n°1, 69-81.
- Mesbah A., 2010. 40 MILLIONS DE DINARD POUR UN DISPOSITIF DE PROTECTION. Beb-El-Oued ne connaîtra plus d'inondation. *L'EXPRESSION dz.com*. Disponible sur : <http://www.lexpressiondz.com/actualite/73516-bab-el-oued-ne-conna%C3%A9tra-plus-d%E2%80%99inondations.html>.
- Mignot E., 2005. *Etudes expérimentale et numérique de l'inondation d'une zone urbanisée : cas des écoulements dans les carrefours en croix*. Ecole Centrale de Lyon : MEGA. 21 p.
- Milbert I., 2007. Mondialisation, gouvernance et développement. In : Cadène, P. Ed., *La mondialisation - L'intégration des pays en développement*, SEDES, Paris, 43-54.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie., 2012. Eau et Biodiversité : la récupération de l'eau de pluie. Disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-recuperation-de-l-eau-de-pluie.html>.
- Mitchell J., 1995. *Crucibles of hazard : Mega-cities and Disasters in Transition*. United Nation University Press, New York, 576 p.
- Mitci C., 1978. La méthode des hydrogrammes appliquée au drainage urbain. *TSM*, 7, 397-404.
- Mohamed K., 2001. Des rescapés témoignent «C'est horrible ce que nous avons vu». *Le Quotidien d'Oran*, 13. 1 p. Disponible sur : <http://www.algeria-watch.de/farticle/inondations/temoignages.htm>
- Morel G et Heuzé Y., 2005. OSIRIS-inondation : un outil issu de la recherche européenne pour planifier la gestion de crise au niveau local. *Systèmes d'Information Géographique et Gestion de Risque ISTEED*. 4p. Disponible sur : <http://www.epama.fr/documents/notes2005461726.pdf>.
- Moussu H.M., 1962. *Description des schistes cristallins du massif de Bouzareah (Alger)*. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, Nelle série, 30, 229 p.
- Musy A., Higy C., 2004. *Hydrologie, une science de la nature*. Coll. Gérer l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p.
- Musy A., Soutter M., 1991. *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 335 p.
- Muxart T. et al., 1990. *L'érosion sur les hautes terres du Lingas ; un processus naturel, une production sociale*. Paris, Éditions du CNRS, Coll. « Mémoires et documents de géographie ». 146 p.
- Novembre V., 1994. Risque naturel et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain. *Revus de géographie Alpine* 4, 113-123.

- Office National de la Météorologie., 2002. Un résumé de la situation météorologique exceptionnelle ayant affecté le centre et l'ouest du nord Algérie et en particulier la zone urbaine d'Alger les 9 et 10 novembre 2001. *Note technique N°001*, 6 p.
- Office National de la Météorologie., 2006. Résumé de la situation météorologique exceptionnelle sur le nord de l'Algérie du 3 au 5 mai 2006. Analyse préliminaire, 22 p.
- Oliveira M.A.T., 1992. *Morphologie des versants et ravinement : héritage et morphogénèse dans une région de socle tropical*. Thèse de doctorat, Paris, Sorbonne/CNRS, 401 p.
- Ollinger N., 2002. Automates cellulaires : structures. École Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme. 126 p. Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/74/62/PDF/tel-00007765.pdf>.
- Office National de la Météorologie (ONM)., 2002. *Un résumé de la situation météorologique exceptionnelle ayant affecté le centre et l'ouest du nord Algérie et en particulier la zone urbaine d'Alger les 9 et 10 novembre 2001*. Note technique, n°1, 6 p.
- Paquier A., 1998. 1-D and 2-D models for simulating dam-break waves and natural floods. In Morris M., Galland J.- C., Balabanis P. (Eds.): *Concerted Action on Dam-break Modelling*. 1st CADAM meeting, Wallingford, United Kingdom, Office for official publications of the European Communities ed. European Commission Luxembourg, 127-140.
- Paquier A., 2003. Ecoulements de surface lors des fortes inondations en ville « *Surface flows during high floods in towns* ». LA HOUILLE BLANCHE, n°6. 5 p.
- Pardé M., 1955. *Fleuves et rivières*. Colin, Paris. 224 p.
- Parent du Chatelet J., 2003. Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations. *La Météorologie, Spécial Observation*, Vol. II, 8^e série, n° 40, 44-52.
- Penning-Roswell E-C., 1999. Evaluating the socio-economic impacts of flooding. The situation in England and Wales. In Gilles Hubert et Bruno Ledoux, éditeurs : *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, pages 177–189. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 20, 90, 99.
- Pettersen S., 1956. *Weather Analysis and Forecasting*. Vol. 1, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 428 p.
- Peucker T.K., Fowler R.J., Little J.J., Mark D.M., 1978. The triangulated irregular network". *Proceedings of the ASP Digital Terrain Models (DTM) Symposium*. American Society of Photogrammetry. Falls Church, Virginia. 516-540.
- Phillips V- T J; Choularton T-W ; Illingworth A-J; Hogan R- J; Field P-R., 2006. Simulations of the glaciation of a frontal mixed-phase cloud with the Explicit Microphysics Model. In *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n°129, 1351–1371. disponible sur <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.v129:590/issuetoc>.
- Phipps M., Langlois A., 1997. Automates cellulaires. Application à la simulation urbaine. Editions Hermès, Collection sciences, Paris, 208 p.
- Phipps M., 1989. Dynamical behavior of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical Analysis* 21, 197-215.
- Phipps, M. J. 1992. From local to global: The lesson of cellular automata. 165-187 in D. L. De Angelis and L. J. Gross, editors. *Individual-based models and approaches in ecology*. Chapman & Hall, London.
- Pichler H., Steinacker R., Hagenauer E., Jäger A., 1995. ALPEX-Simulation. *Meteor. Atmos. Phys.*, 56, 197-208.
- Pigeon P., 1994. *Ville et environnement*. Nathan ed. Paris, 192 p.
- PNUD., 1996. *Human development Report 1996- Economic growth and human development*. Rapport du PNUD.

- Pottier N., 1998. *L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation: évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la marne)*. Thèse de doctorat, Ecole des ponts de chaussées, CERREVE, 436 p.
- Prime.net., 2009. Risques Majeurs : Préservez votre habitation des inondations. Disponible sur : <http://www.risquesmajeurs.fr/preserver-son-habitation-de-linondation>.
- Radinovic D., 1987. Mediterranean cyclones and their influence on the weather and climate, *WMO, PSMP Rep. Ser.* Geneva, Switzerland, n°24, 131 p.
- Ramade F., 1998. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Paris. Discisciences international.
- Redjimi M., 2000. *De l'empire à l'Etat démiurge. La recomposition du territoire algérien (1830-1990)*. Thèse de doctorat en géographie, Université Paul-Valéry (Montpellier 3), 598 p.
- Rivard, G., 2005. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Concepts et applications*. 2^{ème} édition, Alias communication design Incorporated. 329 p.
- Rivière, N., Chocat, B., Mignot, E., Paquier, A., Perkins, R. et Travin, G., 2005. Croisement de canaux à surface libre. *Colloque ANR ECCO*, Centre Météo-France, Toulouse.
- Roche M-F., 1986. *Dictionnaire Français d'hydrologie de surface*. Paris, Masson, 288 p.
- Romero R., Ramis C., Alonso S., Doswell III C. A., Stensrud D. J., 1998. Mesoscale model simulation of three heavy precipitation events in the western Mediterranean region, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1859-1881.
- Rousselle J., Watt W.E., Latham K.W., Neill C.R., Richards T.L., 1990. *Hydrologie des crues au Canada: Guide de planification et de conception*. Ottawa, Ont. : Conseil national de recherches du Canada, Comité associé d'hydrologie, 277 p.
- Royer L., 1933. Etude pétrographique des roches métamorphiques du massif d'Alger. *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, travaux récents des collaborateurs*, II, 33-35.
- Rucker R., Walker J., 1997. Introduction to *CellLab*. Disponible sur : <http://www.fourmilab.ch/cellab/>.
- Rufat S., 2009. Estimation relative de la vulnérabilité urbaine à Bucarest. *Mappemonde*, n°95. Disponible sur : <http://mappemonde.mgm.fr/num23/articles/art09301.html>.
- Ruin I., Gaillard J.-C., Lutoff C., 2007. How to get there? Assessing motorist' flash flood risk perception on daily itineraries. *Environmental hazards* 7, 235-244.
- Saadallah A., 1981. *Le massif cristallophyllien d'El-Djazair (Alger) : évolution d'un charriage à vergence nord dans les internides des Maghrébides*. Thèse Doc. 3^{ème} Cycle, USTHB, Alger (Algérie), 160 p.
- SAGERI., 1987. Méthode générale de chiffrage de la vulnérabilité. *Plans d'exposition aux risques d'inondations*, 74 p.
- Salomon J-N., 1997. *L'homme face aux crues et aux inondations*. Presses universitaires de Bordeaux, 136p.
- Scarwell H-J., Laganier R., 2004. *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Science sociales, p 288.
- Schulé C.A., 1989. Livret guide pour excursions des journées d'hydrologie de la commission d'Hydrologie de CNG. Anger.
- Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL), 2008. *Actualisation du schéma directeur d'assainissement de la Wilaya d'Alger. Phase A1 – Etat des lieux – Recueil de données*. Rapport de synthèse, 137 p.
- Shreve R.L., 1966. Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology*, n°74, 17-37.
- Smail M., 2005. Prévention des risques majeurs urbains. *Colloque Réseau urbain Europe MENA : les rendez vous des villes*, Alger, 20 p. Disponible sur : http://www.euromedina.org/bibliotheque_fichiers/interventions_alger.htm.

- Souchère V., Cerdan O., Dubreuil N., Le Bissonnais Y., King C., 2005. Modelling the impact of agrienvironmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, 61, 229-240.
- Speranza A., Buzzi A., Trevisan A., Malguzzi P., 1985. A Theory of Deep Cyclogenesis in the Lee of the Alps. Part I: Modifications of Baroclinic Instability by Localized Topography, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1521-1535.
- Strahler A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38, 913-920.
- Tarboton D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33-2, 309-319.
- Texier P., 2009. *Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta, Indonésie. Réponses sociales, institutionnelles et non institutionnelles*, Thèse de géographie, université Paris-Diderot (Paris 7), 416 p. + annexes.
- Theys J., et Fabiani J-L., 1987. La société vulnérable: évoluer et maîtriser les risques. Paris, *Presses de L'Ecole Normale Supérieure*, 3-35.
- Thouret J.-C., D'Ercole R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieux urbains: effets, facteurs et réponses sociales. *Cahier des sciences humaines*, 32-2, 407-422.
- Tobler W. R., 1979. Cellular geography. in S. Gale and G. Olsson, editors. *Philosophy in Geography*. Dordrecht, London. 379-386.
- Torterotot J. P., 1993. *Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes*, Thèse de doctorat, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 284 p.
- Trigo, I. F., et Davies T. D., Bigg G.R., 1999. Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region, *J. Clim.*, 12, 1685-1696.
- Trigo, I. F., G. R. Bigg, et Davies T. D., 2002. Climatology of Cyclogenesis Mechanisms in the Mediterranean. *Mon. Weather Rev.*, 130, 549-569.
- Tripoli G. J., Medaglia C., Dietrich S., Mugnai A., Panegrossi G., Pinori S., et A. Smith E., 2005. The 9–10 November 2001 Algerian Flood : A Numerical Study, *Bull. Am.Meteorol. Soc.*, 86, 1229-1235.
- USWRC., 1983. Principles and Guidelines for Water and Related Land Resources Implementation Studies. Rapport technique, U.S. Water Resources Council, xxi, 20-286.
- Veltcheff C., 1996. Le risque : un écueil étymologique, une aventure sémantique. *Revue française des affaires sociales*, n° 3, 395-405.
- Venis B., 1953. Pluies et déluges sur Alger. *Bulletin municipal*, n°12. 1 p. Disponible sur : http://alger-roi.fr/Alger//faits_divers/pages/18_pluies_deluge_bulletin_1953_venis.htm.
- Veyret Y., 2004. Les risques (comprendre, recherche, s'entraîner), Quercy, Bréal, 17-47.
- White R., Engelen G., Uljee I., 1997. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323-343.
- Wilk *et al.*, 1977. Schéma d'un orage unicellulaire disponible. Disponible sur : <http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/1267074>.
- Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis I., 2004. *At Risk, Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge 2ème édition, Londres, 496 p.
- Wolfram S., 2002. *A new kind of science*. Wolfram Media, Inc., Compaign, IL, 1197 p.
- Wolfram S., 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature*; Vol. 311, N° 5985. 419-424. Disponible sur : <http://www.stephenwolfram.com/pdf/Cellular-Automata-Models-Complexity-Stephen-Wolfram-Article.pdf>.

- Zech Y., 1995. Préviation et maîtrise des crues. *Un défi remarquable pour l'ingénieur*, Louvain Ingénieurs, 1995-4, Association des Ingénieurs de l'UCL, Louvain-la-Neuve, 4-6.
- Yacou A., et al., 1999. *Les catastrophes naturelles aux Antilles, d'une soufrière à une autre*. Karthala-CERC, 324 p
- Yen B.C., 1986. Rainfall-runoff process on urban catchments and its modeling. Urban Drainage Modeling, Dubrovnik, Pergamon Press editor, London, UK, 3-26.
- Zakour A., Beghoul Y., Bensalem M., Djekboub S., 2003. *L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie : inquiétudes actuelles et futures*. Commission de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; Conseil National Economique et Social. 98 p.

Sites internet

- http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc/meshtml/guide_ARP/arpege.html
- <http://www.meteoalarm.eu/?areaname=&area=&ShowDate=&Country=&lang=FR>.
- <http://www.nvidia.com/page/home.html>
- http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/Global_Environmental_Multiscale_Model
- http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/Global_Forecast_System
- <http://www.worldbank.org/en/country/algeria>
- <http://ffs1963.unblog.fr/2011/11/10/il-y-a-10-ans-les-inondations-de-bab-el-oued/>
- <http://topographi.blogspot.fr/2011/11/inondation-de-bab-el-oued-2001.html>.
- http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf_docs/geog_analysis/CellularGeog.pdf.
- <http://oceanservice.noaa.gov/education/yos/resource/JetStream/tstorms/tstrmtypes.htm>.

Annexes

Annexe. 3.1. Législation algérienne concernant les risques hydrométéorologiques

3.1.1. *Décret n° 85-231 édité le 25 août 1985* : l'intégralité du texte est disponible sur : <http://www.cna.dz/dmdocuments/textesjur/texte-legislatifs%20et%20regleemtaires-RI/decretn%C2%B085-231%20du%2025-08-1985%20intervention%20et%20secours%20en%20cas%20de%20catnat.pdf>.

3.1.2. *Loi n° 01-20, éditée en décembre 2001* : l'intégralité du texte est disponible sur : <http://www.aniref.dz/textes/F2001077.PDF>.

3.1.3. *Loi n° 03-10 édité le 19 juillet 2003* : disponible sur http://www.mem-algeria.org/fr/legis/environ_03-10.htm.

3.1.4. *Loi n° 04-20 du 25 décembre 2004* : l'intégralité du texte est disponible sur : <http://www.sante.dz/jms2010/oms/loi04-20.pdf>.

Annexe 3.2 : Confrontation des résultats obtenus avec le traitement numérique des images satellitaires prises à différentes périodes de l'année 1987

1. Image LANDSAT 5 du 21 juin 1987

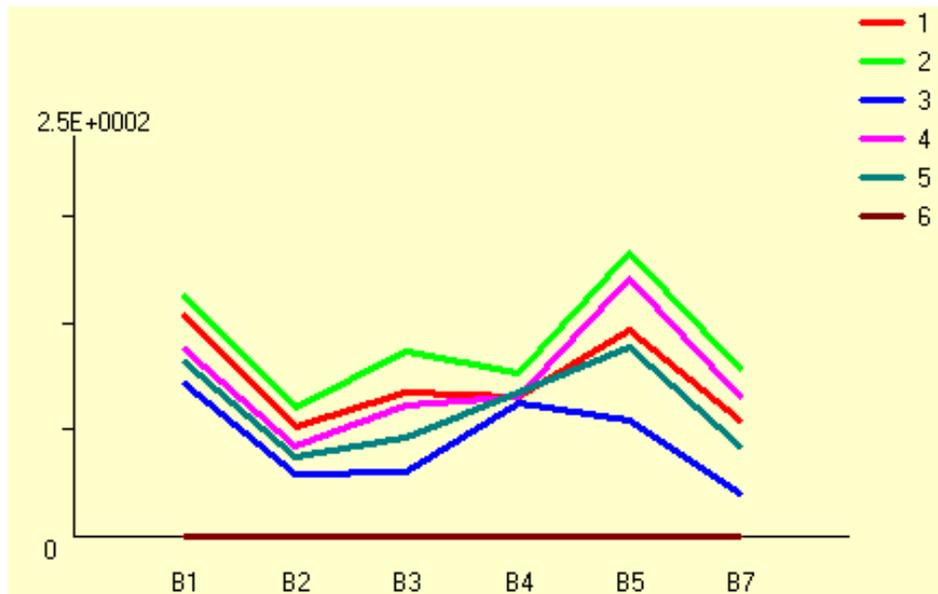
Il s'agit d'une image prise avec un satellite LANDSAT 5 de deuxième génération, de 30 m de résolution. L'image est composée de sept bandes spectrales. La composition colorée présentée ci-dessous résulte de la combinaison de trois bandes spectrales (2, 3 et 4).



Composition colorée d'une image LANDSAT5 prise le 21 juin 1987. La composition colorée permet de proposer une première interprétation visuelle en vue d'identifier les principaux éléments qui structurent le territoire.

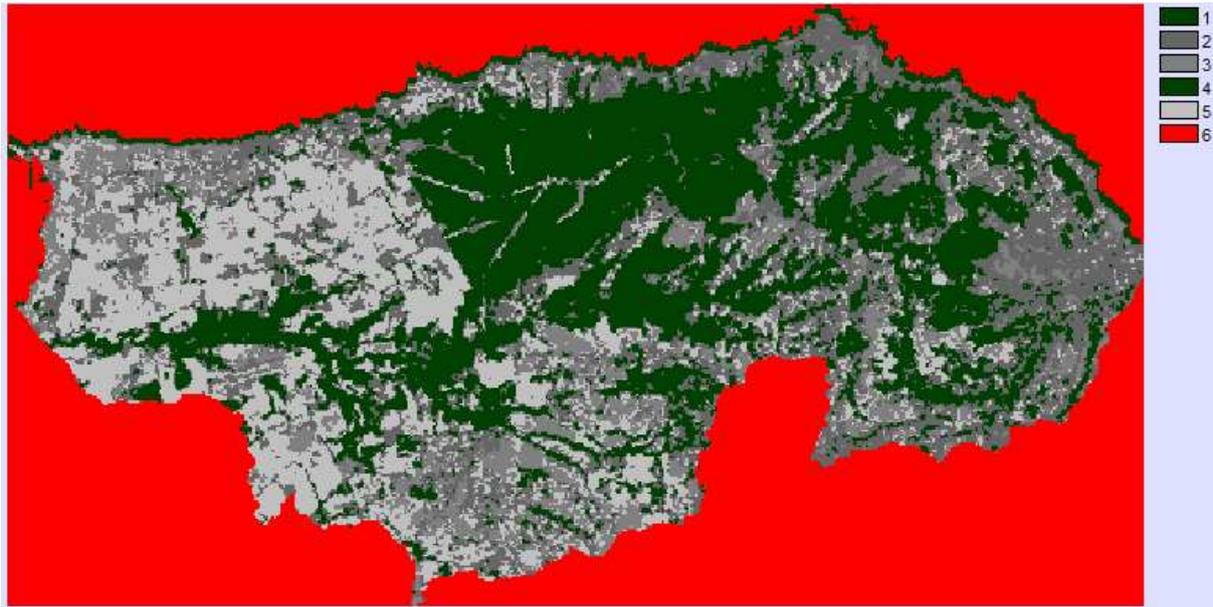
Les zones urbaines ressortent avec une couleur proche du bleu turquoise. La végétation haute apparaît en grenat voire marron. La végétation basse prend une couleur variant du rouge au rose selon la densité et le type d'espèces végétales. Les parcelles agricoles de la partie ouest du Massif de Bouzaréah, durant cette période de l'année (début de l'été), ne sont pas couvertes de végétation, expliquant la couleur verdâtre observée. Les sols nus ont une réponse très proche de l'urbain, en prenant une couleur qui varie du bleu turquoise très clair au blanc (affleurement du substrat géologique).

Grâce au classement automatique que l'on a exécuté à partir du traitement statistique de l'image avec la méthode des K-means, cinq principales classes ont pu être distinguées.



Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 21 juin 1987).

La réponse la plus élevée dans le visible est celle de la classe 2, qui enregistre deux pics, l'un observé en B1 et l'autre dans le moyen infrarouge (B5). Cette classe correspond donc à la réponse spectrale d'un tissu urbain (classe 2 = sol nu humide). La réponse la plus faible dans le visible est celle de la classe 3, la réponse la plus marquante de cette classe est enregistrée dans le proche infrarouge, il s'agit sans doute de la végétation haute (classe 3 = forêt et végétation ligneuses). La classe 5 présente également une réponse relativement faible dans le visible, cette réponse commence à croître à partir du B3 donc dans le proche infrarouge pour atteindre son maximum dans le moyen infrarouge. Ce comportement spectral peut être attribué à une végétation basse dispersée sur sol humide (classe 5 = sol nu, peu de végétation). La classe 1 présente une réponse forte dans le visible, dans le moyen infrarouge (B5) ; on enregistre une réponse très inférieure à celle d'un tissu urbain. Cette classe correspond donc à la réponse spectrale d'un sol nu (classe 1 = sol nu). Dans le visible, la classe 4 se trouve en dessous de la classe 1 et 2 (tissu urbain, sol nu) et en dessus de la classe 5 et 6 (végétation haute dense, végétation basse), la réponse la plus marquante de cette classe est enregistrée dans le moyen infrarouge ; cette classe ne peut correspondre sur le terrain qu'aux parcelles agricoles humides (4 = sol nu, parcelles agricoles).



Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 21 juin 1987).

La quantification de la répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau ci-dessous.

Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 21 juin 1987 (traitement d'image satellitaire).

	Surface couverte (en m ²)	Pourcentage de couverture (en %)
Tissu urbain	11322765	17 %
Sol nu	6634458	35,50 %
Végétations	14143709,3	47,50%

2. 2. Image LANDSAT 5 du 8 août 1987

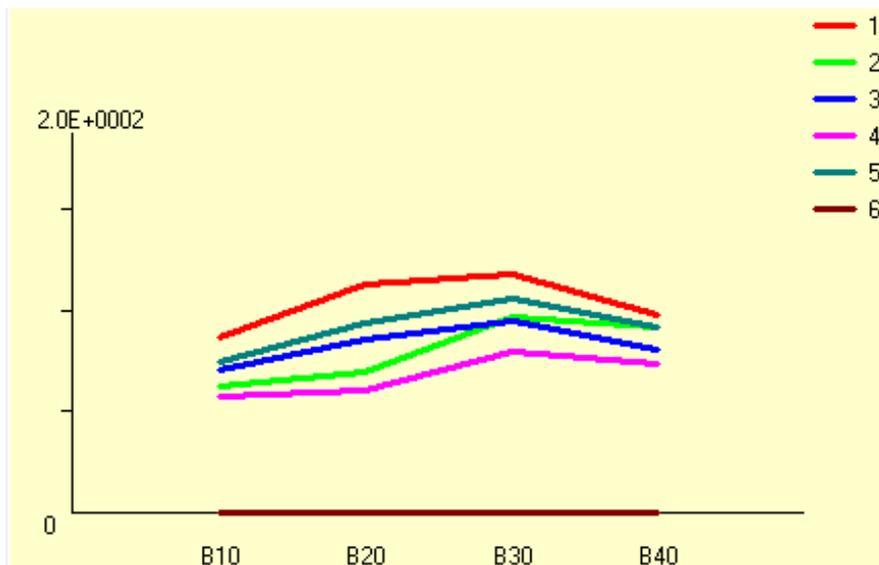
Il s'agit d'une image prise avec un satellite LANDSAT 5 de deuxième génération, elle est de 60 m de résolution et se compose uniquement de quatre bandes spectrales. La composition colorée présentée sur la figure ci-dessous résulte de la combinaison de trois bandes spectrales (1, 2 et 3).

Les zones urbaines ressortent clairement avec une couleur proche du bleu turquoise. La végétation haute apparaît en rouge foncé voire grenat, la végétation basse prend une couleur variant du rouge clair au rose selon la densité et le type d'espèces végétales. Les sols nus ont une réponse très proche de l'urbain, en prenant une couleur qui varie du bleu turquoise très clair au blanc. En été, les parcelles agricoles sont nues, prenant ainsi une couleur verdâtre.



Composition colorée (image LANDSAT5 prise le 8 août 1987).

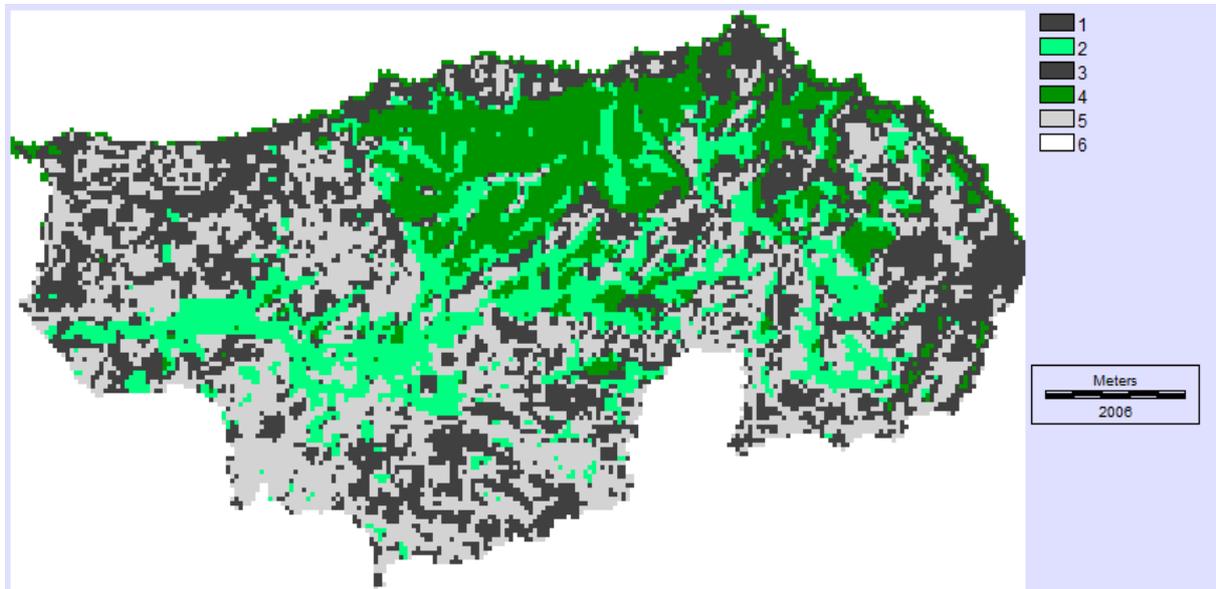
Via un classement automatique exécuté à partir du traitement statistique de l'image avec la méthode des K-means, cinq principales classes ont pu être différenciées



Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 08 août 1987).

La classe 4 présente la réponse la plus faible dans le visible. La réponse la plus marquante de cette classe est enregistrée dans la deuxième partie du visible, ce comportement spectral correspond à une surface couverte de végétation haute, sur le Massif de Bouzaréah cette classe représente la forêt de Bainem. La classe 2 présente une réponse faible dans le visible, mais elle reste tout de même un peu plus élevée que celle de la classe 4. La réponse la plus marquante de la classe 2 est enregistrée dans la deuxième partie du visible. Cette classe correspond à une réponse spectrale d'un couvert végétal. La différence entre la réponse spectrale de la classe 2 et celle de la classe 4 peut être expliquée par une différence entre les espaces végétales et/ou la densité spatiale du couvert végétal. La réponse la plus élevée dans le visible est celle de la classe 1, la réponse la plus marquée (pics) étant également enregistrée

dans le visible. Cette classe correspond donc à la réponse spectrale d'un tissu urbain. Les deux courbes de la classe 3 et 5 présentent la même allure, leurs réponses les plus marquantes sont observées dans le visible. Le comportement spectral des classes 1 et 5 correspond à la réponse d'un sol nu. Toute de même, on note que la réponse de la classe 5 est plus élevée dans la deuxième partie du visible, que celle de la classe 3, ainsi on pense que la classe 5 présente plutôt les affleurements rocheux.



Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 8 août 1987).

La quantification de la répartition spatiale des différents types d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah est présentée dans le tableau ci-dessous.

Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 8 août 1987 (traitement d'image satellitaire).

	Surface couverte (en m ²)	Pourcentage de couverture (en %)
Tissu urbain	11322765	35 %
Sol nu	6634458	32 %
Végétations	14143709,3	33 %

3. Confrontation des résultats (images d'avril, juin et août 1987)

Les images satellitaires prises en trois dates différentes (le 2 avril, le 21 mai et le 8 août) de l'année 1987, montrent que selon la saison, la densité du couvert végétal et par la suite le pourcentage des sols nus changent. Ce constat est très attendu, néanmoins on a remarqué que pour les images (LANDSAT 5 composées de quatre bandes spectrales) prises durant le mois d'août, le pourcentage des zones reconnues comme urbaine est plus élevé, chose qui est théoriquement impossible. Cette augmentation est expliquée simplement par le fait que le mois d'août est le mois le plus sec de l'année (taux d'humidité très faible) ; dans de telles conditions, la réponse spectrale des affleurements rocheux s'approche et se confond avec celle d'un

tissu urbain. De ce fait, afin de quantifier le tissu urbain dans le Massif de Bouzaréah, on doit privilégier des images satellitaires prises en saison relativement humide (printemps et hiver), en particulier quand on a fait à des images composées uniquement de quatre bandes spectrales.

Annexe 6.1. Le Jeu de la vie (Rennard, 2000)

« À l'origine, le Jeu de la vie fut présenté comme un jeu mathématique. Sa description va nous permettre de matérialiser et mieux comprendre ce que sont les automates cellulaires. À l'instar des espaces cellulaires d'Ulam, le Jeu de la vie se présente sous la forme d'une grille constituée de cellules, par exemple :

00	01	02	03	04
10	11	12	13	14
20	21	22	23	24

Exemple de configuration de départ.

L'univers est limité ici à un rectangle de 5 par 3. Pour faciliter l'explication, nous avons numéroté les cellules de 0 à 4 en horizontal et de 0 à 2 en vertical. Les cellules claires sont actives.

Dans le Jeu de la vie, est considérée comme voisine toute cellule contiguë, y compris les diagonales.

00	●	●	●	04
10	●	12	●	14
20	●	●	●	24

Détermination du voisinage.

La figure ci-dessus montre le voisinage de la cellule 12. En l'occurrence, sur les huit voisins, deux sont actifs.

Les règles du Jeu de la vie sont simples :

- Une cellule inactive entourée de 3 cellules actives devient active (« naît ») ;
- Une cellule active entourée de 2 ou 3 cellules actives reste active ;
- Dans tous les autres cas, la cellule « meurt » ou reste inactive.

On peut interpréter ces règles en considérant qu'une naissance nécessite un certain rassemblement de population (3 en l'occurrence), que les cellules ne peuvent survivre à un trop grand isolement (moins de 2 voisines) et qu'une trop forte concentration (plus de 3 voisines) les étouffe.

Les automates cellulaires fonctionnent de manière *discrète*. C'est-à-dire que le temps s'écoule par à-coups. Ceci signifie dans notre cas qu'à la génération t , chaque cellule examine son environnement et détermine son état futur. Quand l'ensemble des cellules a été traité, et

seulement à ce moment là, toutes les cellules passent à l'état calculé. On simule ainsi un traitement parallèle.

Illustrons ce mécanisme à partir de la configuration précédente :

1	2	3	2	1
1	1	2	1	1
1	2	3	2	1

Valeurs de voisinage.

Dans le schéma précédent, le nombre de voisins actifs est noté pour chaque cellule :

- Les cellules inactives 00, 04, 10, 14, 20 et 24 ont une voisine active et restent donc en l'état.

- Les cellules inactives 01, 03, 21 et 23 ont deux voisines, elles ne changent donc pas.

- Les deux cellules inactives restantes (02 et 22) ont trois voisines actives, la règle 1 s'applique : elles naissent.

- Les cellules actives 11 et 13 n'ont qu'une voisine active : elles meurent.

- Enfin la cellule active 12 ayant deux voisines actives elle reste en vie.

À la génération suivante, seules les cellules 02, 12 et 22 seront donc actives.

00	01	02	03	04
10	11	12	13	14
20	21	22	23	24

Seconde génération

Disponible sur : <http://www.rennard.org/alife/french/ac.pdf> »

Annexe 6.2. Les cinq premiers modèles de base reliant directement la géographie avec les techniques des automates cellulaires (extrait de l'article Cellular Geography de Tobler, 1979).

« Using the positional notation let g_{ij}^t be the land use category (urban, rural...) at the location i,j at time t . Let $g_{ij}^{t+\Delta t}$ be the land use category at this location at some other time. One primitive classification of models of land use change is then as follows:

- (I) The *independent* model : $g_{ij}^{t+\Delta t}$ is a random variable in no way related to g_{ij}^t
 (II) The functionally *dependent* model. The land use at location i,j at time $t + \Delta t$ depends on the previous land use at that location, $g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{ij}^t)$
 (III) The *historical* model. The land use at position i, j at $t + \Delta t$ depends on the several previous land uses at that location:

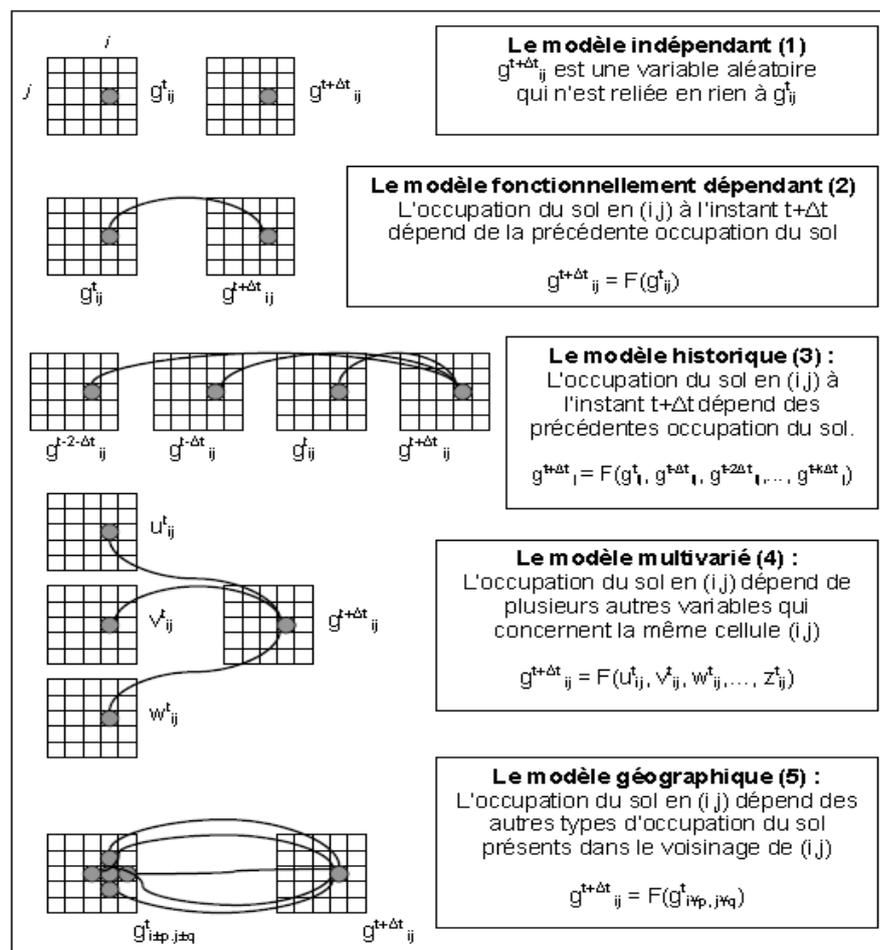
$$g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{ij}^t, g_{ij}^{t+\Delta t}, g_{ij}^{t+\Delta 2t}, \dots, g_{ij}^{t+\Delta kt})$$

- (IV) The *multivariate* model. The land use at location i, j is dependent on several other variables at that location:

$$g_{ij}^{t+\Delta t} = F(U_{ij}^t, V_{ij}^t, W_{ij}^t, \dots, Z_{ij}^t)$$

- (V) The *geographical* model. The land use at location i, j is dependent on the land use at other (neighboring) locations:

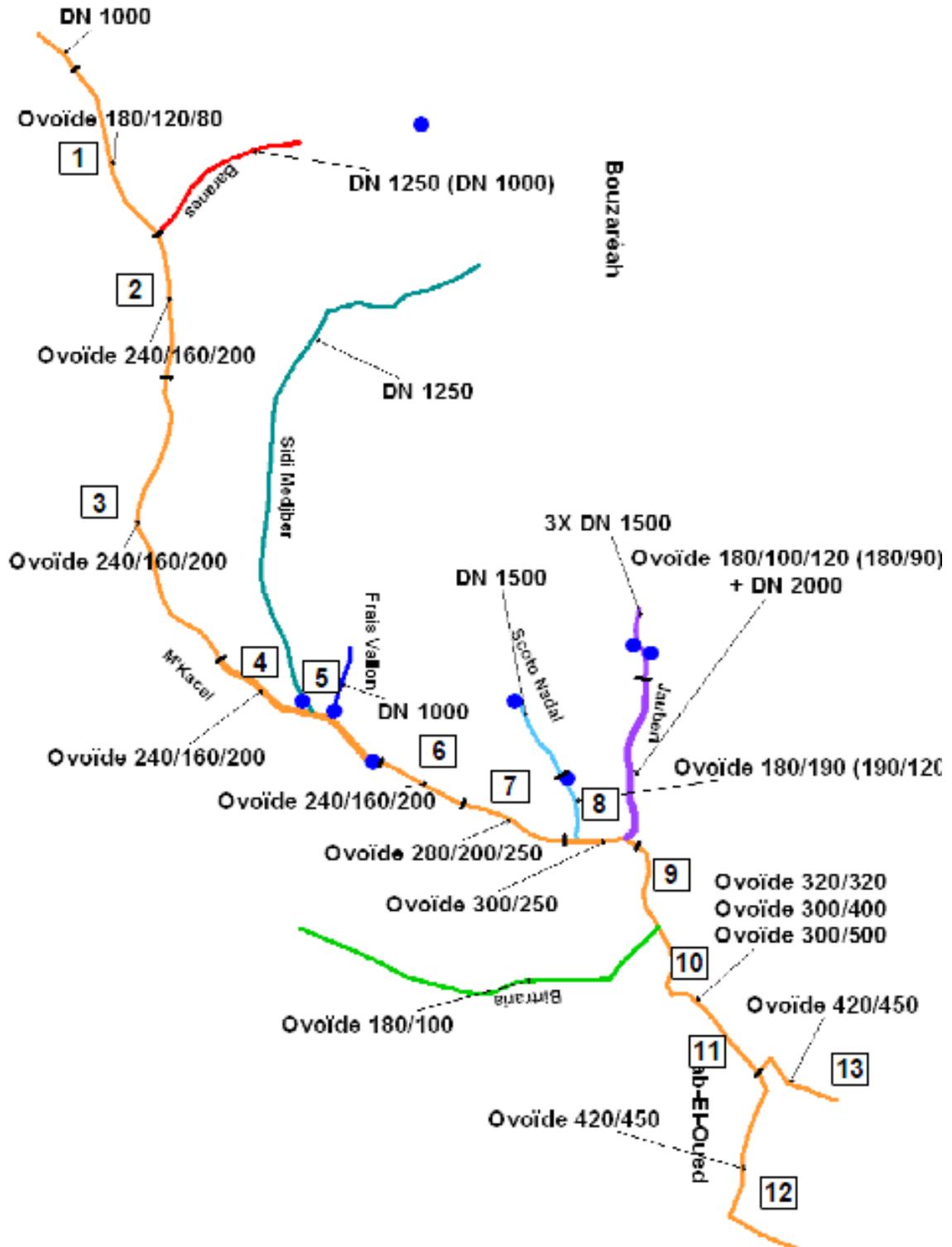
$$g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{i\forall p, j\forall q}^t)$$



Graphic illustration of the five models using a 25-cell geographical array (LAJOIE, 2007).

Annexes 7.1. Collecteur M'Kacel

« Les plans précis fournis par l'ONA ont permis de distinguer, de l'amont vers l'aval, 7 différentes sections de l'ovoïde. La localisation des différents tronçons est donnée sur la carte ci-dessous et en annexe.



Caractéristiques des collecteurs

La pente des différents tronçons de l'ovoïde est obtenue par la lecture des plans.

La capacité des différents tronçons, de l'amont vers l'aval, est donnée dans le tableau ci-dessous. La présence de plusieurs chutes le long du collecteur engendre des pertes de charge singulières qu'il est malheureusement difficile de calculer. Dans le cadre de cette analyse préliminaire, la diminution de la capacité du collecteur qu'elles induisent se traduit par une réduction du coefficient de Strickler (70 au lieu de 75, soit une réduction de 7% de la capacité).

Récapitulatif des capacités des différents tronçons du collecteur M'Kacel

Tronçon	Type de section	Section (m ²)	Périmètre (m)	Pente	Qmax (m ³ /s)
1	1	1,8	5,4	5,5%	14
2	2	3,9	7,3	4%	33
3	2	3,9	7,3	4%	36
4	2	3,9	7,3	5%	40
5	2	3,9	7,3	5%	40
6	2	3,9	7,3	4,5%	38
7	3	6,3	10,2	4,5%	66
8	3	6,3	10,2	4%	64
9	4	9,4	11,6	3,5%	107
10	5	8,6	11,5	2,5%	86
11	6	12,3	13,9	2,5%	125
12	7	14,1	13,2	1,3%	125
13	7	14,1	13,2	2,7%	180

»

Annexe 7.2. Société des Eaux et d'Assainissement d'Alger « SEAAL »

SEAAL est une société créée en mars 2006, elle se charge de la gestion des services de l'eau et d'assainissement des eaux usées au niveau de la Wilaya d'Alger. C'est une société par action détenue par deux grandes entreprises de l'état, à savoir l'Office Nationale de l'Assainissement, et l'Opérateur Public de Droit Algérien. SEAAL est formée de quatre principales directions :

- *La direction des ressources humaines* : elle est chargée de l'évaluation, de l'anticipation et de l'accompagnement des différents pôles de la société ; dans le but de répondre à leurs besoins en terme d'expertise et de l'acquisition de nouvelles compétences. Cette direction englobe en totale 4400 salariés, dont 1012 cadres. Ces derniers sont continuellement formés, et souvent encadrés par des experts étrangers dans une démarche de transfert des savoirs faire.
- *La direction de production* est responsable de l'exploitation et de la gestion préventive de l'équipement utilisé dans l'exploitation de l'eau potable (Station de pompage, de traitement et de dessalement, les laboratoires d'analyse, etc.). Cette direction a comme mission de fournir une eau de qualité aux citoyens, tout en garantissant une exploitation optimale et durable de cette ressource. Pour atteindre ces objectifs SEAAL se donne tous les moyens : la construction et la mise en service de grands nouveaux ouvrages, une meilleure coordination entre les différents enjeux sur le terrain, automatisation des techniques de gestion et de contrôle, etc.
- *La direction de l'assainissement* est gérée par une équipe jeune mais hautement qualifiée et régulièrement formée à des techniques innovantes. Une équipe qui c'est beaucoup investie à ce jours, dans le diagnostique, l'entretien et le maintien durable des différentes infrastructures appartenant aux services de l'assainissement. A savoir que c'est des cadres de *la direction de l'assainissement* du SEAAL qui ont réalisé les travaux de curage du collecteur de l'Oued M'Kacel.

En 2010, ce service a mené un projet appelé *gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement*, ce projet est à la fois ambitieux et indispensable pour la mise en place d'une gestion préventive. Le projet a comme but principal l'établissement d'un diagnostique général de l'état (structure, fonctionnement) du réseau d'assainissement de la wilaya d'Alger. L'achèvement de ce projet passe par cinq principales étapes.

1. *Un inventaire des ouvrages et des tronçons du réseau* a été réalisé, en exploitant tous les archives, l'historique des interventions sur terrain, ainsi que les résultats des études ultérieures. L'ensemble des informations recueillies vont être introduites dans un SIG, afin de produire par la suite un plan du réseau d'assainissement préliminaire (tronçons et regards).
2. *Les enquêtes sur terrain* sont menées dans le but de valider, corriger et rajouter des tronçons au niveau des plans préliminaires. Ces enquêtes ont aussi permis de collecter des informations sur l'état, l'accessibilité, et le taux d'encrassement de chaque regard du réseau d'assainissement. A la fin de cette tâche, une base de données SIG intégrant l'ensemble de ces données est établie.



Mesures des taux d'encrassement dans les regards.

3. Le DiagRap « Diagnostic Rapide », permet d'évaluer globalement l'état du réseau sous-terrain, valider ces données structurales et identifier les déformations au niveau des tronçons. Cette tâche est assurée par des inspections au VidéoPériscope (IVP), il s'agit d'une caméra hydrozoom qui assure une vue allant jusqu'à 20 m dans le réseau. La caméra est guidée de l'extérieur par un boîtier de commande.



Le matériel utilisé dans les inspections VidéoPériscope.

Uniquement 33 % des regards sont accessibles par les caméras, car au-delà d'un certain seuil d'encrassement (plus de 30 %), les IVP ne sont plus fonctionnelles.

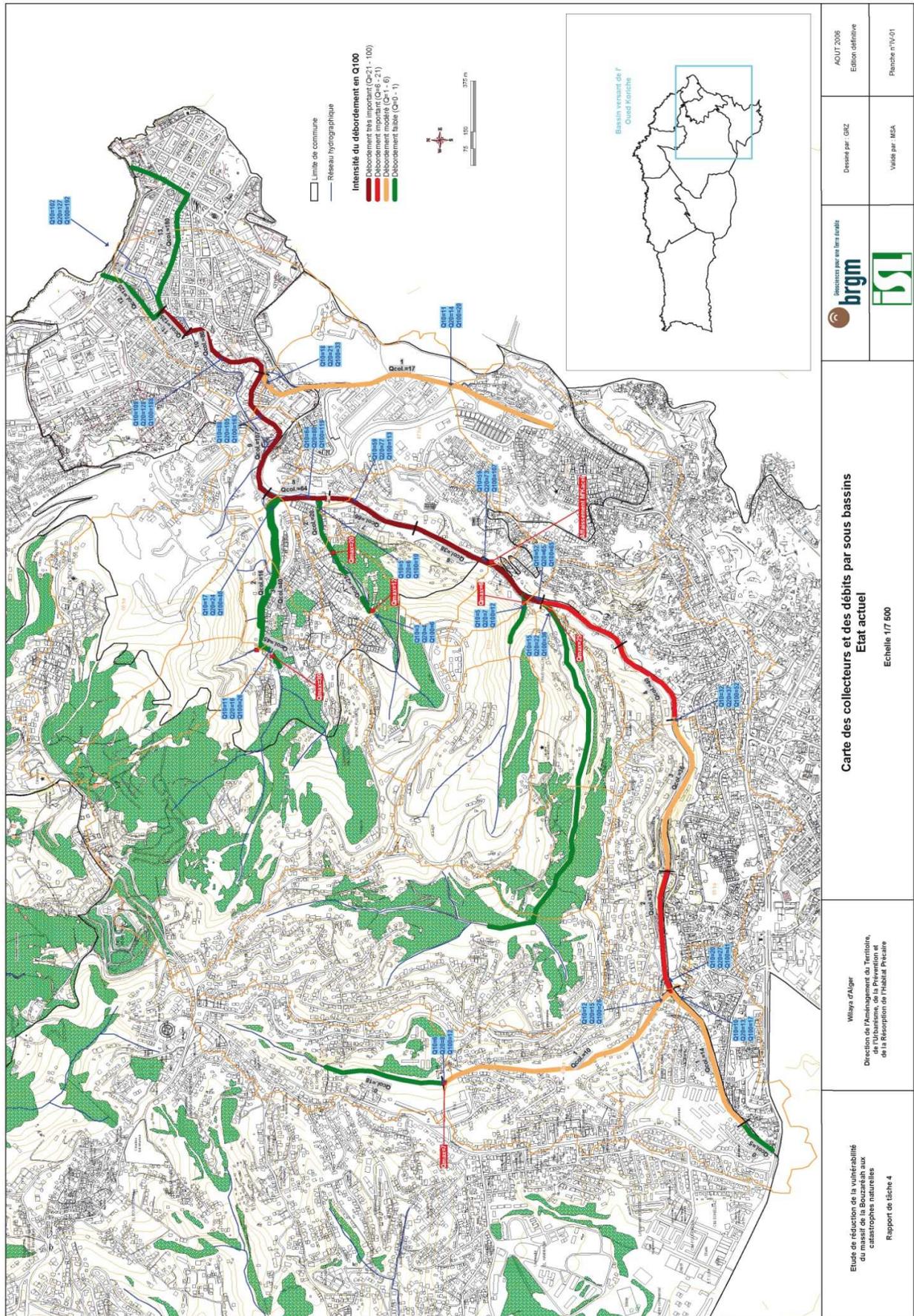
4. Une Inspections TéléVisuelles (ITV) est envisagée, quand les IVP ne donnent pas des résultats satisfaisants. Les ITV sont réalisés grâce à une caméra mobile qui peut se déplacer au sein du réseau. En plus de l'information visuelle (photos et vidéo), les ITV font aussi des mesures géométrique au niveau des tronçons (contre-pentes, diamètre, forme et dimension du périmètre, détecte les déformations ...) ;



Le matériel utilisé dans les inspections TéléVisuelles (ITV)

5. Selon les résultats de l'ITV, des travaux de d'entretien, de renouvellement et réhabilitation seront programmés sur le terrain.

Annexe 8.1. Carte des collecteurs et des débits par sous-bassin



Annexe 8.2. Liste des mesures d'adaptation au risque pour la rénovation. Ces mesures sont classées, selon leur appartenance à la stratégie *résister* ou *céder*, en deux principales catégories. Une troisième classe intitulé *mesures transversales* où les mesures proposés ne sont spécifiques à aucune des deux stratégies d'intervention citées ci-dessus. Les *mesures transversales* peuvent être appliquées quelques soit la stratégie adaptée (CEPRI, 2009).

1. Stratégie « résister »

Mesures	Corps du bâtiment	Ouvrage	Description (en quoi ça consiste, à quoi ça sert)	H < 1 m	H < 1 m	1 m < H	1 m < H	H >	H >	Améliore la sécurité des personnes	Réduit les délais de retour à la normale	Réduit les dom- mages	Limite les effets domino sur le voisinage
				D < 48 h	D > 48 h	< 2,5 m D < 48 h	< 2,5 m D > 48 h	2,5 m D < 48 h	2,5 m D > 48 h				
Privilégier les huisseries métalliques.	Second œuvre	Huisseries intérieures	Pour autant que l'inondation ne soit pas accompagnée d'un fort courant qui risque de détruire les cloisons intérieures, les huisseries métalliques sont à privilégier car elles sont a priori peu sensibles à une immersion, notamment aux déformations qui pourraient en résulter. Elles permettent de ce fait de remplacer plus facilement les portes intérieures endommagées par l'inondation. Il est préférable d'associer cette mesure avec la mise en place de cloisons à ossature métallique. En effet, si l'ensemble des cloisons est à relaire, les huisseries métalliques n'ont plus vraiment d'intérêt.	3	1	3	1	3	1	Non	Oui	Oui	Non
Privilégier les plinthes PVC.	Second œuvre	Plinthes	Les plinthes en PVC sont peu sensibles à l'eau. Cette option permet ainsi de limiter les conséquences de l'inondation sous réserve que la fixation des plinthes garantisse leur maintien pendant et après l'inondation.	3	3	3	3	3	3	Non	Non	Oui	Non
Privilégier les volets roulants en PVC ou en aluminium.	Second œuvre	Fermatures - Occultations	Les produits en PVC et en aluminium sont peu susceptibles d'être détériorés par la seule immersion. Sous réserve que l'inondation ne soit accompagnée de forts courants d'eau, le choix de volets et d'occultations réalisés à l'aide de ces matériaux permet de limiter les dégâts.			3	3	3	3	Non	Non	Oui	Non
Privilégier les volets roulants à commande manuelle.	Second œuvre	Fermatures - Occultations	Les volets à commande manuelle sont à privilégier car ils peuvent être ouverts dans toutes circonstances, à la différence des volets à commande électrique, dont le moteur peut être endommagé par l'eau. Ces derniers nécessitent par ailleurs une alimentation en électricité. Un volet à commande électrique qui serait bloqué empêcherait le séchage s'il est fermé et favoriserait les intrusions s'il reste en position ouverte.	1	1	1	1	1	1	Non	Non	Oui	Non

Individualiser les circuits entre parties inondées et les parties hors d'eau.	Fluides et équipements	Installations électriques	Cette mesure permet d'isoler les parties du réseau intérieur endommagées lors de l'inondation tout en ménageant, après l'inondation, l'alimentation électrique en toute sécurité dans les pièces non inondées. La remise en état du réseau dans la partie inondée peut ainsi être effectuée sans conséquence sur le réseau des parties non inondées. Cette mesure est à mettre en œuvre de manière groupée avec les autres mesures concernant les installations électriques et doit être impérativement confiée à un professionnel.	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non
Mettre hors d'eau les tableaux électriques de répartition, les dispositifs de protection et les différents équipements courant faible et régulation/programmation thermique.	Fluides et équipements	Installations électriques	Il s'agit ici d'éviter un éventuel remplacement de ces dispositifs et leur dysfonctionnement (court-circuit, par exemple). Elle n'est cependant possible que dans le cas de bâtiments bénéficiant de zones situées au-dessus du niveau des plus hautes eaux connues. Cette mesure est à mettre en œuvre de manière groupée avec les autres mesures concernant les installations électriques et doit être impérativement confiée à un professionnel.	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non
Mettre en œuvre des circuits électriques (courant fort et courant faible) descendants pour éviter les retentions d'eau dans les gaines et conduits.	Fluides et équipements	Installations électriques	La présence d'eau dans les gaines et conduits électriques présente un danger pour les utilisateurs et risque de causer des pannes à répétition. En faisant descendre les réseaux du plafond et des parties supérieures du logement, le risque de stagnation d'eau est fortement réduit puisque son évacuation est favorisée ainsi que le séchage du réseau. Une vérification des appareillages (prises, interrupteurs), accompagnée d'un séchage complet, doit cependant être effectuée avant remise sous tension. Cette mesure est à mettre en œuvre de manière groupée avec les autres mesures concernant les installations électriques et doit être impérativement confiée à un professionnel.	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non

2. Stratégie « céder »

Mesures	Corps du bâtiment	Ouvrage	Description (en quoi ça consiste, à quoi ça sert)	H < 1 m	H < 1 m	1 m < H	1 m < H	H >	H >	Améliore la sécurité des personnes	Réduit les délais de retour à la normale	Réduit les dommages	Limite les effets domino sur le voisinage
				D < 48 h	D > 48 h	< 2,5 m	< 2,5 m	2,5 m	2,5 m				
Mettre hors d'eau le coffret du distributeur de coupure et de comptage.	Fluides et équipements	Installations électriques	Les dégâts causés par la présence d'eau sur le coffret du distributeur peuvent nécessiter des travaux importants et retarder la remise en état du bâtiment. Cette mesure permet donc d'éviter ce désagrement. Cette modification doit être réalisée avec l'accord du distributeur d'énergie. Cette mesure est à mettre en œuvre de manière groupée avec les autres mesures concernant les installations électriques.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Non
Mettre hors d'eau le groupe de traction (moteur, treuil) et l'armoire électrique de commande.	Fluides et équipements	Ascenseurs	Le groupe de traction et l'armoire électrique de commande sont essentiels au fonctionnement de l'ascenseur. Or, ces ouvrages sont souvent localisés au sous-sol ou au rez-de-chaussée. Il s'agit donc de les rehausser définitivement, ou dans le cas d'un moteur embarqué, de bloquer la cabine hors d'atteinte de l'eau.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Non
Prévoir un dispositif qui permette d'immobiliser la cabine au-dessus des hauteurs d'eau potentielles ou lui interdire les niveaux inondés.	Fluides et équipements	Ascenseurs	Afin de limiter les dommages sur l'ascenseur, il s'agira ici d'empêcher la cabine de descendre dans les niveaux inondés. En dehors du moteur qui peut être embarqué, c'est l'ensemble du réseau électrique présent dans l'ascenseur qui pourrait être endommagé. Il s'agira donc d'éviter que l'ascenseur descende malencontreusement dans les zones inondées.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Non
Mettre hors d'eau les équipements de production de chaleur (chaudière, échangeur, pompe à chaleur) et d'eau chaude sanitaire, de climatisation et de ventilation (extracteurs d'air, prises d'air) ainsi que les matériels accessoires (pompes, régulations, tableaux de commande).	Fluides et équipements	Chauffage - ECS - Climatisation - Ventilation	Ces équipements, souvent coûteux et longs à remplacer, peuvent être sérieusement endommagés suite à une immersion. Or, ils facilitent le retour à la normale, notamment l'assèchement des murs. Il est donc préférable de les rehausser de manière définitive au-dessus du niveau des plus hautes connues. Les réseaux associés (tuyauterie notamment) devront être faciles à examiner, visiter, afin de les vérifier avant la remise en route du système.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Non
Equiper les réseaux enterrés d'évacuation (eaux usées) de clapets anti-retour réparables et facilement accessibles pour la vérification et l'entretien.	Environnement	Réseaux extérieurs	En cas d'inondation, l'eau peut remonter par les canalisations et entrer ainsi dans le bâtiment. Un clapet anti-retour permet de bloquer cette voie de pénétration de l'eau, une eau par ailleurs sale et contaminée, susceptible d'engendrer des problèmes sanitaires lors du retour des occupants. La mise en place de ce type d'équipement peut nécessiter l'accord du concessionnaire du réseau d'assainissement.	3	3	3	3	3	3	Non	Oui	Oui	Non
Privilégier les portes en acier ou en PVC, à commande manuelle ou électrique débrayable.	Second œuvre	Porte de garage	Le PVC ou l'acier subissent a priori peu de dégâts du fait de la seule immersion. Pour autant que l'inondation ne s'accompagne pas de forts courants, ils sont à privilégier. Ces portes doivent aussi être préférentiellement munies de commande manuelle ou électrique débrayable afin de ne pas avoir de problèmes d'ouverture et de fermeture dus aux dysfonctionnements d'origine électrique (moteur noyé, commande détériorée).	2	2	2	2	2	2	Non	Non	Oui	Non

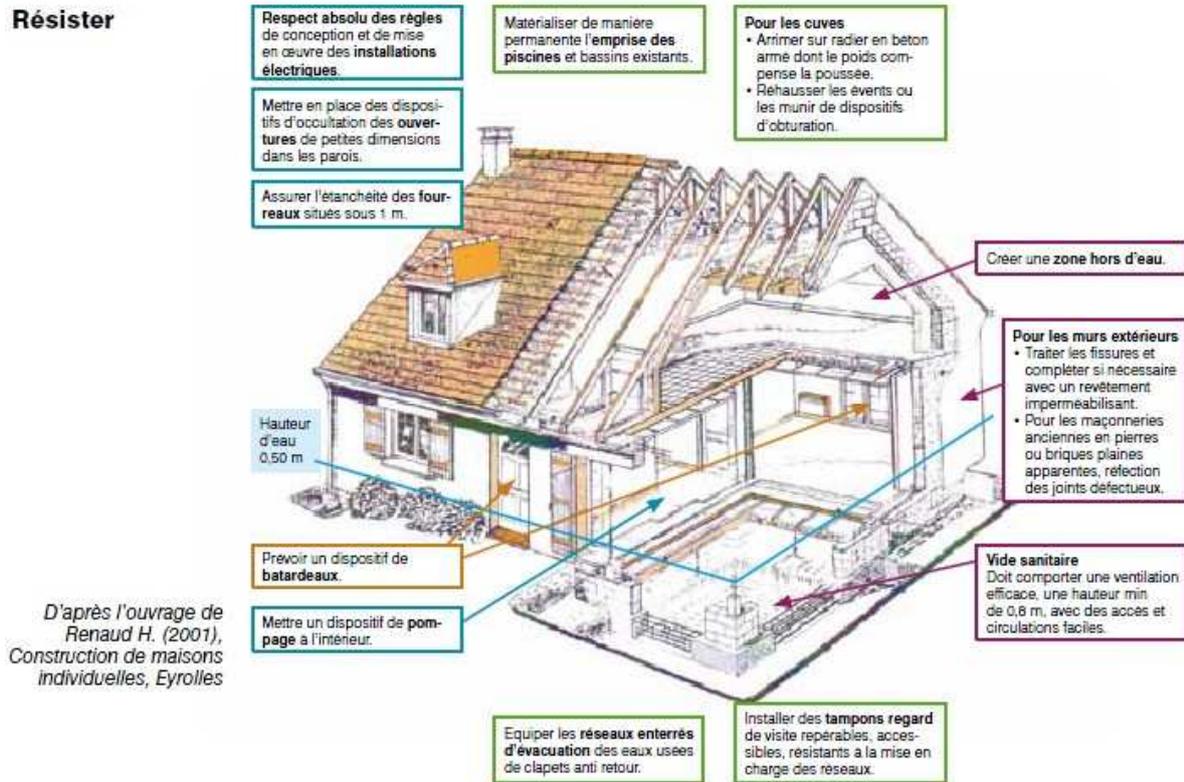
3. Mesures transversales

Mesures	Corps du bâtiment	Ouvrage	Description (en quoi ça consiste, à quoi ça sert)	H < 1 m D < 48 h	H < 1 m D > 48 h	1 m < H < 2,5 m D < 48 h	1 m < H < 2,5 m D > 48 h	H > 2,5 m D < 48 h	H > 2,5 m D > 48 h	Améliore la sécurité des personnes	Réduit les délais de retour à la normale	Réduit les dommages	Limite les effets domino sur le voisinage
Créer une zone refuge, hors d'eau, facilement accessible de l'intérieur et de l'extérieur par les occupants et les secours et équipée de manière à assurer des conditions de vie et de sécurité satisfaisantes pour de courtes durées.	Gros œuvre	Zone de refuge	<p>La zone refuge permet aux habitants de se mettre à l'abri en attendant l'évacuation et/ou la décrue. Elle peut aussi être une zone privilégiée de retour dans le bâtiment après la crue, pendant les périodes de travaux de séchage et de remise en état. Elle permet également de mettre à l'abri les équipements et matériels que l'on souhaite sauvegarder. Cette zone doit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - être facilement accessible de l'intérieur et de l'extérieur tant par les occupants que par les secours (afin d'assurer l'évacuation depuis cette zone); - offrir des conditions de sécurité satisfaisantes. Depuis cette zone, les habitants doivent pouvoir se manifester auprès des équipes de secours ; - offrir un confort minimum permettant, si nécessaire, d'y attendre les secours ou la décrue ; - disposer d'une surface minimale (compte tenu du nombre d'occupants), de sanitaires, d'une réserve d'eau potable, d'une source d'énergie permettant le chauffage éventuel en toute sécurité dans l'attente des secours ; - éventuellement permettre un séjour prolongé après inondation dans l'attente de la fin des travaux de remise en état du niveau inondé (qui peuvent durer quelques mois). 	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non
Respect absolu des règles de conception et de mise en œuvre des installations électriques intérieures au bâtiment.	Fluides et équipements	Installations électriques	<p>La conception et la réalisation des réseaux électriques à l'intérieur des bâtiments sont définies de manière précise dans la norme NF C 15-100 (installations électriques à basse tension). La mise en œuvre de ces dispositifs doit impérativement être confiée à un professionnel. Il y va de la sécurité des occupants.</p> <p>Une alimentation électrique autonome peut permettre de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rester dans l'habitation quand cela est possible, c'est-à-dire pour des crues de faibles durées, quand la sécurité des personnes n'est pas remise en cause ; - de fournir l'énergie nécessaire au pompage de l'eau ; - de rentrer plus rapidement dans le logement, lorsqu'une zone hors d'eau privilégiant le retour a été prévue, dans la mesure où il n'y a pas de problèmes de stabilité du bâtiment ou de dégâts pouvant entraîner des risques pour la sécurité des personnes ; 	1						Oui	Oui	Oui	Non
Envisager une alimentation électrique autonome (groupe électrogène).	Fluides et équipements	Installations électriques	<ul style="list-style-type: none"> - d'accélérer le séchage des murs et des meubles, etc., via l'utilisation d'équipement de séchage électrique. Le courant électrique peut être coupé pendant plusieurs jours après la crue. Une alimentation électrique autonome permet de commencer quelques premiers travaux de réparation avant la remise en route de l'électricité. Ces installations doivent garantir la sécurité des occupants tant sur le plan de l'installation électrique que sur celui du fonctionnement du dispositif. En particulier, veiller à ne pas rejeter les gaz de combustion d'un groupe électrogène à l'intérieur du bâtiment pour éviter les risques d'intoxication au monoxyde de carbone. 	3	3	3	3	3	3	Non	Oui	Oui	Non

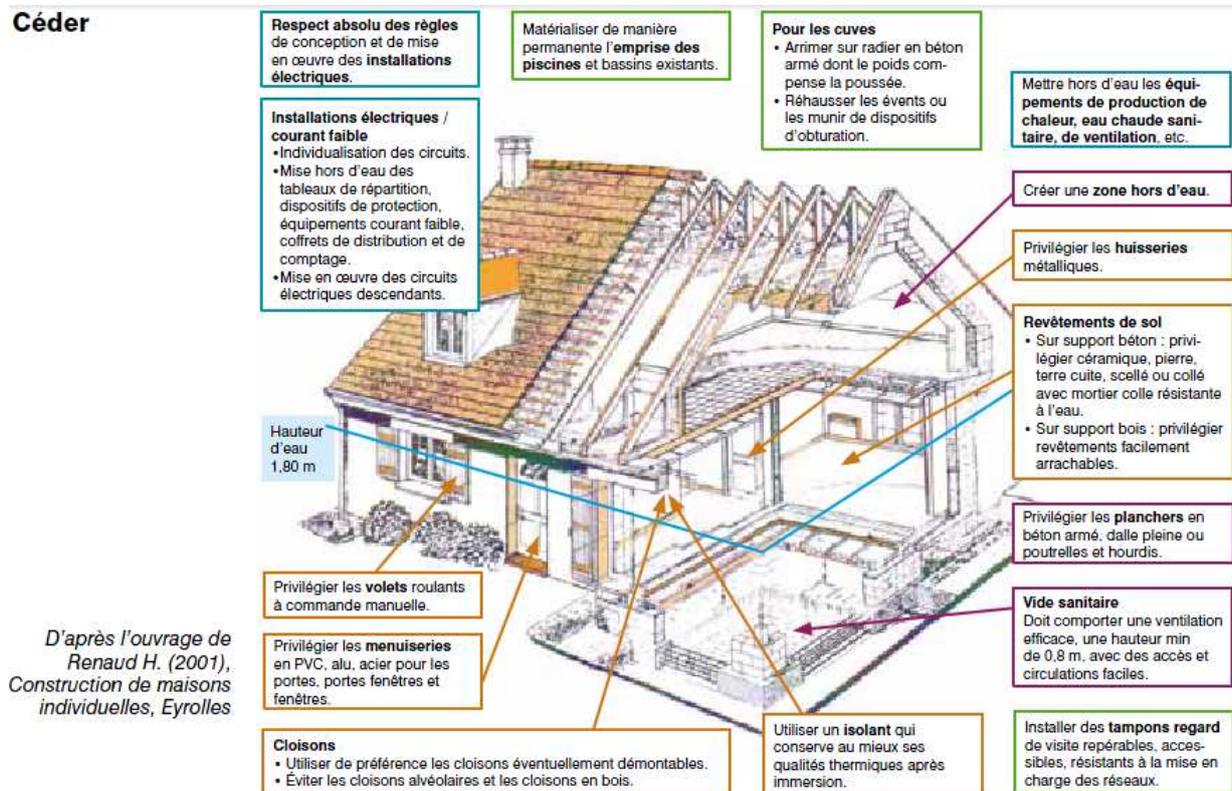
Mesures	Corps du bâtiment	Ouvrage	Description (en quoi ça consiste, à quoi ça sert)	H < 1 m	H < 1 m	1 m < H	1 m < H	H >	H >	Améliore la sécurité des personnes	Réduit les délais de retour à la normale	Réduit les dom- mages	Limite les effets domino sur le voisinage
				D < 48 h	D > 48 h	< 2,5 m D < 48 h	< 2,5 m D > 48 h	D < 48 h	D > 48 h				
Ménager des trappes sur les murs opposés de manière à favoriser l'aération du vide sanitaire. Si sa hauteur le permet, ces trappes peuvent également servir d'accès pour une vérification des ouvrages (réseaux, isolation,...).	Gros œuvre	Vide sanitaire	Sauf pour des inondations de faible hauteur au niveau du bâtiment (quelques décimètres), la création d'un vide sanitaire n'apporte aucun avantage spécifique vis-à-vis du risque d'inondation. En revanche, dès que cette option est retenue, il est souhaitable de prendre des dispositions afin d'évacuer l'eau et faciliter le séchage. Par exemple, que : - plusieurs trappes, si possible sur des murs opposés, soient créées pour aérer cette zone afin d'en favoriser le séchage; - ces trappes soient occultées par des grilles susceptibles de laisser passer l'eau tout en arrêtant les corps flottants (branches,...) ; - les différents compartiments du vide sanitaire communiquent entre eux afin de faciliter l'écoulement de l'eau. Si le vide sanitaire est de dimension suffisante, les trappes peuvent servir d'accès pour une vérification de l'état des ouvrages du vide sanitaire (et d'éventuelles réparations). Dans le cas contraire, le vide sanitaire peut être le piège de stagnations importantes et vecteur d'humidité pour le reste du bâtiment.	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non
Installer des tampons de regard de visite repérables, accessibles, résistant à la mise en charge du réseau.	Environnement	Réseaux extérieurs	La mise en place de regards accessibles et visitables permet, après la crue, de vérifier l'état des canalisations, qui peuvent en effet se charger en boue. Afin d'assurer la sécurité des personnes, on choisira des regards dont les tampons peuvent être bloqués et rester en place malgré la pression, évitant ainsi de passer une jambe dans le regard alors que l'eau n'est pas complètement évacuée.	1	1	1	1	1	1	Oui	Oui	Oui	Non
Arrimer les cuves, citernes, réservoirs sur des ouvrages dimensionnés pour résister à la poussée d'Archimède.	Environnement	Cuves, citernes, réservoirs	Les cuves, en cas de mauvais ancrage, sont soulevées sous l'effet de la poussée d'Archimède exercée par l'eau et se mettent à flotter. Elles peuvent alors être emportées par le courant et deviennent des objets flottants dangereux. Elles peuvent ainsi percuter des bâtiments aux alentours. Si elles se retournent ou si les canalisations de raccordement se désolidarisent de la cuve, leur contenu peut se répandre et, ainsi, polluer l'environnement. Pour éviter cela, il est nécessaire d'arrimer les cuves, citernes et réservoirs sur des ouvrages compensant la poussée d'Archimède.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Oui
Rehausser les évènements ou les munir d'un dispositif d'obturation automatique en cas d'immersion.	Environnement	Cuves, citernes, réservoirs	Une fois les cuves, citernes, réservoirs bien arrimés, il est nécessaire de rehausser les évènements ou de les munir d'un dispositif d'obturation automatique en cas d'immersion, afin d'éviter à l'eau de rentrer dans la cuve et de polluer ainsi la zone alentour.	1	1	1	1	1	1	Non	Oui	Oui	Oui
Matérialiser de manière permanente l'emprise des piscines et bassins existants sous forme de balises ou autre système de signalisation.	Environnement	Jardin, cour, terrasse	Indépendamment de la réglementation relative à la sécurité des piscines privatives, les bassins et les piscines ne sont plus visibles lors d'inondation en raison de la turbidité de l'eau. Il y a, de ce fait, pour les sauveteurs ou pour toute personne circulant au voisinage, un risque important de noyade du fait de la profondeur potentiellement importante de ces bassins. Il s'agit donc d'installer un dispositif de balisage permettant de repérer leur emprise.	1	1	1	1	1	1	Oui	Non	Non	Non

4. Illustrations des mesures de rénovation les plus importantes

Résister



Céder



Liste des figures

Fig. 2.1. Processus de génération des écoulements par dépassement de la capacité d'infiltration et sur surface saturée.	45
Fig. 2.2. Phase de formation des OPS sous l'effet de l'érosion mécanique des gouttes de pluie.	47
Fig. 2.3. Mécanismes à l'origine de la genèse des crues.	50
Fig. 2.4. Influence de la ville sur le cycle de l'eau.	55
Fig. 3.1. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1960.	75
Fig. 3.2. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1986.	77
Fig. 3.3. Carte de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 10 août 2011.	78
Fig. 3.4. Evolution de l'occupation du sol du Massif de Bouzaréah entre 1960 et 2011.	79
Fig. 3.4. Composition colorée d'une image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987. La composition colorée permet de proposer une première interprétation visuelle en vue d'identifier les principaux éléments qui structurent le territoire.	80
Fig. 3.5. Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987).	81
Fig. 3.6. Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 2 avril 1987).	82
Fig. 3.7. Composition colorée (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).	83
Fig. 3.8. Signature spectrale moyenne (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).	83
Fig. 3.9. Classification de l'image (image LANDSAT5 prise le 11 septembre 2011).	84
Fig. 3.10. Répartition spatio-temporelle des classes d'occupation du sol dans le Massif Bouzaréah obtenue avec deux méthodes différentes.	86
Fig. 3.11. Répartition spatio-temporelle des classes d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah obtenue avec deux méthodes différentes.	87
Fig. 4.1. Unités de relief dans la région d'Alger.	91
Fig. 4.2. Carte pluviométrique du nord de l'Algérie (ONM, 2010).	94
Fig. 4.3. Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Bouzaréah.	94
Fig. 4.4. Nombre total de cyclogenèses détectées sur 105 km ² sur la Méditerranée occidentale et nombre total de cyclogenèses enregistrées sur l'ensemble du bassin rapporté à la surface (modifié d'après Trigo <i>et al.</i> , 2002)...	96
Fig. 4.5. Schéma d'un orage unicellulaire (adapté de Wilk <i>et al.</i> , 1977).	97
Fig. 4.6. Schéma d'un orage multicellulaires (adapté de NOAA)	97
Fig. 4.7. Aspect des tornades subtropicales (d'ordre F1, F0)	98
Fig. 4.8. Unités hydrologiques contributives du Massif de Bouzaréah.	99
Fig. 4.9. Structure du Massif de Bouzaréah (Saadallah, 1975).	100
Fig. 4.10. Carte lithologique du Massif de Bouzaréah (BRGM, 2005).	102
Fig. 4.11. Localisation des stations météorologiques du Grand Alger et dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (fond d'image Google Earth).	105

Fig. 4.12. Variation interannuelle des pluies entre 1891 et 2001 (données lacunaires 1901-1907, 1972, 1974-1976, 1978, 1985-1986, 1989-1991).....	105
Fig. 4.13. Variations des totaux inter- et intra-mensuels des mois d'octobre, novembre et décembre.....	106
Fig. 4.14. Date et valeur des cumuls pluviométriques en 24 h supérieurs à 80 mm à la station de Bouzaréah (1908-2007 ; données ANRH).....	106
Fig. 4.15. Représentation du lemniscate ratio proposé par Chorley <i>et al.</i> (1957).....	110
Fig. 4.16. Courbe hypsométrique du bassin-versant de l'Oued Koriche.....	111
Fig. 4.17. Courbe hypsométrique du bassin-versant de Beni Messous.....	111
Fig. 4.18. Carte des pentes dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.....	113
Fig. 4.19. Carte des pentes dans le bassin-versant de Beni Messous.....	113
Fig. 4.20. Carte des pentes des sous-bassins versants côtiers.....	114
Fig. 4.22. Réseau hydrographique théorique du Massif de Bouzaréah.....	115
Fig. 4.22. Classification descriptive du réseau hydrographique proposée par Howard (1967) : A) types de base de réseaux hydrographiques ; B) types modifiés de réseaux hydrographiques.....	116
Fig. 4.23. Hiérarchisation de réseau hydrographique dans les bassins versants de l'Oued Koriche, de Beni Messous et côtiers selon les lois de Strahler.....	117
Fig. 4.24. Modèle de drainage.....	117
Fig. 5.1. Carte des géopotentiels matérialisant le talweg d'altitude dans la nuit des 9-10 novembre 2001 (d'après les cartes du site www.wetterzentrale.de/topkarten). B : bas géopotentiels ; H : hauts géopotentiels.....	129
Fig. 5.2. Intensités des pluies relevées lors de l'épisode pluviométrique du 9 au 10 novembre 2001. Hyétogramme reconstitué à des unités de temps de 30 minutes, aux deux stations de Bir-Mourad-Rais et la station de Bouzaréah (d'après les données du rapport ISL-BRGM, 2006).....	130
Fig. 5.3. Localisation des relevés effectués par les services de l'ANRH.....	133
Fig. 5.4. Configuration du carrefour Triolet.....	135
Fig. 5.5. Image des ruissellements superficiels formés dans le bassin-versant de l'Oued Koriche (clichés : W. Menad, octobre 2010).....	136
Fig. 5.6. Les dégâts observés dans le quartier de Bab-el-Oued suite à l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 (A, B et C : disponibles sur internet mais les auteurs de ces clichés sont inconnus ; D et E : Behloulî, 2001).....	137
Fig. 6.1. Représentation d'un automate cellulaire et graphes associés ; 1) Von : deux cellules sont voisines si elles partagent au moins une frontière commune ; 2) Moore : deux cellules sont voisines si elles partagent au moins un point commun (Badariotti <i>et al.</i> , 2006).....	143
Fig. 6.2. Configuration du maillage triangulaire effectué sous <i>RuiCells</i> à partir d'un MNT.....	146
Fig. 6.3. Coefficient de transition pour la répartition des écoulements vers l'aval (Douvinet, 2008).....	147
Fig. 6.4. Evolution du débit moyen de surface (Q_{moy}) dans l'Oued Koriche en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous <i>RuiCells</i>	149
Fig. 6.5. Evolution du débit maximum de surface (Q_{max}) dans l'Oued Koriche en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous <i>RuiCells</i>	150

Fig. 6.6. Evolution du débit moyen de surface (Q_{moy}) à Beni Messous en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous <i>RuiCells</i>	150
Fig. 6.7. Evolution du débit maximum de surface (Q_{max}) à Beni Messous en fonction du niveau de résolution du MNT implémenté sous <i>RuiCells</i>	151
Fig. 6.8. L'évolution de la cartographie de la réponse surfacique en fonction du niveau de résolution du MNT.....	152
Fig. 6.9. Courbes de niveau extraites d'un MNT via <i>RuiCells</i>	153
Fig. 6.10. Graphe de ruissellement dans l'Oued Koriche obtenu sous <i>RuiCells</i>	154
Fig. 6.11. Délimitation du bassin-versant de l'Oued Koriche et le calcul de sa surface.	154
Fig. 6.12. Délimitation des sous-bassins versants de l'Oued Koriche.....	155
Fig. 6.13. Cartographie de la réponse théorique de surface globale en utilisant l'automate cellulaire <i>RuiCells</i>	157
Fig. 6.14. Distançogramme (A) et cartographie des cellules à équidistance de l'exutoire (B). Cartographie des cellules qui se trouvent à équidistance de l'exutoire.....	159
Fig. 6.15. Cartographie de la réponse surfacique des différentes sous-unités hydrographiques de l'Oued Koriche en utilisant l'automate <i>RuiCells</i>	161
Fig. 6.16. Evolution de l'indice <i>IE</i> en différents points du bassin-versant de l'Oued Koriche.....	162
Fig. 6.17. Simulation de la réponse hydrologique de l'Oued Koriche dans l'espace 3D.....	164
Fig. 6.18. Evolution du Q_{max} en passant d'une simulation 2D (paramètres forme, efficacité structurelle du réseau d'écoulement) à une simulation 3D (paramètre pente).....	165
Fig. 6.19. Evolution de l'indice <i>IEP</i> en différents points du bassin-versant de l'Oued Koriche.....	166
Fig. 6.20. La réponse hydrologique théorique du bassin-versant de l'Oued Koriche lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001.....	168
Fig. 6.21. Graphe de ruissellement dans Beni Messous obtenu sous <i>RuiCells</i>	169
Fig. 6.22. Délimitation des principaux sous-bassins versants de Beni Messous.....	170
Fig. 6.23. Cartographie de la réponse théorique globale de surface dans Beni Messous en utilisant l'automate cellulaire <i>RuiCells</i>	171
Fig. 6.24. Distançogramme (A) et cartographie des cellules équidistantes de l'exutoire (B) dans le bassin-versant de Beni Messous.....	172
Fig. 6.25. Cartographie de la réponse hydrologique théorique de surface des différentes sous-unités hydrographiques de Beni Messous avec l'automate <i>RuiCells</i>	173
Fig. 6.26. Evolution de l'indice <i>IE</i> en différents points du bassin-versant de Beni Messous.....	174
Fig. 6.27. Simulation de la réponse hydrologique de Beni Messous dans l'espace 3D.....	176
Fig. 6.28. Evolution du Q_{max} en passant d'une simulation 2D (paramètres forme, efficacité structurelle du réseau d'écoulement) à une simulation 3D (paramètre pente).....	177
Fig. 6.29. Evolution de l'indice <i>IEP</i> à différents points du bassin-versant de Beni Messous.....	177
Fig. 6.30. La réponse hydrologique théorique du bassin-versant de Beni Messous lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001.....	179
Fig. 6.31. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, en supposant que le bassin-versant de l'Oued Koriche est totalement imperméable.....	184
Fig. 6.32. Occupation du sol dans le bassin-versant de l'Oued Koriche en 1986.....	185

Fig. 6.33. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, avec un état d'occupation du sol correspondant à celui de 1986.....	186
Fig. 6.34. Occupation du sol dans le bassin-versant de l'Oued Koriche en 2005.	187
Fig. 6.35. Simulation de la réponse hydrologique suite à l'épisode pluvieux des 9-10 novembre 2001, avec un état d'occupation du sol correspondant à celui de 2005.....	188
Fig. 7.1. Etat actuel du réseau hydrographique.....	197
Fig. 7.2. Collecteur de l'Oued M'Kacel et l'emplacement des ouvrages de raccordement.....	198
Fig. 7.3. Etat de l'ouvrage Baranes.....	199
Fig. 7.4. Canal à ciel ouvert situé en amont de l'ouvrage hydraulique de réception.....	199
Fig. 7.5. Sidi Medjber : (A) Ouvrage de réception ; (B) Canal à ciel ouvert.....	200
Fig. 7.6. Ouvrage hydraulique de réception de Frais Vallon.....	201
Fig. 7.7. Ouvrage hydraulique de réception de Scotto Nadal.....	202
Fig. 7.8. Ouvrage hydraulique de réception Jaubert.....	202
Fig. 7.9. Canal à ciel ouvert connecté en amont à l'ouvrage de réception Jaubert.....	203
Fig. 7.10. Collecteur à ciel ouvert. A : en aval de l'ouvrage Jaubert ; B : le long de la route qui traverse le quartier ; C : Encombrements et embâcles formés par différents matériaux.....	204
Fig. 7.11. Ouvrage hydraulique Chemin du Fort.....	204
Fig. 7.12. Issu du collecteur de l'Oued M'Kacel.....	205
Fig. 7.13. Travaux de curages à l'intérieur du collecteur Oued M'Kacel.....	205
Fig. 7.14. Dédoublage du collecteur de l'Oued M'Kacel.....	207
Fig. 7.15. A et B : Puits de raccordement à Frais Vallon ; C : Point de rejet en mer.....	208
Fig. 7.16. Occupation du sol dans le sous-bassin de Baranès.....	209
Fig. 7.17. Clichés illustrant les pratiques anthropiques en amont du sous-bassin-versant de Baranes.....	210
Fig. 7.18. Décharges sauvages.....	211
Fig. 7.19. Paysage autour de l'ouvrage hydraulique.....	211
Fig. 7.20. Clichés pris sur la rive gauche du sous-bassin-versant de Sidi Medjber.....	212
Fig. 7.21. Occupation du sol dans le sous-bassin-versant de Sidi Medjber.....	212
Fig. 7.22. Occupation du sol dans le sous-bassin de Frais Vallon.....	214
Fig. 7.23. Sous-bassin-versant de Frais Vallon (A). Image de Google Earth prise le 10 août 2011 (B). Vue d'ensemble sur la partie aval du sous-bassin (C). Une école primaire localisée à la sortie du bassin (en aval immédiat de l'exutoire du bassin-versant).....	215
Fig. 7.24. Occupation du sol dans le sous-bassin de Scotto Nadal.....	216
Fig. 7.25. Sous-bassin-versant de Scotto Nadal (A). Entrée amont de l'ouvrage hydraulique (B). Paysage en aval de l'ouvrage.....	217
Fig. 7.26. Occupation du sol dans les sous-bassins versants du Chemin du Fort et de Jaubert.....	218
Fig. 7.27. Sous-bassin du Chemin du Fort (A). Chemin piéton (B). Système de gabionnage installé sur les berges (C). Décharge sauvage sur les versants.....	219
Fig. 7.28. Dégradation du système de gabionnage.....	220

Fig. 7.29. Placette installée à la place de l'ancien marché couvert de Bab-el-Oued (A). Image de Google Earth prise le 10 août 2011 (B). Clichés de la placette.	221
Fig. 7.30. Réseau routier dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.	222
Fig. 7.31. Carte d'occupation du sol du bassin-versant de l'Oued Koriche en 2011.	224
Fig. 7.32. Environnement urbain autour de la voie rapide Chevalet-Triolet (A). Partie amont. (B). Bassin moyen. (C). Partie aval.	225
Fig. 7.33. Système d'évacuation des ruissellements de surface à partir de la voie rapide Chevalet-Triolet (A). Les avaloirs (B). Le canal à ciel ouvert.	226
Fig. 7.34. Comportement des eaux pluviales au niveau de la voie rapide (A) et du réseau routier secondaire (B).	227
Fig. 8.1. Intensité du débordement du collecteur de l'Oued M'Kacel dans le cas d'une crue de récurrence septennale (modifiée selon BRGM – ILS).	234
Fig. 8.2. Danger lors du déplacement des personnes dans l'eau (source : DDE du Vaucluse).	236
Fig. 8.3. Carte de l'aléa hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.	239
Fig. 8.4. Carte de vulnérabilité versus risques hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.	240
Fig. 8.5. Carte du risque hydrométéorologique dans le bassin versant de l'Oued Koriche.	242
Fig. 8.6. Configuration des mesures radiométriques et météorologiques diffusées en temps réel par CDER. ..	245
Fig. 8.7. Principales modifications du tissu urbain de Bab-el-Oued après 2001.	249
Fig. 8.8. Système de récupération et d'évacuation des eaux pluviales ruisselant sur les toits dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.	257
Fig. 8.9. Dispositifs de protection : batardeaux, sacs de sables.	261
Fig. 8.10. Gestion dynamique des enjeux mobiles sur la voie rapide Chevalet Triolet.	263

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Les disciplines étudiant le risque, leur cadre conceptuel et leurs méthodes d'analyse (Texier, 2009).....	30
Tableau 1.2. Mise en interaction de certain nombre de risques naturels (d'après Barroca, 2006).	31
Tableau 1.3. Fréquences de crue (d'après Degardin, 1996 in Ledoux, 2006).	36
Tableau 1.4. Classification des facteurs de vulnérabilité (Texier, 2009).	38
Tableau 3.1. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1960. ...	76
Tableau 3.2. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 1986.	77
Tableau 3.3. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah en 2011. ...	78
Tableau 3.4. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 2 avril 1987 (traitement d'image satellitaire).	82
Tableau 3.5. Surfaces couvertes par chaque type d'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah le 11 septembre 2011 (traitement d'image satellitaire).	85
Tableau 4.1. Les cumuls pluviométriques journaliers correspondant aux différentes périodes de retour (données ONM).	107
Tableau 4.2. Superficie et périmètre des différentes sous-unités hydrologiques contributrices du Massif de Bouzaréah	108
Tableau 5.1. Principaux événements hydrométéorologique intenses qui ont frappé la région du Grand Alger par le passé.	126
Tableau 5.2. Cumul des précipitations du 10/11/01 pour quatre stations du Grand Alger (ANRH ; ONM, 2001).	131
Tableau 5.3. Répartition spatio-temporelle des événements intenses qui ont frappé Alger entre 1891 et 2004.	132
Tableau 5.4. Estimation des débits maximums instantanés qui ont eu lieu le 10 novembre au niveau de la Passerelle Scotto et Triolet.	133
Tableau 5.5. Evaluation des impacts de l'événement hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001 qui a frappé la partie ouest du Grand Alger (en millions de Dinars algériens ; i.e., milliers d'euros ; CNES, 2003).	138
Tableau 5.6. Principales interventions (immédiats, à long et à moyen termes) programmées au niveau du secteur hydraulique immédiatement après la catastrophe (DRHEE, 2001).....	138
Tableau 6.1. Les indices mophosynthétiques du bassin-versant de l'Oued Koriche.....	167
Tableau 6.2. Les indices mophosynthétiques du bassin-versant de Beni Messous.....	178
Tableau 6.3. Paramètres morphométriques et hydrologiques des bassins versants côtiers.	180
Tableau 6.4. Valeurs des refus d'infiltration du sol intégrées dans les simulations.	183

Tableau 8.1. Estimation des hauteurs et vitesses d'eau qui peuvent être générées dans le bassin-versant de l'Oued Koriche suite à un événement météorologique équivalant à celui des 9-10 novembre 2001, ou à un événement centennal.	238
Tableau 8.2. Hiérarchisation des différents niveaux du risque déduits par le croisement des classes de l'aléa et celles de la vulnérabilité.	241
Tableau 8.3. Gains obtenus avec les toits stockants (ILS-BRGM, 2006).	258

Table des matières

Sommaire	5
Remerciements	7
Résumé	9
Abstract	9
Introduction générale.....	11
Première partie. Le risque hydrologique généré par des épisodes météorologiques de caractère intense en métropole méditerranéenne.....	23
Introduction de la première partie	24
Chapitre 1. Précision terminologique concernant le risque en milieu urbain	25
Introduction	26
1.1. Conceptualisation du risque.....	26
1.1.1. L'histoire récente du risque	27
1.1.2. Concept du risque en géographie.....	28
1.1.3. Les définitions contemporaines du risque	28
1.1.4. Classification du risque	30
1.2. Risque de crue et d'inondation	31
1.2.1. Conceptualisation de l'aléa.....	32
1.2.1.1. L'aléa météorologique : magnitude, fréquence et typologie.....	33
1.2.1.2. Aléa hydrologique (pluvial et/ou fluvial).....	35
1.2.2. Conceptualisation de la vulnérabilité	37
3.1. Gestion du risque.....	39
1.3.1. Phases et outils de la gestion.....	40
1.3.2. Gestion du risque de crue et de ruissellement de surface en milieu urbain	41
1.3.2.1. Les mesures structurelles.....	41
1.3.2.2. Les mesures non structurelles.....	42
Conclusion.....	42
Chapitre 2. Paramètres et mécanismes de genèse des crues et du ruissellement superficiel.....	43
Introduction	44
2.1. Facteurs responsables du ruissellement et des écoulements rapides de crue	44
2.1.1. Facteurs du ruissellement.....	44
2.1.1.1. Dépassement du seuil d'infiltration.....	45
2.1.1.2. Dépassement du seuil de saturation : aires contributives saturées	47
2.1.2. Du ruissellement sur les versants aux écoulements de crue.....	49
2.1.2.1. Formation du ruissellement sur les versants sans observation de crue dans la rivière.....	50
2.1.2.2. Formation de crue sans observation de ruissellement sur les versants.....	51
2.1.2.3. Ruissellement connecté directement au cours d'eau	51
2.1.3. Ecoulements de crue et régime hydrologique	51

2.1.3.1. Classification de Pardé (1955).....	52
2.1.3.2. Classification de Lvovich (1973)	52
2.1.3.3. Classification suédoise	52
2.1.3.4. Classification de Degoutte (2006)	53
2.1.4. Complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant	53
2.1.4.1. Relais spatio-temporel des processus générateurs de ruissellement et de crue	54
2.1.4.2. Effet d'échelle	54
2.1.4.3. Effet de seuil.....	54
2.2. Particularités de l'hydrologie urbaine.....	54
2.2.1. Hydrologie urbaine en tant que discipline	55
2.2.1.1. Liaison historique entre la ville et l'eau	56
2.2.1.2. Assainissement et réseau hydrographique artificiel de la ville	56
2.2.2. Spécificité des bassins versants urbanisés.....	57
2.2.3. Structures élémentaires d'un bassin-versant urbanisé.....	57
2.2.4. Mécanismes d'écoulement de l'eau dans la ville.....	58
2.2.5. Facteurs anthropiques modifiant l'écoulement des eaux	59
2.2.5.1. Imperméabilisation	59
2.2.5.2. Modification de l'écoulement des eaux.....	59
Conclusion.....	61
Synthèse de la première partie.....	63
Deuxième partie. Les acquis sur le risque hydrométéorologique à Alger.....	65
Introduction de la deuxième partie.....	66
Chapitre 3. Contexte sociétal du risque hydrométéorologique à Alger	67
3.1. Histoire du développement urbain de la ville d'Alger	68
3.1.1. Du Xe s. à 1830	68
3.1.2. De 1830 (début de la colonisation française) à nos jours.....	68
3.1.2.1. 1830-1896	68
3.1.2.2. 1896-1945.....	69
3.1.2.3. 1945-1962 (année de l'Indépendance)	70
3.1.2.4. Depuis 1962.....	70
3.2. Législation algérienne concernant le risque hydrométéorologique	72
3.3. Dynamique de l'occupation du sol dans le Massif de Bouzaréah	73
3.3.1. Cartographie diachronique (1960-2011) de l'occupation du sol, basée sur la photointerprétation et le traitement numérique d'images satellitaires	74
3.3.1.1. Méthodes et résultats	74
3.3.1.2. Synthèse.....	78
3.3.2. Images satellitaires des 2 avril 1987 et 11 septembre 2011, sources d'information complémentaires	79
3.3.2.1. Image LANDSAT5 (2 avril 1987)	80

3.3.2.2. Image LANDSAT5 (11 septembre 2011)	82
3.3.3. Confrontation des résultats photo-interprétation vs. traitement numérique des images satellitaires	85
3.3.3.1. Occupation du sol en 1987	85
3.3.3.2. Occupation du sol en 2011	86
Conclusion.....	87
Chapitre 4. Contexte physique du risque hydrométéorologique à Alger : caractérisation et intérêt de l'étude.....	89
Introduction	90
4.1. Caractéristiques physiques régionales	90
4.1.1. Relief et structure	90
4.1.1.1. Principales unités de relief.....	90
4.1.1.2. Structure géologique.....	91
4.1.2. Climat.....	93
4.1.2.1. Caractéristiques générales	93
4.1.2.2. Evénements météorologiques méditerranéens de forte intensité.....	95
4.2. Massif de Bouzaréah	98
4.2.1. Contexte géologique local.....	98
4.2.2. Substrat, formations superficielles et dynamiques géomorphologiques	99
4.2.2.1. Processus d'érosion	100
4.2.2.2. Affleurements géologiques, formations superficielles et dépôts anthropiques	100
4.2.3. Caractéristiques climatiques.....	104
4.2.3.1. Variations des totaux pluviométriques annuels et mensuels moyens sur le Grand Alger (station météorologique de Bouzaréah).....	104
4.2.3.2. Evénements météorologiques intenses (cumul supérieur à 80 mm/24 h) observés sur le Grand Alger	106
4.2.4. Conditions hydrologiques	107
4.2.4.1. Géométrie du bassin-versant	108
4.2.4.2. Réseau hydrographique	114
4.2.4.3. Régime d'écoulement.....	118
Conclusion.....	119
Synthèse de la deuxième partie	121
Troisième partie. Contribution de la thèse à l'étude du risque hydro-météorologique à Alger	123
Introduction de la troisième partie	124
Chapitre 5. Détermination et choix des événements de référence	125
Introduction	126
5.1. L'événement de référence pris en compte dans l'étude, celui des 9-10 novembre 2001	127
5.1.1. Cinématique	128

5.1.2 Description de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001	128
5.1.2.1. Répartition spatio-temporelle des pluies	129
5.1.2.2. Précisions topo-climatique et historique	131
5.1.3. Réponse hydrologique.....	132
5.2. Impacts socio-économiques et politiques de l'événement	136
Conclusion.....	139
Chapitre 6. Simulation numérique : évaluation du risque hydrométéorologique dans le Massif de Bouzaréah via l'automate cellulaire <i>Ruicells</i>.....	141
Introduction	142
6.1. Principe de fonctionnement théorique de l'automate cellulaire <i>Ruicells</i>.....	142
6.1.1. Principes des automates cellulaires	143
6.1.2. Présentation de l'automate <i>RuiCells</i>	145
6.1.2.1. Structure et fonctionnement de l'automate <i>RuiCells</i>	145
6.2. Analyse de l'efficacité morphologique et de l'évolution spatio-temporelle de la réponse hydrologique dans le Massif de Bouzaréah	148
6.2.1. Limites d'utilisation	148
6.2.2. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche	153
6.2.2.1. Produits dérivés du MNT	153
6.2.2.2. Simulations numériques	155
6.2.2.3. Simulation du comportement hydrologique du bassin-versant de l'Oued Koriche lors de l'événement météorologique des 9-10 novembre 2001 (événement de référence).....	166
6.2.3. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans le bassin-versant de Beni Messous.....	168
6.2.3.1. Produits dérivés du MNT	169
6.2.3.2 Simulations numériques	169
6.2.4. Analyse de l'efficacité morphologique et évaluation de l'aléa hydrologique dans les bassins versants côtiers	180
6.3. Evaluation de la vulnérabilité : simulation dynamique des écoulements en intégrant le paramètre « occupation du sol »	181
6.3.1. Pertinence et limites des paramètres implémentés dans l'automate cellulaire	182
6.3.2. Simulation de la réponse hydrologique théorique.....	183
6.3.3. Simulation de la dynamique des écoulements en intégrant l'occupation du sol de 1986	184
6.6.4. Simulation de la réponse hydrologique en intégrant l'occupation du sol de 2005	186
Conclusion.....	189
Chapitre 7. Analyse systémique du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche : pourquoi un niveau de risque aussi élevé ?	193
Introduction	194
7.1. Facteurs de prédisposition.....	194
7.1.1. Géologie et formations superficielles.....	194

7.1.2. Physiographie et réseau hydrographique	194
7.1.3. Climat	195
7.2. Facteurs de déclenchement.....	195
7.3. Facteurs d'aggravation	196
7.3.1. Artificialisation du réseau hydrographique	196
7.3.2. Système de récupération et d'évacuation des eaux pluviales : collecteur de l'Oued M'Kacel.....	197
7.3.3. Mode d'occupation du sol dans les sous-bassins versants de l'Oued Koriche.	208
7.3.4. Structure et orientation du réseau routier dans le bassin-versant de l'Oued Koriche	222
7.3.5. Insertion de la voie rapide Chevalet-Triolet dans le paysage du bassin-versant de l'Oued Koriche	223
Conclusions	227
Chapitre 8. Cartographie et gestion du risque de crue et de ruissellement superficiel dans le bassin-versant de l'Oued Koriche.....	231
Introduction	232
8.1. Cartographie du risque hydrométéorologique dans le bassin-versant de l'Oued Koriche	232
8.1.1. Carte de l'aléa	232
8.1.2. Carte de vulnérabilité	239
8.1.3. Carte de risque.....	240
8.2. Des approches d'interventions raisonnées à l'échelle du bassin-versant.....	243
8.2.1 Gestion intégrée du risque.....	244
8.2.1.1. Prévision	244
8.2.1.2. Alerte	246
8.2.1.3. Anticipation	246
8.2.1.4. Gestion de crise.....	247
8.2.1.5. Mitigation	248
8.2.1.5. Retour d'expérience.....	250
8.2.1.6. Prévention	252
Conclusions	265
Synthèse de la troisième partie.....	269
Conclusion générale	271
Références Bibliothèques	279
Sites internet	291
Annexes	293
Liste des figures	315
Liste des tableaux	320
Table des matières	323

Titre de la thèse : Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropoles méditerranéennes : cas de la partie ouest du Grand Alger.

Résumé

Le Grand Alger est bâtie sur les contreforts des collines du Sahel. Par son positionnement et à l'image des autres métropoles méditerranéennes, il s'inscrit dans un contexte d'instabilité particulièrement cyclogénétique, qui se manifeste en surface terrestre avec des phénomènes d'inondation, de crue et de ruissellement superficiel. Néanmoins, le Grand Alger fait l'exception avec l'ampleur que prennent les dégâts occasionnés par le passage de ce type d'événement. L'événement des 9-10 novembre 2001, qui a affecté la partie ouest du Grand Alger, reflète parfaitement ce propos. Les crues déclenchées par cet événement ont causé des dégâts matériels et des pertes en vie humaine inégalés dans le bassin méditerranéen. Dans ce travail, en employant des outils de traitement classiques et de simulation numérique, on a essayé de comprendre au mieux le comportement de l'hydrosystème dans sa globalité (facteurs météorologiques, hydrogéomorphologiques et anthropiques). On a ensuite hiérarchisé les facteurs prédisposants-déclenchants-aggravants de crue et de ruissellement superficiel dans cette région. Les résultats de l'ensemble des analyses réalisées ont servi à quantifier et cartographier le risque. Au final, on propose de nombreuses mesures d'intervention (combinaison de mesures structurales et non structurales) dans le but de réduire le niveau important du risque actuel.

Mots clés : Grand Alger, Massif de Bouzaréah, risque, crue, ruissellement superficiel, emprise urbaine, simulations numériques, approche systémique.

Title of the Ph. D Thesis: *Risks of flood and surface runoff in Mediterranean metropolises : case of the western of the Grand Algiers.*

Abstract

The Grand Algiers was built on the Sahel foothills. Like other Mediterranean metropolises, it fits in a context of strong cyclogenetic instability, which manifests by floods and the surface runoffs. However, the Grand Algiers makes the exception with the scale which takes the damages after the passage of one of these meteorological events. The event of November 9-10th, 2001, which affected the western part of Grand Algiers, reflects perfectly this situation. Floods activated by this event caused damage to the property and loss of life, which are unequalled in the Mediterranean Basin. In this work, by using classic tools and numerical simulation, we tried to understand the behaviour of the whole hydrosystem (meteorological, geomorphological, and anthropogenic factors). Then we have classified the predisposing, triggering, and aggravating factors of flooding and surface runoff. The results of all the analyses serve for quantifying and mapping the risk. To conclude, we made various management proposals (combination of structural and non structural measures), in order to reduce the important level of present risk.

Key words: *Grand Algiers, Massif of Bouzaréah, risk, flood, surface runoff, urban pressure, modelling, systemic approach.*