

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)

Evaluating the influence of urbanised areas face to a remarkable meteorological hazard: the flood event of 9-10 November 2001 at Bab-el-Oued (Alger, Algeria)

Wahiba Menad*, Johnny Douvinet**, Gérard Beltrando***, Gilles Arnaud-Fassetta*

Résumé

Métropole méditerranéenne bâtie sur les contreforts des collines du Sahel, Alger a été affectée à plusieurs reprises par des aléas hydro-météorologiques qui ont entraîné des catastrophes majeures. De nature remarquable mais non exceptionnelle, l'aléa météorologique des 9-10 novembre 2001 a causé des dégâts humains (781 morts et 115 disparus) et matériels (3 271 immeubles détruits ou endommagés) inégalés ; la grande majorité de ces dégâts s'est produite dans le quartier de Bab-el-Oued (partie ouest du Grand Alger). Cet article s'intéresse au poids de l'emprise urbaine comme facteur aggravant de l'inondation. Les simulations proposées à l'aide de l'automate cellulaire *RuiCells* montrent que les surfaces ruisselantes en 2001 ont aggravé les volumes ruisselés (+ 10 %) et les pics de crue (+ 6 %) par rapport à l'occupation du sol antérieure (1986). La distribution des intensités de pluie (deux pics de 37 mm en 30 min sur une durée d'1 h 30) a entraîné une conjonction spatiale de réponses dans les sous-bassins amont (premier pic) et aval (second pic) de l'oued Koriche. L'emprise urbaine a finalement redonné du poids aux interactions spatiales entre les temps de réponse des bassins, les zones productrices du ruissellement et les axes de concentration des écoulements.

Mots clés : Alger, risque hydrométéorologique, emprise urbaine, simulations, *RuiCells*.

Abstract

As the Mediterranean metropolis of Alger was built on the Sahel foothills, this urban area is exposed to an important hydrometeorological hazard which frequently induces human and material damage. Rainfalls of the 9-10 November 2001 present severe but not exceptional intensities, despite both human (781 deaths and 115 missing) and material (3721 destroyed or damaged housed) accounts were never been observed in such site. The most important damage occurred at Bab-el-Oued situated in the western part of the Grand Alger. In this study, we focus on the relations between urbanised areas and hydrological dynamics. These control factors play a key role but none of the previous studies tried to quantify it. Simulations obtained using the RuiCells cellular automata allow to estimate that areas, which had produced important runoff in 2001, had increased the cumulative amounts (+ 10%) as well as the maximum peak discharges (+ 6%) in comparison with 1986. Linked to the temporal distribution of rains, urban pressure gives importance to the spatial interactions between runoff production and diffusion, and the convergence zones of flood flows.

Key words: Alger, hydrometeorological risk, urban pressure, modelling, *RuiCells*.

Abridged English version

From 9th to 10th November 2001, the western part of the 'Grand Alger' suffered floods of high magnitude, which were activated by a remarkable meteorological configuration. The recorded damages were exceptional with nearly 781 deaths,

115 missings and urban damage estimated to 220 million Euros. This considerable damage cannot be only explained by the intensity of the meteorological event. Human activities (inadequate land use, uncontrolled urbanisation) are largely responsible for this disaster. The flood event of November 2001 was the subject of many meteorological, hydrological and eco-

* UMR 8591 (LGP-Meudon) et UMR 8586 (PRODIG) du CNRS – Université Diderot, PRES Sorbonne Paris Cité – 105, rue de Tolbiac – 75013 Paris – France (gilles.arnaud-fassetta@univ-paris-diderot.fr, menadwahiba@yahoo.fr).

** UMR 7300 (ESPACE) du CNRS, Equipe d'Avignon – Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse – 74, rue Louis Pasteur, Case 19 – 84029 Avignon Cedex 1 – France (johnny.douvinet@univ-avignon.fr).

*** UMR 8586 (PRODIG) du CNRS – Université Diderot, PRES Sorbonne Paris Cité – 105, rue de Tolbiac – 75013 Paris – France (beltrando@univ-paris-diderot.fr).

nomic research works. The accumulated rainfall recorded during the event is 263 mm, exceeding of 132% the monthly average usually registered in November, and all records registered along the last century by the regional weather stations. The only records that we have for this event are the ones supplied by the meteorological stations of Bouzareah, where measurements are made every 12 h, and Bir Morad Rais, of which we have a measure every 30 min. Unfortunately this last station is 7 km east of our study area, what raises difficulties for spatialising the rain phenomenon. Thus, all published histograms are only the result of a reconstruction of the meteorological event. One day before the 9-10 November flood event, a deep altitude thalweg, causing a fast meridional circulation, crossed the borders of France. On November 10th, this low geopotential was isolated in the South of the Balearic Islands and has spawned a very active cyclogenesis to the north of Algeria. On the coastal areas, the on-surface pressure was around 1015 hPa but it quickly decreased (1006 hPa on 11/9 at midnight). Several convective clusters were therefore formed on the Mediterranean Coasts, from Morocco to Algeria. On the surface, relatively warm temperatures (18-22°C on the coast of Algiers in the afternoon of November 11th), remained quite high throughout the night because of the presence of thick layers of clouds, limiting energy losses (10-13°C at midnight on the coast of Algiers). Associated with a cold front in the lower coats of the troposphere, the convective cell was split in two parts. We can have the temporality of recorded rainfalls: the first rain in the evening of November 10th was related to the transition from a first front, whereas the second active part of the disturbance has affected the city of Algiers on the morning of 11/10 until approximately noon. The extent of damage observed following the rains of November 2001 can be partly explained by a strong urban dominance over the entire city of the Oued Keriche, of which more than 78% of its total area urbanised. This urbanisation amplified the disaster via: the decline of forest areas, impermeabilised surfaces, and the development of linear prompt to increase the surface runoff (the main riverbed of the Oued Keriche catchment was channelised beneath the Chevallot-Triolet expressway). Finally, the impact of urbanisation is crucial but still, two questions remain: why were the flows so important in the downstream part of the Oued Keriche catchment, and particularly, why did the flood event of November 2001 cause such important damage? In order to answer this, we took into account the interactions and scale stakes between runoff production areas, reinfiltration surfaces and runoff concentration axis that drain the totality of the Oued Keriche.

To identify the role played by interactions between the various variables controlling the functioning of the hydrosystem, we used the RuiCells cellular automaton, which will highlight the effects related to the morphological organisation of the catchment (i.e., the combination of the roles played by the form, the hierarchy of river systems and the slopes system) with the effects related to the spatial arrangement of surface runoff or infiltration. Rainfall data can also be implemented according to the nature available measures (radar images, pluviographs). This study should quantify the influences of

the urbanisation by taking into account its evolution between 1986 and 2005. To lead the simulation, a digital terrain model with a step of 25 m was organised. The implemented rains correspond to the data from the reconstruction of hyetogram, as defined by ISL-BRGM (2006). The rainfall is considered as homogeneous in the catchment: this may not be entirely reliable but no other solution was possible given the lack of more precise data. The infiltration-refusal values were preferred to runoff coefficients for several reasons; the main reason is linked to the nature of the dynamics of surface runoff observed on the day of the event. The runoff is predominantly of hortonian type. Considering the limits previously mentioned, the simulation results were used with caution as its goal, less into obtaining the debit and volumes actually observed, was rather to prove that urbanisation continues to be a factor in worsening the sensitivity of catchment to the rainfall. The simulations conducted by RuiCells only take care of the upstream part to the district of Bab-el-Oued. Other models like RUBAR (Paquier, 1998) or TANATO (Bocher and Martin, 2009) would be more adapted to simulate the flow dynamics in this complex urban context. The simulated hydrograph in the upstream part of Bab-el-Oued shows that the basin initially responded to the first rains (initial flood peak of 58 m³/s) during the night of 11/9 to 11/10. The highest flood peak (88.7 m³/s) was recorded following the rainfall on the morning of 11/10, a peak not only related to a concomitant arrival of flows from the upstream part in response to measured rainfalls from 8:00 am to 8:30 am, but also to a marked reactivity of sub-catchment located in the downstream left bank, in response to the second peak from 9:30 am to 10 am. This phenomenon also explains the magnitude of the estimated runoff volume (1.96 Mm³). A difference was observed between the value of simulated peak and that calculated from the high water marks (143 m³/s). This difference can be explained by the fact that the simulations do not take into account the influence of hydraulic linear, subsurface runoff in RuiCells, or the competence of the flows since only a volume of liquid water transits during the simulation. The role played by the morphological organisation of the catchment (i.e., the combined effects of catchment shape, drainage network hierarchy and system of slopes) was strengthened by the urban influence. The rate of flows diffusion was accentuated by impermeabilised surfaces, particularly the Chevallot-Triolet fast way. To quantify the role played by land cover, we took into account its evolution between 1986 and 2005. Another simulation was proposed by integrating the variables previously presented, with the exception of the land cover in 2005, which was replaced by that mapped in 1986. The simulated flow map is similar to the first one, with 6% increase in peak flow, and 10% in accumulated runoff volume, compared to those of 1986 recorded in 1986. The shapes of the estimated hydrographs are close, excepted concerning the production of runoff, which is more marked in the densified surfaces situated in the upstream part of the sub-catchments. Differences in land cover between 1986 and 2005 did not sufficient to consider urbanisation as the only factor explaining the damage observed in 2001. With the use of cover-land

models that are more favourable to infiltration, the simulation of sub-catchment responses would have been marked by lower peak flows and runoff volumes, but the hydrographs curves would have been identical. The rainfall distribution evidenced the importance of the morphological component, whose effectiveness was amplified by the distribution of dense urban areas within the Oued Koriche. Separately, these variables have a minor role but if we combine them dynamically, the interactions between the intensity of rainfall, runoff production areas and axes of flows concentration actually become quite effective.

Finally, the exceptional floods of 2001 resulted from a combination of aggravating factors, and this paper highlighted the complexity of the mechanisms concerning the genesis and the development of the flood in the Oued-Koriche catchment. We identified the different factors that interacted, and tried to understand their interaction in the runoff generation. The results still need to be exploited in order to go further with the systematic analysis and set up an operational decision-making tool about the issue of hydrometeorology risk at the catchment scale.

Introduction

Suite à des précipitations importantes (cumul estimé à 263 mm) relevées les 9 et 10 novembre 2001, la partie occidentale du Grand Alger a connu l'une des inondations les plus importantes survenues dans le bassin méditerranéen au cours de la dernière décennie (Belhouli, 2001). Si l'aléa hydrométéorologique est remarquable, il ne suffit pourtant pas à expliquer, à lui seul, la gravité des pertes en vie humaine (781 morts et 115 disparus), l'ampleur des dommages matériels (3 271 immeubles détruits ou endommagés) ni même le coût de la catastrophe estimé à 5 milliards de dinars (GECOTEC, 2002 ; Machane *et al.*, 2008). Derrière ces chiffres se cache une haute responsabilité humaine, imputable à l'occupation des sols, une urbanisation mal maîtrisée et une surexposition sociétale face à un aléa minimisé. L'emprise urbaine a connu une croissance démesurée : au sud-ouest du Grand Alger, la population agglomérée (*i.e.*, groupe de 100 constructions non séparées par plus de 200 m) est passée de 61,2 % en 1970 à plus de 86 % en 2001 à l'échelle du bassin versant de l'oued Koriche (Redjimi, 2000) dont la surface n'est que de 10,2 km². Au cours de ces dernières décennies, l'accroissement de l'urbanisation a entraîné une complète recomposition territoriale. Cette croissance est liée à quatre phénomènes du reste communs à bon nombre de pays du Maghreb (Côte, 1996 ; Redjimi, 2000) : 1) l'exode rural a favorisé la croissance des centres de proximité et des petites agglomérations dès le début des années 1990 ; 2) la diminution des flux migratoires internationaux s'est faite au profit des migrations transsahariennes internes ; 3) le polycentrisme autour des grandes agglomérations de plus d'un million d'habitants a été associé à une faible croissance des villes de taille moyenne ; 4) la transformation de la structure familiale a fortement accru les demandes de logement.

L'événement des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued a déjà fait l'objet de plusieurs études : certaines se sont basées

sur des approches généralistes permettant d'aborder rapidement la problématique et d'expliquer les enjeux de la catastrophe (Benseddik et Djabri, 2003 ; Djellouli et Saci, 2003 ; Smail, 2005 ; Menad *et al.*, 2011) ; d'autres ont traité, de manière détaillée, un aspect particulier de la catastrophe. À titre d'exemple, l'hydrologie du bassin-versant de l'oued Koriche a fait l'objet d'une analyse assez poussée, menée au sein des services techniques de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH ; Behlouli, 2001). L'absence de stations de jaugeage contraint cependant les études à se référer à des méthodes de calcul hydrauliques utilisées dans les pays européens. Les estimations faites par les services de l'ANRH indiquent un débit de pointe à Triolet (*i.e.*, à l'entrée amont du quartier de Bab-el-Oued) de 730 m³/s - ces estimations, basées sur les laisses de crue, sont supérieures à celles que nous proposons et justifions dans cet article - et des volumes charriés de l'ordre de 2,6 Mm³ (eaux et matériaux solides). La charge solide brute est estimée à 30 % sur l'ensemble de l'événement (0,8 Mm³). Grâce à un modèle sismique reposant sur la mesure du bruit de fond et la signature des émissions réfléchies, variables selon la nature des matériaux, D. Machane *et al.* (2008) estiment l'épaisseur de la coulée boueuse entre 0,85 m à 2,45 m selon les secteurs.

Si ces travaux fournissent des résultats précis, ponctuels et utiles pour apprécier la magnitude de l'aléa, ils sont pourtant loin d'être, à eux seuls, des outils de compréhension et d'aide à la gestion du risque : l'analyse globale et intégrée fait défaut. Dès lors, cet article tente de mieux mettre en exergue le rôle joué par l'occupation des sols dans l'aggravation du phénomène hydrométéorologique tout en analysant les effets des interactions entre les variables qui définissent le système complexe « bassin versant » (*sensu* Delahaye, 2002). Trois étapes ont été nécessaires pour mener à bien notre réflexion dans cet article : 1) les caractéristiques physiographiques du site ont été étudiées puis corrélées à l'aléa hydrométéorologique ; 2) les facteurs de vulnérabilité ont été analysés en s'attachant à quantifier l'emprise spatiale des zones urbaines qui ont connu une croissance très forte depuis le début des années 1980 ; 3) des simulations numériques ont été effectuées à partir de l'automate cellulaire *RuiCells* pour savoir si, dans une situation antérieure (1986), les dommages auraient été tout aussi importants (ou moindres ?) qu'en 2001. Cette approche diachronique a permis de mieux comprendre le rôle de l'occupation du sol face à un aléa hydrométéorologique simulé.

Aléa et vulnérabilité

Caractéristiques de l'aléa hydrométéorologique des 9-10 novembre 2001

Analyse de la situation synoptique

Le 9/11, veille de l'événement, un profond talweg d'altitude engendrant une circulation méridienne rapide a traversé la France. Le 10/11, ce bas géopotentiel s'est retrouvé isolé au sud des Baléares et a engendré une cyclogenèse très active jusqu'au nord de l'Algérie. Sur ces régions littorales, la

pression en surface était autour de 1 015 hPa mais elle a rapidement diminué (1 006 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, relativement chaudes (18-22°C sur le littoral algérois dans l'après-midi du 9/11), resteront relativement élevées durant toute la nuit en raison de la présence d'une épaisse couche nuageuse limitant les déperditions énergétiques (10-13°C à minuit sur le littoral algérois). Associée au front froid des basses couches de la troposphère, la cellule convective s'est divisée en deux parties. On retrouve ainsi la temporalité des précipitations relevées : les premières pluies dans la soirée du 9/11 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 10/11 jusqu'aux alentours de midi.

Description topoclimatique de l'épisode pluvieux

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 novembre 2001, c'est à la station de Bouzaréah, située au sud du bassin versant de l'oued Koriche (fig. 1), que le cumul le

plus important a été enregistré, avec 263 mm entre 19 h 30 (heures locales) le 9/11 et 10 h 30 le 10/11, pour 208 mm à Bir-Mourad-Rais sur la même période. L'épisode pluvieux se décompose en deux séquences (fig. 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 8 h 30 puis de 9 h 30 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 cumul n'avait jamais été enregistré auparavant (fig. 3), même sur des stations situées à proximité d'Alger où des relevés sont pourtant effectués depuis plus d'une centaine d'années (Belhouli, 2001). 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 ; fig. 1) alors qu'elle se situe à 10 km au nord-est de la station de Bouzaréah (Behlouli, 2001). Les pluviographes installés près des barrages d'Hamiz et de Keddara, situés à 45 km au sud d'Alger, n'ont recueilli que 23 mm et 26 mm sur le même inter-

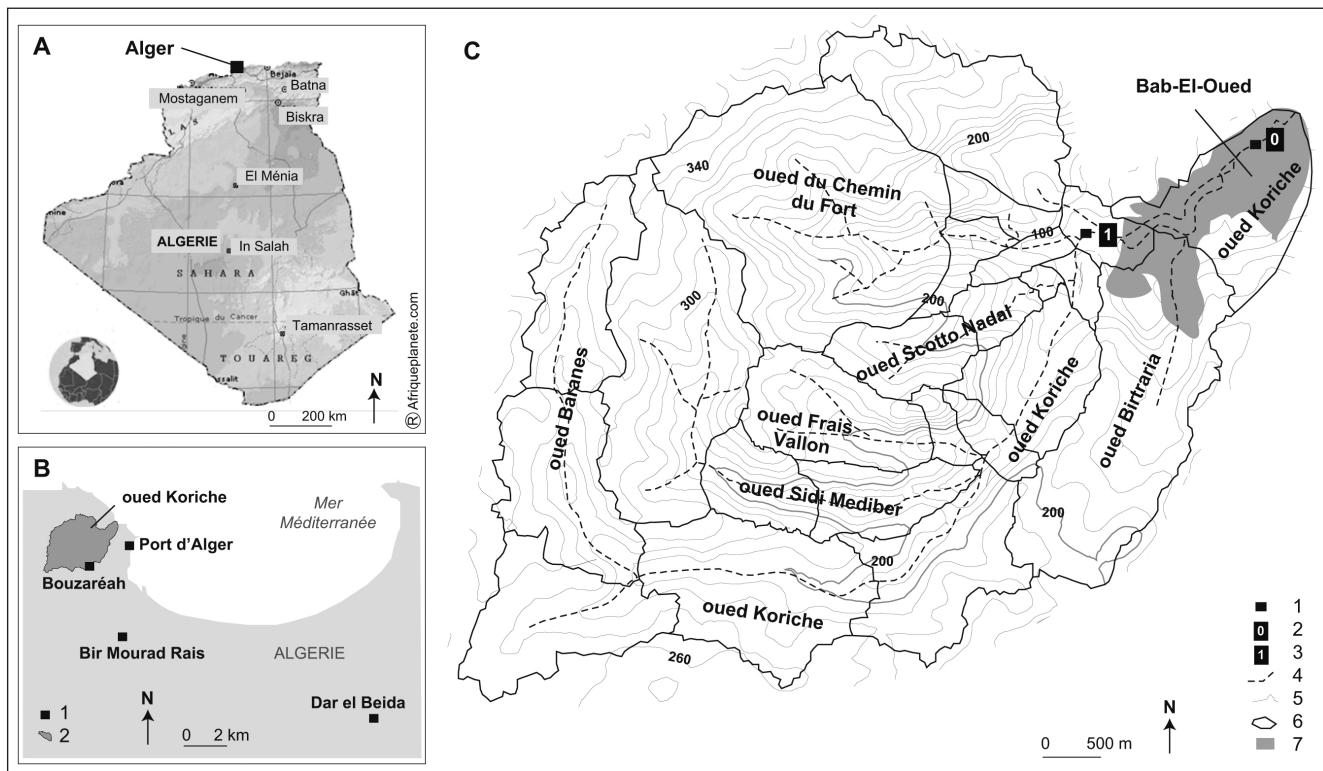


Fig. 1 – Présentation du bassin-versant de l'oued Koriche. A : Carte de localisation à l'échelle de l'Algérie. B : Principaux postes pluviométriques analysés (1 : pluviographe ; 2 : oued Koriche). C : Contexte orographique (1 : points de mesure ; 2 : exutoire du bassin versant ; 3 : point de mesure du pic de crue à 143 m³/s ; 4 : principaux talwegs indiquant les axes de concentration des écoulements en cas de crue ; 5 : courbes de niveau avec une équidistance de 20 m ; 6 : délimitation des différents sous-bassins ; 7 : partie occidentale du quartier de Bab-El-Oued).

Fig. 1 – Presentation of the Oued-Koriche catchment. A: Location map on the scale of Algeria. B: Main analysed pluviometric stations (1: rain gauge; 2: oued Koriche). C: Presentation of the orographic context (1: points of measurement; 2: catchment outlet; 3: discharge peak estimated to 143 m³/s; 4: main thalwegs associated to concentration of flood fluxes; 5: contour elevation every 20 m; 6: delimitation of sub-catchments; 7: location of the western part of the urbanised area of Bab-El-Oued).

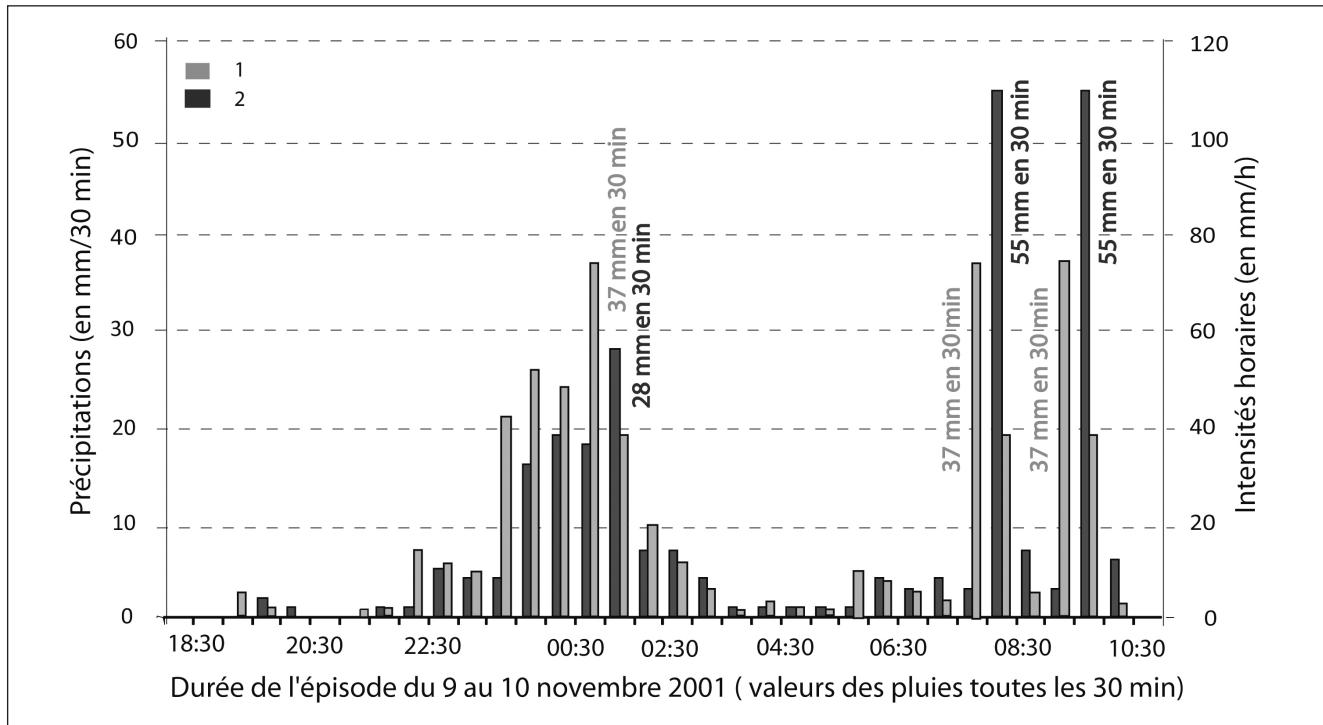


Fig. 2 – Intensités des pluies relevées lors de l'épisode pluviométrique du 9 au 10 novembre 2001. 1 : reconstitution du hyéogramme de la station de Bir Mourad Rais (chaque cumul a été multiplié par 1,62 à la station de Bouzaréah) ; 2 : hyéogramme reconstruit pour la station de Bouzaréah (d'après les données du rapport ISL-BRGM, 2006).

Fig. 2 – Rainfall intensities recorded during the event of 9-10 November 2001. 1: reconstitution of the hyetogram of Bir Mourad Rais station (each rainfall amount was multiplied by 1.62 at the station of Bouzaréah). 2: hyetogram reconstructed for the station of Bouzaréah (data source ISL-BRGM, 2006).

valle de temps et, à Réghaïa, le cumul n'a été que de 53 mm. Les pluies de la matinée du 10/11 (de 4 h à 10 h 30) sont les plus hétérogènes : 103 mm à la station du Port d'Alger et 132 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 localement l'arrêt de la pluie. Afin de mieux com-

prendre la distribution spatio-temporelle de l'événement des 9 et 10 novembre 2001 à l'échelle du Grand Alger, l'épisode a été périodisé par intervalles de 12 h. Les données des quatre stations météorologiques les plus proches d'Alger ont permis de suivre la propagation des pluies (tab. 1). 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

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)
09/11 (6 h-18 h)	0	26	26,9	21,7
09/11-10/11 (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 (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

Tab. 1 – Cumul des précipitations (en mm) des 9-10 novembre 2001 pour quatre stations du Grand Alger (d'après les données de l'ANRH et de l'ONM, 2001). Les coordonnées géographiques sont exprimées en degrés décimaux.

Tab. 1 – Cumulated rainfall (in mm) of 9-10 November 2001 for four stations in the 'Grand Alger' (data from ANRH and ONM, 2001). The geographical coordinates are expressed in decimal degrees.

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. En l'absence de données à échelle plus fine (*e.g.*, images radar), cette analyse ne peut aller plus loin et la localisation exacte de l'épicentre de la perturbation reste, à ce stade, inconnue. Dans le cadre de leur étude, ISL-BRGM (2006) ont reconstitué deux hyéogrammes 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. Le cumul enregistré à la station de Bouzaréah dépasse de 40 % celui enregistré à la station de Bir-Mourad-Rais ; compte tenu des observations terrain, il semblait alors nécessaire de multiplier les cumuls mesurés au pas de 30 min à cette station par un coefficient rectificatif de 1,62. Le second hyéogramme recalibre les heures de début et de fin d'événement pour cette deuxième station (fig. 2). Ce second graphique sera utilisé par la suite car 1) il constitue la donnée d'entrée pour les calculs hydrauliques effectués par ISL-BRGM (2006) et 2) la reproduction des intensités de pluie semble la plus conforme à nos observations de terrain.

Place de cet épisode dans l'histoire des chroniques pluviométriques

En étudiant les maxima journaliers (24 h non flottants) recensés entre 1908 et 2007 à la station de Bouzaréah (données ANRH), l'analyse démontre que la période automnale (de septembre à novembre) est la plus propice à des cumuls dépassant 80 mm en 24 h (fig. 3). 15 événements sur 23 (60 %) sont enregistrés durant cette période. Les autres épisodes sont répartis de manière plus aléatoire entre janvier et septembre. Les don-

nées de la station de Bouzaréah confirment aussi que les décennies 1930-1940 puis 1950-1960 ont été plus sensibles à des épisodes extrêmes. Depuis 1960, les pluies de plus de 80 mm ont été plus rares, ce qui peut expliquer l'oubli dans la mémoire collective et l'absence de considération de l'aléa extrême dans les politiques d'aménagement. Si les pluies aux intensités remarquables semblent donc fréquentes dans cette région, le cumul de 2001 n'a jamais été enregistré auparavant : les précédents records atteignent 161 mm en 1935 à la station de Bouzaréah et 154 mm en 1999 à Alger/Dar-el-Beida. Par sa situation en bordure de la Mer Méditerranée, Alger s'inscrit dans un contexte d'instabilité particulièrement cyclogénétique. Si tous les bassins versants sont concernés et ce, quelle que soit la saison, les mécanismes à l'origine des perturbations n'ont pas forcément les mêmes ampleurs (Maheras *et al.*, 2001). En été, l'activité cyclonique est caractérisée par le développement de dépressions thermiques d'amplitude faible (Argence, 2008) alors que l'automne et l'hiver sont des périodes où les cyclogenèses, à développement rapide, engendrent des pluies de plus forte intensité. Ces événements sont principalement des cyclogenèses d'origine barocline, caractérisés par un champ de pressions perturbé, un gradient de température élevé et un fort vent thermique.

L'orographie a-t-elle aggravé l'aléa météorologique ?

Les reliefs bordant le bassin méditerranéen constituent une barrière physique face aux masses d'air instables, chaudes et humides. L'orographie autour 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

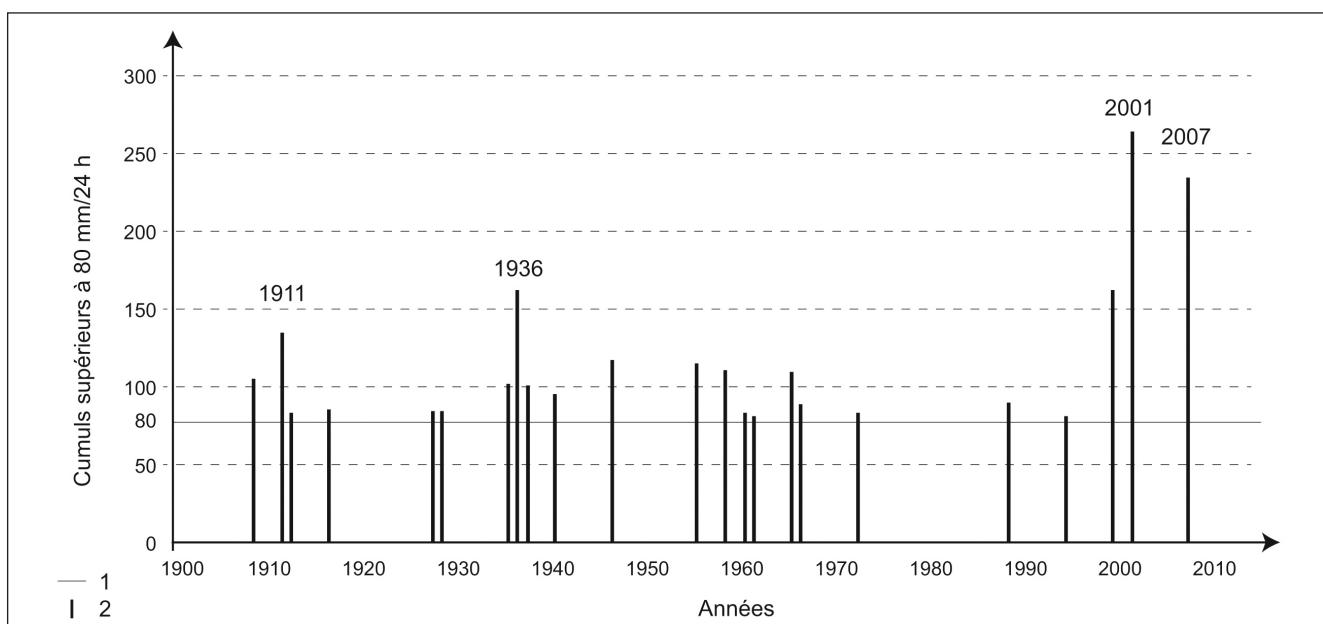


Fig. 3 – Distribution des cumuls pluviométriques supérieurs à 80 mm/24 h à la station de Bouzaréah entre 1900 et 2010. 1 : seuil pluviométrique fixé à 80 mm/24 h. 2 : événements recensés par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Fig. 3 – Distribution of the pluviometric totals exceeding 80 mm/24 h at Bouzaréah from 1900 to 2010. 1: pluviometric threshold set at 80 mm rainfall in 24 h; 2: events listed by the National Agency of Water Resources.

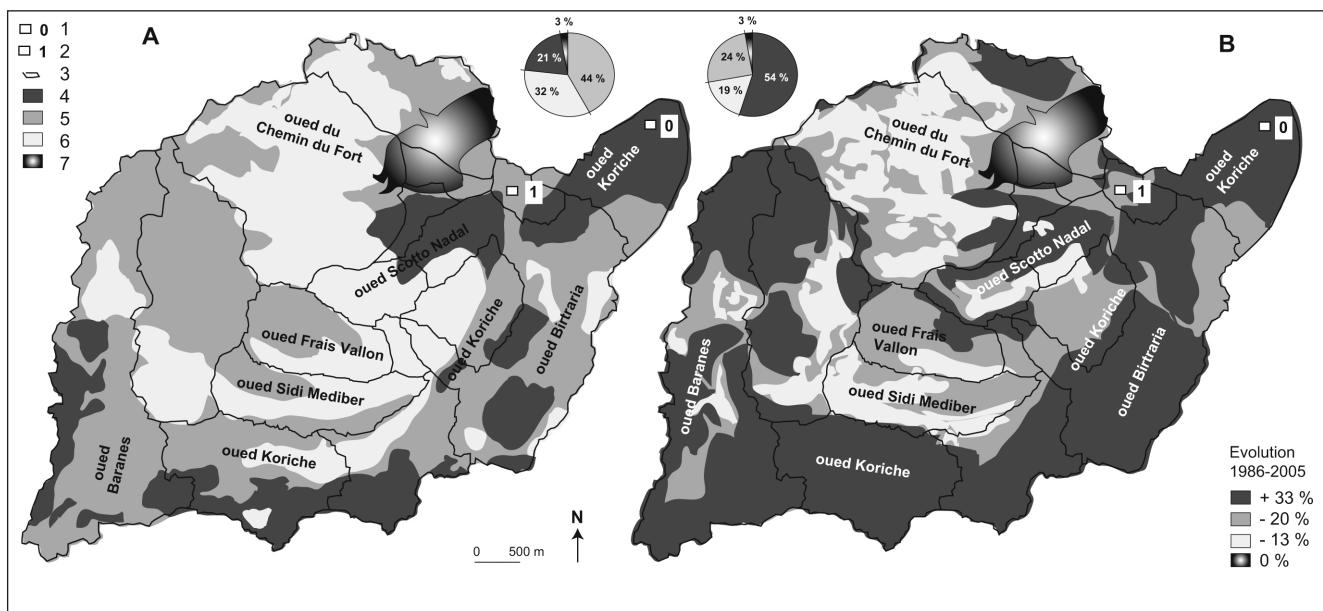


Fig. 4 – Comparaison de la nature de l'occupation du sol (moyenne) dans le bassin-versant de l'oued Koriche. A : Situation en 1986 (d'après la carte topographique ; 1 : point de mesure dans la quartier de Bab-El-Oued ; 2 : exutoire utilisé pour les simulations ; 3 : limite des sous-bassins versants ; 4 : urbanisation dense ; 5 : urbanisation plus dispersée ; 6 : surfaces couvertes par une végétation arbustive ou boisée ; 7 : carrière). B : Situation en 2005 (d'après les plans cadastraux fournis par URBANIS) ; la légende utilisée est commune à celle de 1986 et les valeurs indiquent l'évolution (en %) sur la période 1986-2005. Pour les deux cartes, le diagramme circulaire rappelle les valeurs moyennes observées à l'échelle du bassin-versant.

Fig. 4 – Comparison of the land-cover nature (on average) in the Oued-Koriche catchment. A: Situation in 1986 (derived to the topographic map; 1: outlet in the western part of Bab-El-Oued; 2: point of measurement used for the simulations; 3: limit of the sub-catchments; 4: dense urbanisation; 5: dispersed urbanisation; 6: surfaces covered by shrubby or woody vegetation; 7: carrier). B: Situation in 2005 (according to cadastral maps provided by URBANIS): the caption used is common to 1986 and 2005 maps. The whole values mentioned in the circular diagram give a synthetic view of the land use cover in 1986 and in 2005.

effet orographique 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 cet article, 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. 1). Ces trois stations ont enregistré respectivement 11, 12 et 15 événements, avec des intensités moyennes très comparables (113, 101 et 111 mm/24 h). 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. Si les stations de mesure ne sont pas représentatives des pluies tombant sur les bassins versants situés à proximité, notamment lors de phénomènes orageux à caractère convectif, elles seront néanmoins utilisées par la suite, à défaut de disposer de données plus précises.

L'emprise urbaine au cœur du processus de vulnérabilité

Même si 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), la « vulnérabilité » se limite dans cet article au sens physique du terme, faisant uniquement référence à l'exposition des zones bâties face à l'aléa. L'analyse ne portera donc pas sur la sinistralité des crues (Léone, 2003 ; Douvinet, 2010), ni sur les impacts économiques directs (Thouret et D'Ercole, 1996) et les aspects sociaux ou psychologiques, car le phénomène inondation doit, pour nous, d'abord être bien compris sous l'angle de ses processus hydrogéomorphologiques.

Une extension des zones urbanisées au détriment des surfaces infiltrantes

L'ampleur des dégâts observés suite aux pluies de 2001 peut être expliquée en partie moins par l'intensité de l'aléa elle-même que par une forte emprise urbaine sur la totalité de l'oued Koriche. L'exposition du bâti et l'imperméabilisation corollaire ont progressé de manière très rapide au fil des trente dernières années, notamment dans la partie amont de l'oued Koriche et dans le fond de certains vallons, tels ceux des oueds Birtraria ou Frais Vallon (fig. 4B). En 2005, le tissu urbain dense, qui rassemble les centres anciens, les cités populaires, les quartiers pavillonnaires et l'habitat groupé ou semi-collectif, représente 54 % de la surface du bassin-versant, contre 21 % seulement en 1986. En associant l'habitat dispersé et les habitations précaires, le tissu urbain couvre alors 78 % du bassin-versant en 2005 (contre 65 % en 1986),

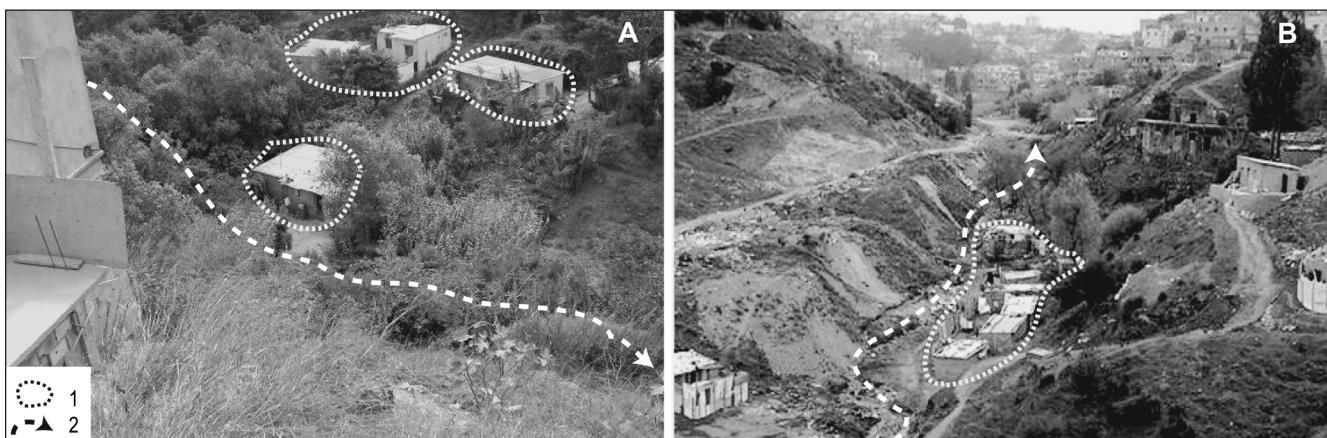


Fig. 5 – Habitations construites dans le lit mineur du Frais Vallon. A : Localisation de l'habitat précaire sur les versants (cliché : W. Ménad, 2009) ; 1 : habitations « illégales » ; 2 : talweg du drain principal) ; B : Localisation d'autres formes d'habitats dans le fond du vallon et sur les terrasses alluviales (cliché : ISL-BRGM, 2006). Les figurés reprennent la légende de la fig. 5A.

Fig. 5 – Houses built in the Frais Vallon riverbed. A: Location of precarious settlement on the hillslopes (photo: W. Ménad, 2009); 1. 'illegal' houses; 2: thalweg of the main stream) ; B. Location of human settlement directly in the valley bottom and on the alluvial terraces (photo: ISL-BRGM, 2006). Symbols are the same than those used in fig. 5A.

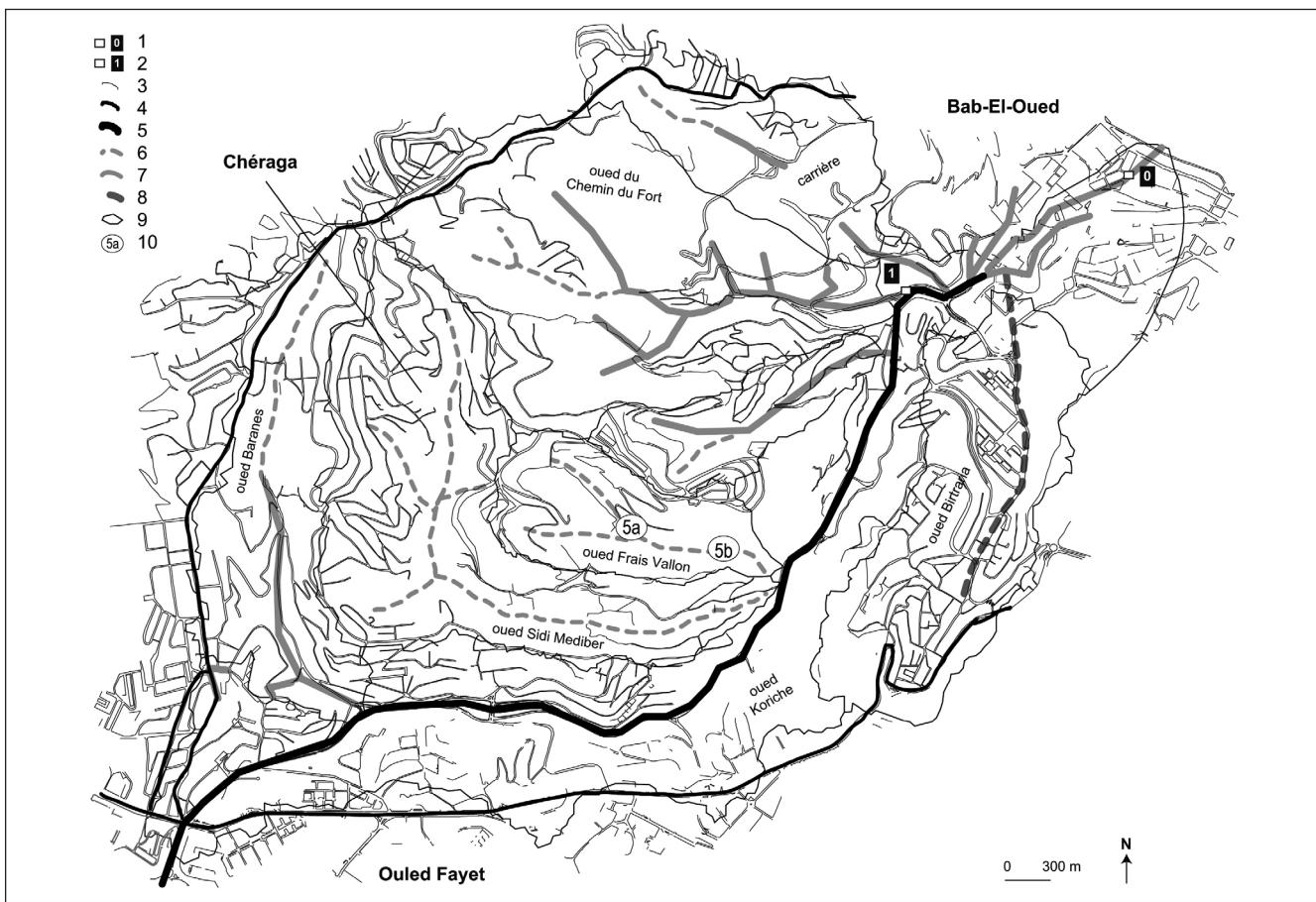


Fig. 6 – Cartographie (à l'échelle du bassin-versant) du réseau routier, du réseau hydrographique, des canalisations et des principaux réseaux d'assainissement (d'après les plans cadastraux fournis par URBANIS pour 2005). 1 : exutoire du bassin versant ; 2 : exutoire utilisé pour les simulations ; 3 : réseau routier principal et axes secondaires ; 4 : routes nationales ; 5 : voie rapide Chevally-Trolley ; 6 : réseau hydrographique canalisé à ciel ouvert (au régime intermittent) ; 7 : sections canalisées et enterrées ; 8 : principaux fossés et voies d'assainissement ; 9 : limites des principaux sous-bassins versants ; 10 : localisation des photos de la fig. 5.

Fig. 6 – Mapping (at the catchment scale) of the road network, hydrographical network, pipelines and main sewerage network (according to the cadastral maps provided by URBANIS in 2005). 1: catchment outlet; 2: point of measurement used for the simulations; 3: highways; 4: expressway (Chevally-Trolley); 6: in open-pit channelised river network (with intermittent regime); 7: underground, channelised sections; 8 main pits and sewerage network; 9: limit of the major sub-catchments, 10: location of photos in fig. 5.

ce qui traduit le fort degré d'urbanisation de ce petit bassin versant d'à peine plus de 10 km². Les cartes montrent bien cette tendance à la densification du bâti, les surfaces occupées par l'habitat dispersé ayant été reconvertis en espaces urbains denses. Cette urbanisation s'est développée en progressant vers les talwegs et les zones périphériques des villes anciennement peuplées, à l'image du quartier de Bab-el-Oued dont la densité atteignait 21 360 hab./km² en 2005. Par ailleurs, le lit des oueds et les fonds de vallon en général ont servi de zones de dépôt de déblais lors des travaux urbains (Belhouli, 2001). La charge solide mesurée à l'exutoire s'explique en partie par cette forte contribution des fonds de lit incisés. Un pourcentage élevé (5 %) de la population implantée dans le bassin de l'oued Keriche vit dans des habitats illégaux ou hors normes (ISL-BRGM, 2006). Ce type de construction s'est implanté préférentiellement dans les lits mineurs (fig. 5B) ou sur les flancs des versants (fig. 5A) dont la pente excède localement 10 %. Par leur situation géographique autant que par la fragilité des installations, les habitants sont alors très exposés au risque d'inondation et de ruissellement en nappe (fig. 5). De plus, l'urbanisation s'est accrue au détriment des zones boisées préexistantes (fig. 4A) ; en 2005, ces dernières ne représentent plus que 19 % de la surface totale, contre 32 % en 1986. Devenus totalement imperméables, les versants urbanisés ont favorisé l'exacerbation du phénomène d'érosion hydrique et la concentration des écoulements vers les zones aval, sans possibilité de diffusion latérale ni verticale des flux. L'imperméabilisation des surfaces a sans doute eu des effets aggravants sur les volumes ruisselés, les débits de pointe et les vitesses d'écoulement intrinsèques, ces deux derniers ayant été, d'après nos propres enquêtes de terrain réalisées, plus élevés aux exutoires de plusieurs vallons en novembre 2001. En lien avec cette analyse de la croissance urbaine, il faut aussi évoquer l'incidence des infrastructures linéaires (réseaux d'évacuation des eaux pluviales, canalisations, routes, etc.) qui se sont implantées et constamment multipliées dans l'oued Keriche.

Des linéaires propices à une diffusion accélérée des écoulements de surface

Au sein de l'oued Keriche (fig. 6), la structure ainsi que l'état des points d'infiltration du réseau d'assainissement apparaissent très inadaptés pour évacuer les écoulements à caractère torrentiel. De fait, les écoulements de surface ont préférentiellement circulé sur les nombreux linéaires construits en accompagnement de la croissance urbaine. Ces derniers ont accéléré la propagation des écoulements vers les exutoires des sous-bassins versants car ils suivent les talwegs naturels des vallons secs, en particulier dans les oueds Scotto-Nadal, Chemin-du-Fort et Keriche, canalisés en 2005 sur une longueur totale de 7,8 km. La nature et la capacité d'évacuation du réseau hydrographique peuvent également être remises en cause : les canaux enterrés n'ont pas été dimensionnés de façon à absorber les débits centennaux (SEAAL, 2008) ; ces ouvrages hydrauliques ont été protégés de l'extérieur par des grillages pour limiter l'extension de l'économie parallèle. Compte tenu de l'importance des volumes charriés (estimés à 0,8 Mm³, cf. *supra*), ces réseaux n'ont pas permis

d'évacuer la totalité des sédiments qui, *de facto*, ont obstrué les buses et les collecteurs. Les surplus de flux (liquides et solides) ont alors rapidement inondé les zones urbanisées situées en aval. Ce problème d'embâcles est souvent observé en cas de crues rapides se manifestant en Algérie (Ghardaïa, Thiaret, Oued-Rhiou, Sidi-Bel-Abbes) ou le long du pourtour méditerranéen français [Nîmes 1988 ; Ouvèze 1992 (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993 ; Piégay et Bravard, 1997) ; Aude 1999 (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2002 ; Arnaud-Fassetta et Fort, 2009, 2011) ; Sainte-Maxime 2009 ; Fréjus 2010]. À elle-même, la section canalisée qui recouvre le fond de l'oued Keriche sur une longueur de 3,2 km pour la construction de la voie rapide Chevalley-Trolley, illustre parfaitement le problème. Cette section de l'oued collecte les apports de l'ensemble des bassins secondaires, expliquant ainsi pourquoi la voie rapide s'est transformée en un véritable torrent au cours de la matinée du 10/11/2001 : le débit a été estimé à 730 m³/s à l'entrée du quartier Bab-el-Oued alors que le débit en amont de la passerelle Scotto, située à 1,2 km en amont un peu au-dessus de l'exutoire du Scotto Nadal, n'a été seulement que de 143 m³/s (fig. 1 et fig. 7). Au final, le rôle de l'emprise urbaine est incontestable mais deux questions subsistent : pourquoi les débits ont-ils été si importants à l'exutoire du bassin versant de l'oued Keriche et, surtout, pourquoi l'événement de 2001 a-t-il occasionné des dommages si importants ? La réponse à ces deux questions passe par l'évaluation du poids des interactions et des jeux d'échelle existant entre les zones de production du ruissellement, les surfaces de réinfiltration et les axes de concentration des écoulements dans le bassin versant de l'oued Keriche.

Simuler l'influence de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique de l'oued Keriche

Mise en œuvre de la modélisation à l'aide de l'automate cellulaire

Grâce à sa structure et à son principe de fonctionnement, l'automate cellulaire *RuiCells* (Delahaye, 2002 ; Langlois et Delahaye, 2002 ; Douvinet *et al.*, 2008) permet 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, et des effets liés à l'agencement spatial des surfaces ruisselantes ou infiltrantes. Des données de pluies peuvent également être implémentées selon la nature des valeurs disponibles (images radar, pluviographes). En intégrant une à une les variables dans le modèle, on cherche à mieux identifier le rôle joué par les interactions entre les différentes composantes de l'hydro-système. Validé sur quelques vallons secs du nord de la France (Delahaye *et al.*, 2001), ce modèle a été testé ici pour : 1) simuler les ruissellements de surface en se basant sur des variables simples (pluie, topographie, occupation du sol), 2) implémenter ces variables simples tout en évitant de rentrer dans une modélisation physique peu reproductible. Par exemple, les écoulements sont guidés par

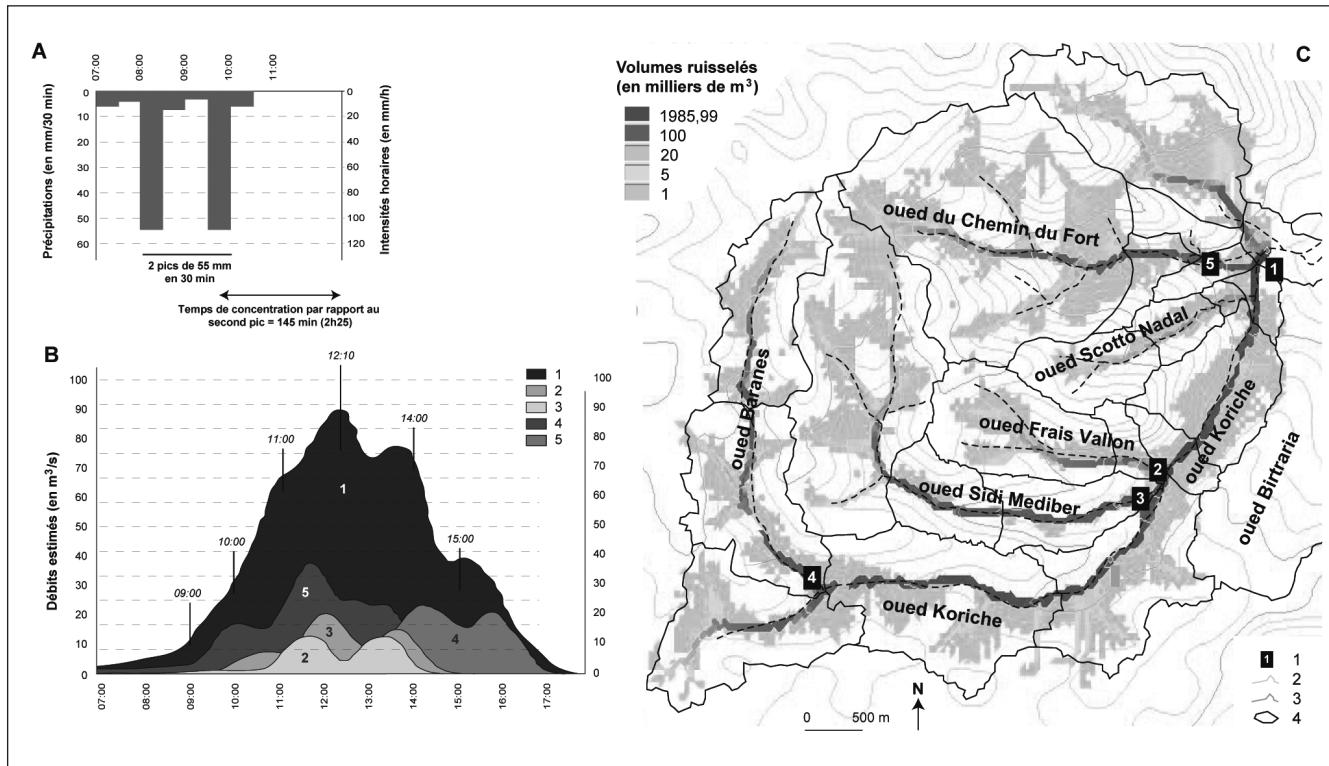


Fig. 7 – Simulation des écoulements de surface avec l’automate cellulaire RuiCells suite à l’épisode pluvieux durant la matinée du 10 novembre 2001. A : Intensités des pluies enregistrées à la station de Bouzaréah (d’après les données de ISL-BRGM, 2006, voir fig. 1). B : Simulation des débits (en m^3/s) à différents points de mesure situés le long de l’oued Koriche (1 : oued Koriche ; 2 : oued Frais Vallon ; 3 : oued Sidi Medjred ; 4 : oued Baranes ; 5 : Chemin du Fort). C : Cartographie des écoulements dans le bassin-versant de l’oued Koriche (1 : points de mesure ; 2 : courbes de niveau avec une équidistance de 20 m ; 3 : courbes de niveau avec une équidistance de 100 m ; 4 : délimitation des sous-bassins versants).

Fig. 7 – Simulation of surface runoff with the RuiCells cellular automaton after the rainfall that occurred the 10 November 2001. A: Intensities of rainfall from station of Bouzaréah (data from ISL-BRGM, 2006, see fig. 1). B: Flow simulation (in m^3/s) at different measure points in the Oued Koriche (1: oued Koriche; 2: oued Frais Vallon; 3: oued Sidi Medjred; 4: oued Baranes; 5: Chemin du Fort). C: Mapping runoff in the Oued-Koriche catchment (1: measure points; 2: contour elevation with interval of 20 m; 3: contour elevation with interval of 100 m; 4: delineation of sub-catchments).

trois règles déterministes (Tarboton, 1997) qui sont basés non seulement sur la topologie de voisinage du réseau cellulaire mais aussi sur les liens structurant la surface (Douvenet *et al.*, 2010). L’étude menée ici doit aussi permettre de quantifier l’influence des zones urbanisées en prenant en compte leur évolution entre 1986 et 2005.

Présentation simplifiée de l’automate cellulaire RuiCells

Initialement, l’automate *RuiCells* a été conçu et développé pour simuler l’influence des composantes morphologiques sur la formation d’un écoulement de surface. Le concept classique d’un automate cellulaire, tel que défini par S. Wolfram (2002), a été généralisé pour pouvoir modéliser la structure variable des éléments de terrain et la « connectique » entre les cellules (Langlois et Delahaye, 2002). Les liens d’écoulement ne sont plus seulement guidés par la topologie de voisinage du réseau cellulaire, mais par les liens structurant la surface avec trois écoulements (Tarboton, 1997) : linéaires, ponctuels et surfaciques. La démarche s’appuie sur un automate cellulaire dont les cellules sont de formes et de dimensions variables

(point, ligne, surface) et dont les liens traduisent directement la structure morphologique de la surface. La principale difficulté est de relier certaines variables topographiques (*i.e.*, l’altitude et ses dérivées) à des variables hydrauliques telles que la direction des écoulements dans le maillage triangulaire. L’automate *RuiCells* permet de faire transiter les informations implémentées (débit, surface) de cellule en cellule en se basant sur les axes de circulation qui s’auto-organisent en fonction de la morphologie du terrain. À chaque itération, les cellules se vidagent dans celles qui sont connectées en aval et reçoivent les surfaces venant de celles situées en amont. Les entrées et les sorties (*e.g.*, un volume d’eau) sont comptabilisées pour chaque cellule en mode synchrone. Le processus est itératif (donc discret) et la résolution du modèle numérique de terrain (MNT) contraint les itérations et la taille du maillage. Les points de mesure sont localisés à l’exutoire final du bassin versant mais ils ont aussi été choisis aux exutoires de plusieurs sous-bassins versants. La surface amont est automatiquement calculée par l’automate. On considère donc la limite topographique du bassin et non sa vraie limite hydrogéologique, ce qui reste cependant pertinent pour simuler des écoulements de surface.

Pertinence et limites des paramètres implémentés dans l'automate cellulaire

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été extrapolé à partir des courbes de niveaux digitalisées (équidistance de 25 m). Les pluies implémentées correspondent aux données du hyéogramme de reconstruction défini par ISL-BRGM (2006). Ces données sont considérées comme homogènes à l'échelle du bassin versant : ceci peut être sujet à caution mais aucune autre solution n'était possible 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 compte également 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 ISL-BRGM (2006) pour des épisodes décennaux car l'utilisation des valeurs telles que définies par l'ISF aurait sous-estimé les réponses pour l'épisode de 2001. Compte tenu des limites précédemment évoquées, les résultats des simulations doivent être utilisés avec parcimonie, le but étant moins d'obtenir les débits et les volumes réellement observés que de prouver que l'urbanisation n'a cessé de devenir un facteur d'aggravation de la sensibilité du bassin aux aléas pluviométriques.

Résultats, apports, limites et enseignements à tirer pour l'information préventive

Cartographie des écoulements pour l'épisode du 10 novembre 2001

Les simulations portent sur la partie qui se trouve en amont du quartier de Bab-el-Oued (fig. 6). Ce choix se justifie par le fait que la zone aval présente un tissu urbain trop 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 ce type de contexte urbain mais ce n'est pas l'objet de cette étude. L'étude de l'hydrogramme simulé en amont du quartier de Bab-el-Oued montre que le bassin répond tout d'abord aux premières pluies (pic de crue à 58 m³/s) durant la nuit du 9-10/11. Les réponses durant la matinée du 10/11

sont ensuite bien plus élevées (fig. 7) ; le pic de crue (88,7 m³/s) est alors lié 1) à une arrivée concomitante des écoulements de la partie amont, en réponse aux pluies relevées de 8 h à 8 h 30, et 2) à une réactivité marquée des sous-bassins situés en rive gauche dans la partie aval (Chemin du Fort, Scotto-Nadal), en réponse au second pic de 9 h 30 à 10 h. Les quantités d'eau ont alors très vite augmenté alors que, dans le même temps, les ondes de crue se rejoignaient pour former une réponse « polygénique ». Les simulations confirment ici les liens entre les réponses des différents sous-bassins, l'organisation spatio-temporelle des pluies et la structuration des axes d'écoulement. De plus, l'emprise urbaine a redonné un poids non négligeable à la structuration interne de l'oued Koriche.

Les volumes ruisselés estimés à partir de *RuiCells* (1,96 Mm³) sont proches des valeurs proposées à partir des laisses de crue (1,8 Mm³) si l'on ne tient pas compte de la charge solide. Le pic de crue estimé en amont de Bab-el-Oued (point de la passerelle) reste toutefois très inférieur à la valeur calculée à partir des laisses de crue (88,7 m³/s au lieu de 143 m³/s, soit 60 % de la valeur estimée par ISL-BRGM, 2006). Cet important écart s'explique par plusieurs raisons : les simulations ne tiennent pas compte 1) de l'influence des linéaires hydrauliques (nombreux, notamment sous la voie rapide Chevalet-Trolley qui a accentué la vitesse de diffusion des flux vers le quartier de Bab El Oued) ; 2) des ruissellements hypodermiques (dans l'automate, l'eau infiltrée est totalement perdue) ; 3) de la capacité de transport des écoulements puisque seul un volume d'eau liquide transite au cours de nos propres 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 estimés à partir des laisses de crue ; Reid *et al.*, 2007) ; 4) des effets liés aux embâcles qui ont été observées à plusieurs reprises (Belhouli, 2011). Si l'automate *RuiCells* proposent des volumes ruisselés cohérents, le débit de pointe est encore à nouveau à interpréter avec précaution (Douvinet *et al.*, 2008). On peut également remettre en cause la valeur du débit de pointe estimée par ISL-BRGM (2006) : un débit d'une telle importance à l'exutoire d'un bassin de 10,2 km² reviendrait à dire que le débit de pointe spécifique est de l'ordre de 73 m³.s⁻¹.km⁻², ce qui n'a jamais été observé ailleurs et même dans la littérature scientifique (Gaume *et al.*, 2009). Les valeurs proposées ici reviendraient à dire que ce débit spécifique serait proche de 9-14 m³.s⁻¹.km⁻², valeurs qui nous semblent correctes, à l'image de ce qui avait par exemple été mesuré suite aux crues des cadereaux de Nîmes le 3 octobre 1988 (près de 10 m³.s⁻¹.km⁻²). Les volumes de pluie et le contexte topographique sont très proches pour l'oued Koriche, à la différence que l'urbanisation dans ce bassin est bien plus développée dans les parties amont.

Cartographie des écoulements avec l'occupation du sol en 1986

Une autre simulation est proposée en gardant les variables déjà présentées, à l'exception de l'occupation du sol de 2005 qui a été remplacée par celle de 1986. L'idée ici est de me-

surer les effets de cette emprise urbaine sans toucher aux autres paramètres. La modélisation pas à pas permet aussi de tester la sensibilité des conditions initiales. La carte des écoulements simulés est très proche de la précédente, montrant que les surfaces infiltrantes ont peu de poids sur la concentration des écoulements. Les débits de pointe ($83,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1986 au lieu de $88,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2005, soit une augmentation de 6 %) et le cumul des volumes ruisselés ($1,8 \text{ Mm}^3$ en 1986 contre $1,96 \text{ Mm}^3$ en 2005, soit une augmentation de 10 %) affichent des valeurs plus faibles en 1986, ce qui est en partie lié à une influence plus grande des surfaces boisées (31 % en 1986 contre 19 % en 2005) et au rôle moins accentué des surfaces urbanisées denses en 1986. Si les débits de pointe de 2001 arrivent avec quelques minutes d'avance par rapport à ceux de 1986, l'écart n'est pas significatif ; les simulations démontrent alors que, avec des surfaces plus infiltrantes, les débits de pointe et les volumes ruisselés auraient été identiques. Ce résultat peut sembler surprenant mais nous pouvons apporter une explication logique : tous les linéaires hydrologiques (réseaux, canalisations) et les effets indirects liés à l'emprise urbaine (exposition des sociétés dans les habitations illicites) ont eu certainement un rôle aggravant qui n'est pas démontré car non pris en compte dans les simulations.

Conclusions

L'emprise urbaine a joué un rôle important lors des inondations de Bab-el-Oued des 9-10 novembre 2001. Si son rôle de facteur aggravant avait déjà été souligné, il est désormais possible de mieux comprendre ses effets sur la dynamique hydrologique au sein même du bassin versant de l'oued Koriche. Avec 78 % de sa surface occupée par du bâti, ce bassin présente une forte prédisposition aux ruissellements : les surfaces deviennent rapidement ruisselantes en cas de pluies intenses. Ces espaces urbanisés n'ont cessé de s'accroître depuis les deux dernières décennies (1986-2005). Si les variables environnementales (météorologie, physiographie, géomorphologie) jouent un faible rôle de façon séparée, elles retrouvent toute leur efficacité en interagissant simultanément. La magnitude même de l'aléa trouve une explication dans la distribution temporelle des pluies : les deux pics d'intensité de pluie enregistrés dans la matinée du 10/11 ont entraîné des réponses concomitantes des sous-bassins situés en amont et en aval de l'oued Koriche. Cette crue présente donc un caractère polygénique malgré le fait que les ondes de crue soient arrivées en même temps à l'exutoire. En réaction, les réseaux ont été incapables d'évacuer de telles quantités de ruissellement, expliquant les vagues de boue photographiées par plusieurs habitants et, en particulier, le long de la voie rapide Chevalley-Trolley (SEAAL, 2008). Les réseaux intra-bassin (25 km de routes, 7,8 km de canalisations) ont servi de collecteurs tout en facilitant la propagation des flux vers le quartier de Bab-el-Oued. Cet article a mis en évidence la complexité des mécanismes de la genèse et du développement de la crue au sein du bassin versant de l'oued Koriche. Les résultats obtenus à travers les simulations méritent d'être exploités afin de pousser plus loin l'analyse systémique et de parvenir à la mise en place d'un

outil d'aide à la décision ou à la gestion du risque hydrométéorologique dans le bassin versant de l'oued Koriche. À terme, pour affiner ces modélisations, il faudrait alors intégrer les effets hydrologiques des linéaires, ces derniers pouvant stopper, dévier ou accentuer les flux vers les parties aval des bassins versants.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les deux relecteurs anonymes dont les remarques et les suggestions ont permis d'améliorer la version initiale du manuscrit.

Références

- 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 d'atmosphère, université Paul Sabatier (Toulouse 3), 160 p.
- 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, Carcassonne, France, sous presse.
- Arnaud-Fassetta G., Ballais J.-L., Beguin E., Jorda M., Meffre J.-C., Provansal M., Roditis J.-C., Suanez S. (1993) – La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 62, 2, 33-48.
- Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Fort M., Plet A., André G., Clément D., Dagan M., Mériling C., Quisserne D., Ryckx Y. (2002) – La catastrophe hydrologique de novembre 1999 dans le bassin-versant de l'Argent Double (Aude, France) : de l'aléa pluviométrique à la gestion des risques pluviaux et fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1, 17-34.
- 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.
- Behlouli L. (2001) – *Note technique sur l'évènement pluvieux du 9 au 10 novembre 2001. Région d'Alger*. Services des études et de prévisions, Alger, 53 p.
- 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.

- Bocher E., Martin J.-Y. (2009)** – *TANATO: An approach to evaluate the impact of natural and anthropogenic artefacts with a TIN-based Model.* Paper presented at the OGRS 2009, Nantes, France, 8-10 July, Abstracts Proceedings, 56-59.
- 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* 67, 99-108.
- Côte M. (1996)** – *L'Algérie.* Editions Masson, Paris, 254 p.
- Delahaye D., Guermond Y., Langlois P. (2001)** – Spatial interaction in the runoff process. Proceedings of the 12th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, Saint-Valéry-en-Caux (<http://www.cybergeo.eu/index3745.html>).
- Delahaye D. (2002)** – *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscale des risques.* Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 2 tomes, université de Rouen, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques (MTG), 250 p.
- Djellouli Y., Saci A. (2003)** – Catastrophe « naturelle » : les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 23, 236-242.
- Douvinet J. (2010)** – Le traitement des inondations en catastrophe naturelle : un système à adapter. *Risques - Les cahiers de l'assurance*, 83, 104-112.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2008)** – Modélisation de la dynamique hydrologique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo*, 412 (<http://www.cybergeo.eu/index16103.html>).
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2010)** – Spatialisation des zones bâties potentiellement exposées à l'aléa « crues rapides » dans le nord de la France : enjeux et perspectives. In *Global change: facing risks and threats to water Resources, Red Book of the 6th Friend World Conference.* Publications IAHS, 13-24.
- 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.
- Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaskovicova L., Bloschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irismescu A., Kohnova S., Koutoulis A., Marchi L., Matreat S., Medina V., Preciso E., Sempre-Torres D., Strancalie G., Szolgay J., Tsnaïs I., Velasco D., Viglione A. (2009)** – A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology* 367, 70-78.
- GECOTEC [Groupement Economique de Contrôle Technique de la Construction] (2002)** – Intempéries du novembre 2001. Retour sur une catastrophe. *Le Contrôle Technique de la Construction*, 25, 16 p.
- 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.
- ISL-BRGM (2006)** – *Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzareah aux catastrophes naturelles.* Rapport de tâche 2, volume 2, R3114, 6-42.
- Langlois P., Delahaye D. (2002)** – Ruicells, un automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 12-4, 461-487.
- Léone F. (2003)** – *Concept de vulnérabilité appliquée 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.
- Machane D., Chatelain J.-L., Cheikhounis G., Guemache M.-A., Guillier B., Dahmani K., Bichi N., Bensalem R., Ouabache E., Kasmi H. (2008)** – 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. *7^e Colloque National Association Française de Génie Parasismique, Ecole Centrale de Paris*, 4-6 juillet 2007, 8 p. (<http://www.mssmat.ecp.fr/IMG/pdf/afps2007.pdf>).
- 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* 21, 109-130.
- 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., Arnaud-Fassetta G. (2011)** – Le risque d'inondation dans l'oued Koriche (Massif de Bouzareah, Alger ouest) : analyse systémique de l'aléa et facteurs de vulnérabilité. *Actes du colloque international « Risques naturels en Méditerranée occidentale », 16-21 novembre 2009, Carcassonne, France, sous presse.*
- ONM [Office National de la Météorologie] (2002)** – *Un résumé de la situation météorologique exceptionnelle ayant affectée le centre et l'ouest du nord Algérie et en particulier la zone urbaine d'Alger les 9 et 10 novembre 2001.* Note technique, 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.
- Piégay H., Bravard J.-P. (1997)** – Response of a Mediterranean riparian forest to a 1 in 400 year flood, Ouvèze river, Drôme-Vaucluse, France. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 31-43.
- 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.
- Reid S.C., Lane S.N., Montgomery D.R., Brookes C.J. (2007)** – Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? *Geomorphology* 90, 263-282.
- Rufat S. (2009)** – Estimation relative de la vulnérabilité urbaine à Bucarest. *Mappemonde*, 95 (<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.
- Smail M. (2005)** – Prévention des risques majeurs urbains. *Colloque Réseau urbain Europe MENA : les rendez-vous des villes*, Alger, 14-16 juin 2005, 20 p. (http://www.euromedina.org/bibliotheque_fichiers/interventions_alger.htm).

- SEAAL [Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger]** (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.
- Souchère V., Cerdan O., Dubreuil N., Le Bissonnais Y., King C.** (2005) – Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena* 61, 229-240.
- 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 doctorat en géographie, université Paris-Diderot (Paris 7), 416 p.
- 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.
- Wolfram S. (2002)** – *A new kind of science*. Wolfram Media, Inc., Compaign, IL, 1197 p.

Article soumis le 1^{er} juin 2011, accepté le 31 octobre 2011.