



HAL
open science

Approche multi-temporelle et systémique du risque d'inondation dans le bassin fluvial moyen de l'oued Medjerda (Tunisie septentrionale)

Lotfi Lahmar

► **To cite this version:**

Lotfi Lahmar. Approche multi-temporelle et systémique du risque d'inondation dans le bassin fluvial moyen de l'oued Medjerda (Tunisie septentrionale). Géographie. Université Paris Cité, 2021. Français. NNT : 2021UNIP7004 . tel-03331722

HAL Id: tel-03331722

<https://theses.hal.science/tel-03331722>

Submitted on 2 Sep 2021

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 DE PARIS
École Doctorale 624 « Sciences des Sociétés »
UMR 8586 (PRODIG)



UMR 8586 (CNRS)
UMR 215 (IRD)
CNRS, Université Paris 1
Panthéon-Sorbonne,
Université de Paris,
IRD, AgroParisTech,
Sorbonne-Université

DOCTORAT EN GÉOGRAPHIE

**Approche multi-temporelle et systémique
du risque d'inondation dans le bassin
fluvial moyen de l'oued Medjerda
(Tunisie septentrionale)**

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur
de l'université de Paris

Lotfi LAHMAR

Soutenue le 26/03/2021 devant les membres du jury :

Gilles ARNAUD-FASSETTA (directeur) – Professeur (géographie), université de
Paris, UMR 8586 PRODIG

Jean-Michel CAROZZA (rapporteur) – Professeur (géographie), université de La
Rochelle, UMR 7266 LIENSS

Catherine KUZUCUOGLU (rapporteuse) – Directrice de recherches CNRS, Meudon,
UMR 8591 LGP

Monique FORT (examinatrice) – Professeure émérite (géographie), université de
Paris, UMR 8586 PRODIG

Aline GARNIER (examinatrice) – Maîtresse de conférences (géographie),
université Paris-Est-Créteil, UMR 8591 LGP

Jean-Pierre GUILHEMBET (examinateur) – Professeur (histoire), université de
Paris, UMR 8210 ANHIMA

Fouad ZARGOUNI (examinateur) – Professeur (géologie), université de Tunis

« *Tout a une fin en ce monde* »

(A. Daudet, *Lettres de mon moulin*, 1936, p. 18).

Résumé

Le bassin fluvial populeux de la moyenne Medjerda, en Tunisie, est fortement exposé aux dangers d'inondation et de stagnation des eaux. Les causes en sont doubles : d'un côté, des conditions pluvio-hydrologiques et topo-géologiques du milieu naturel favorables, de l'autre, des modes d'occupation et d'aménagement du territoire (bâti, barrage...), ne répondant pas toujours à ces conditions. L'étude des risques pluviaux et fluviaux, à travers une approche systémique et diachronique, révèle d'importants impacts tant sur le plan environnemental qu'humain. L'examen morphostratigraphique des archives sédimentaires montre que l'activité des eaux courantes est à l'origine de modelés souvent de cône de déjection, de terrasse et de banquettes, d'âge historique. L'étude géoarchéologique et historique du paysage fluvial depuis les Romains fait apparaître que, le niveau topographique sur lequel se sont installés les anciens était de 2 à 6 m plus bas que l'actuel. En témoignent des constructions humaines enfouies sous les alluvions, du fait d'une phase de remblaiement qui s'est probablement produite à l'Antiquité tardive. La section des vallées était plus large que celle d'aujourd'hui alors que le tracé fluvial était moins sinueux. Cela reflète la variabilité du régime fluvial et renvoie à des moments de crise que sont les crues vécues jadis par les riverains. L'approche géomatique et de terrain indique que l'activité géodynamique au cours des trois derniers siècles (fin du XIX^e - début du XXI^e siècle) est généralement notable. L'essentiel du travail fluvial se produit à l'occasion d'événements pluvio-hydrologiques majeurs, ayant souvent des impacts socio-environnementaux. Les processus qui y interviennent sont variés tels que les changements de tracé des chenaux (divagations et défluviations), les recoupements de méandre, les incisions fluviales (linéaire et latérale) et les remblaiements sédimentaires. L'action de l'eau et de l'Homme est responsable de différentes formes de perturbations sociales et environnementales comme la dégradation du patrimoine hydraulique et archéologique. Le recoupement de témoignages par les archives surtout ainsi que le couplage de données de terrain, SIG et télédétection laissent voir que le phénomène d'inondation, aujourd'hui, est nettement plus fréquent et menaçant que par le passé. Le bilan des décès fait état de 131 morts (1886-2015) tandis que les dommages aux biens matériels sont la plupart du temps considérables, parfois inestimables et difficilement supportables. Les riverains se sentent toujours livrés à eux-mêmes et tout le monde s'interroge : à quand la prochaine crise ?

Mots-clés : Medjerda, inondation, géodynamique, géoarchéologie, géomatique.

Abstract

The populous mid-Medjerda basin in Tunisia, is highly exposed to the dangers of flooding and water stagnation. The causes are twofold: on the one hand, favorable pluvio-hydrological and topo-geological conditions of the natural environment, and modes of occupation and land use (buildings, dams, etc.), which do not always meet these conditions, on the other. The study of rain and river risks, through a systemic and diachronic approach, reveals important developments and adverse consequences on both the environmental and human levels. The morphostratigraphic examination of the sedimentary archives shows that the activity of running water is at the origin of models, often of alluvial cone, terrace and bank, of historic age. The geo-archaeological and historical study of the river landscape since the Romans shows that the topographic level on which the ancients settled was 2 to 6 m lower than the current one. This is evidenced by human constructions buried under the alluvium, due to a filling phase that probably occurred in the Late Empire and late Antiquity. The section of the valleys was wider than that of today while the river route was less winding. This reflects variations in the fluvial regime and refers to moments of crisis such as the floods once experienced by the local residents. The geomatics and terrain approach indicate that the geodynamic activity over the last three centuries (late 19th century - early 21st century) is generally important. Most of the river work takes place during major pluvio-hydrological events, often having socio-environmental impacts. The processes involved are varied such as channel changes (shifting / meandering and avulsion), meander intersections, fluvial incisions (linear and lateral) and sedimentary fills. Water as well as human actions are responsible for various forms of social and environmental disturbances such as the degradation of the hydraulic and archaeological heritage. The cross-checking of testimonies especially from the archives as well as the coupling of field data, GIS and remote sensing show that today the flooding phenomenon is clearly more frequent and threatening than in the past. The death toll shows 131 deaths (1886-2015) while the damage to material goods is most of the time considerable, sometimes invaluable and unbearable. The residents feel that are always left to their own and everyone is wondering: when will the next crisis be?

Key-words: Mid-Medjerda (Tunisia), inundation risk, geodynamic activity, geoarchaeology, socio-environmental impacts, geodynamic.

Remerciements

Je commence cet ouvrage par témoigner ma profonde gratitude et exprimer ma reconnaissance à tous ceux et celles sans qui cet effort n'aurait pas abouti.

C'est tout d'abord aux compétences, aux orientations et aux encouragements du Professeur **M. Gilles ARNAUD-FASSETTA** que je dois avoir commencé et achevé cette thèse. Il a toujours été pour moi d'une extrême bienveillance et générosité. C'est à lui que s'adressent en priorité mes remerciements les plus sincères. Merci Monsieur Gilles de m'avoir donné la chance de travailler avec vous, de m'avoir accueilli à l'université de Paris (Diderot) et de m'avoir appris à donner le meilleur de moi-même.

Je remercie **tous les membres du jury**, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant, malgré leurs nombreuses et importantes préoccupations, d'évaluer ce travail.

M. A. OUESLATI, Professeur de géomorphologie à la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, a dirigé mon mémoire de master puis ma thèse de doctorat dont il a corrigé la première version de trois chapitres (2007-2011), avant que le projet ne s'arrête surtout pour avoir dépassé l'échéance. J'espère qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Quand j'étais membre du laboratoire de Cartographie Géomorphologique des Milieux, des Environnements et des Dynamiques (CGMED), j'ai bénéficié de l'aide appréciable de ses deux responsables, le Professeur **M. M.-R. KARRAY** et le Professeur **M. H. BEN OUEZDOU**, précisément au niveau des moyens mis à ma disposition (offre de stages et participation aux manifestations scientifiques, acquisition de photos aériennes, achat de marteau de géologue, usage de la charte Munsell). Qu'ils soient tous les deux cordialement remerciés.

Un merci tout spécial va au Professeur **M. J.-P. BRAVARD**, que je rencontrais pendant son séjour en Tunisie à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Sousse et avec lequel j'ai fait du terrain sur le littoral de Hergla, qui s'est intéressé à ce travail et m'a fait l'honneur de corriger trois de ses chapitres.

Je remercie **M. A. BOUSNINA**, Professeur de climatologie à la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, pour la correction du chapitre climat. Je remercie aussi **M. M. BEN MOUSSA**, archéologue-céramologue, pour l'identification et la datation du matériel céramique.

Ma gratitude va également à **M. A. BOUJARRA**, géomorphologue, de m'avoir offert plusieurs fois l'occasion de l'accompagner sur différents terrains tunisiens et d'en discuter longuement. Merci à l'aimable **M. F. AYACHE**, biogéographe, pour l'identification des espèces de végétation. Merci aussi à **M. S. FADHLAOUI** pour la réalisation des analyses granulométriques à l'université Paris 4-Sorbonne. Merci également à **M. A. OUNIS** pour l'élaboration des analyses diffractométriques à la Faculté des Sciences de Tunis.

Un merci particulier à **M. S. DAHECH** de m'avoir donné de son temps et de son argent pour régler à chaque fois mon dossier administratif.

Merci aussi à **M. M.-F. MEGDICHE** et **M. N. MZOUGH**I pour leur soutien scientifique et humain inoubliable.

J'en viens maintenant aux amis et aux honorables collègues géographes, géomorphologues et historiens qui, chacun à sa manière, m'ont apporté leur soutien et encouragement. Je pense au feu A. BKHAIRI, O. EL AROUI, R. AKROUTI, H. FAREH, K. ZERAI, R. BOUAZIZ, T. MANI, M. MEHDOUANI, T. BEN FRAJ, F. Jlassi et S. ALIOUET. Qu'ils soient tous amicalement remerciés.

Je termine avec la famille et les intimes. À mon père Mongi et ma mère Hlima, je dis merci pour votre sacrifice et votre grande patience. À mes frères Hafedh, Tarek, Mourad, Khaled et ma sœur Kawther, je dis merci de votre écoute et de votre estime.

Ma femme Olfa, merci pour ta longue patience et tes paroles de réconfort. Ma petite Molka, j'espère que tu sois un jour fière de ton papa !

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, je dédie ce modeste travail.

Sommaire

Remerciements

Introduction générale

Première partie

Le système fluvial de la Medjerda : un milieu favorable au risque d'inondation

Chapitre I. L'eau, la roche, le relief

Chapitre II. Le bâti, le barrage

Deuxième partie

Le risque fluvial dans les fonds de vallée de la Medjerda, un phénomène ancien : approche géoarchéologique

Chapitre III. L'Histoire de la mise en place des plaines alluviales à partir des travaux antérieurs

Chapitre IV. Évolution géomorphologique des paysages fluviaux au cours des temps historiques

Chapitre V. La géoarchéologie fluviale, comme outil de caractérisation de la dynamique fluviale historique et des interactions milieux-sociétés

Troisième partie

Morphodynamique actuelle et risque fluvial : approche géomatique et de terrain

Chapitre VI. Des modifications parfois importantes dans le dessin des tracés fluviaux

Chapitre VII. Dynamiques érosives et sédimentaires actuelle et vulnérabilité des vestiges archéologiques face aux aléas naturels et humains

Quatrième partie

Le risque d'inondation dans le bassin moyen de la Medjerda aujourd'hui : un phénomène nettement plus fréquent et menaçant que par le passé

Chapitre VIII. Témoignages des archives sur les inondations

Chapitre IX. Couplage des données de terrain, SIG et télédétection pour l'analyse et la cartographie des inondations récentes majeures

Conclusion générale

Introduction générale

Le phénomène d'inondation avec ses multiples facettes occupe une place notable dans la littérature scientifique. Son importance découle des conséquences souvent affligeantes des eaux d'inondation aussi bien sur les populations riveraines que sur les paysages fluviaux (Pardé, 1930 ; Tricart, 1958 ; Kondolf, 1997 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2002 ; Bravard 2004 ; Ballais, 2005 ; Fehri, 2014). En Tunisie, le risque d'inondation que certaines régions affrontent depuis un demi-siècle au moins est fort ancien et remonte même au temps des Romains (Saadaoui, 1982 ; Zielhofer *et Faust*, 2003). À l'époque contemporaine, nombreuses sont les crues dévastatrices enregistrées (1969, 1973, 1995, 2003 et 2009), encore restées fâcheusement mémorables (Poncet, 1970 ; Claude et Pontanier, 1971 ; Ballais, 1973 ; Miossec, 1975 ; Bonvallot, 1979 ; Daoud, 1982 ; Bourgou et Oueslati., 1984 ; Hamza, 1989 ; Bomer et Naoui, 1990 ; Ben Ouezdou *et al.*, 1990 ; Hamza, 1995 ; Boujarra et Ktita, 2009 ; Oueslati, 1999 ; Lahmar, 2005 ; Fehri *et al.*, 2008). D'autres crues inquiétantes ont également manqué de se transformer en catastrophes qui ne furent évitées que de justesse. Mais durant les deux dernières décennies, le danger des eaux, nettement plus fréquent et menaçant, est véritablement devenu un souci majeur pour plusieurs concentrations humaines (Lahmar, 2009 ; Daoud, 2013 ; Fehri, 2014 ; Brahim, 2018 ; Lahmar, 2019 ; Mehdouani, 2020). Les habitants du bassin fluvial moyen de l'oued Medjerda semblent être les plus éprouvés ces derniers temps par les eaux de débordement. Entre 2000 et 2015, presque tous les deux ans, des inondations sérieuses se sont produites causant des pertes et des dégâts importants, auxquels s'ajoutent des désordres sociaux très gênants. Parallèlement, les impacts environnementaux des eaux de crue sont parfois impressionnants et suscitent également l'intérêt des chercheurs. Le choix du sujet et du terrain d'étude, la vallée moyenne de la Medjerda, est motivé par deux raisons: d'une part, le souhait de continuer de travailler dans la même vallée que l'un de ses secteurs a déjà donné matière à notre mémoire de mastère intitulé « Occupation du sol et risque d'inondation dans la plaine de Jendouba-Bou Selem » (Lahmar, 2005), d'autre part, l'ambition d'accomplir une recherche portant toujours sur la même question mais beaucoup plus large et pointue, qui rassemble autant que possible de documents originaux. Nous considérons que le bassin fluvial moyen de la Medjerda est l'espace compris entre la ville de Ghardimaou et la ville de T'borba, s'étendant sur 297 km de

longueur et 8 km de largeur environ avec 2158 km² de superficie. Terroir attractif au fil des siècles, surtout au temps des Romains, il tient une place privilégiée dans le contexte tunisien. C'est d'abord le principal bassin céréalier et nourricier du pays, nommé jadis grenier de Rome. C'est aussi le premier réservoir d'eau avec 1 milliard de m³/an, soit 37 % du total des eaux de surface (Zahar *et al.*, 2008). C'est encore un milieu d'occupation forte renfermant près d'1 million d'habitants. La richesse de la région explique la multiplicité des travaux de recherches portant sur l'archéologie (Tissot, 1884 ; Saladin, 1893 ; Cagnat et Saladin, 1894 ; Gauckler, 1898 ; Carton, 1912 ; Khanoussi, 1991 ; Rakob, 1993), la géologie (Solignac, 1927 ; Gottis et Sainfeld, 1955 ; Rouvier, 1977, Zargouni, 1978) la climatologie (Ginestous, 1927 ; Kassab, 1979 ; Bousnina, 1986 ; Henia, 1993 ; Ben Boubaker, 2003 ; Dallel, 2008), et la géographie (Bonniard, 1934 ; Kassab, 1979 ; Aloui, 2016). Le sujet d'inondation n'est exposé que récemment (Oueslati, 1999 ; Lahmar, 2005) avec une forte composante axée sur l'hydrologie et la modélisation (Zahar *et al.*, 2008 ; Djebbi, 2012 ; Gharbi, 2016). Parmi les publications, des rapports émanant de la Direction Générale des Ressources en Eau à l'occasion des événements hydrologiques exceptionnels (Rodier *et al.*, 1981 ; Balti, 2000 ; Ghorbel, 2000 ; Saadaoui et Ben Mansour, 2003 ; Rejeb, 2012 ; Ajala et Khalfoun, 2015). Mises à part quelques notes parues avant les années quatre-vingt-dix (Burolet, 1953 ; Jauzein, 1967 ; Kassab, 1970 ; Bannour et Bonvallot, 1988 ; Bommer et Naoui, 1990), les études géomorphologiques sont également récentes et peu nombreuses. La première thèse universitaire consacrée à la vallée alluviale de la moyenne Medjerda date de 1995 (Naoui, 1995), bien que l'auteur nous paraisse avoir largement favorisé les aspects hydrologiques aux dépens des observations géomorphologiques. En fait, c'est à partir des années 2000 qu'a commencé une série de publications donnant souvent la priorité aux investigations de terrain (Zielhofer et Faust, 2003 ; Lahmar, 2005 ; Romdhan, 2005 ; Oueslati, 2005 ; Mjejri, 2006). Au regard de la bibliographie existante et de notre connaissance même superficielle de l'ensemble du terrain, il nous a paru que ce dernier n'est pas encore suffisamment connu. Certains aspects importants sont restés légèrement effleurés ou carrément manquants dans les travaux disponibles parmi lesquels :

- une description fine et illustrée du paysage géographique ;
- une caractérisation plus poussée de la dynamique fluviale historique et des interactions milieux-sociétés ;

- un examen de la nature et l'intensité de l'activité géodynamique fluviale actuelle et récente (spatialisation de la mobilité des axes fluviaux et appréciation de son intensité) ;
- une étude diachronique et imagée de l'évolution du paysage fluvial au cours des trois derniers siècles et les risques fluviaux (fin du XIX^e – début du XXI^e siècle) ;
- une analyse des dynamiques hydrosédimentaires actuelles qui caractérisent les fonds de vallée ainsi que les menaces qui pèsent de nos jours sur les vestiges archéologiques qui leurs sont associés ;
- une compilation de données nouvelles, à partir de documents d'archives (fin du XIX^e – milieu du XX^e siècle), éclairant sur la gravité du phénomène d'inondation de même que sur les pertes et dégâts enregistrés faisant l'objet d'un inventaire détaillé ;
- enfin, une cartographie inédite des grandes inondations récentes survenues.

Cette thèse vise donc à apporter des éléments de réponse aux objectifs précédemment définis. Elle se compose de quatre parties, chacune divisée en deux ou trois chapitres, structurées selon un ordre chronologique. La première partie détaille les contraintes naturelles et humaines du milieu d'occupation à haut risque d'inondation. Son chapitre 1 décrit et explique le contexte géographique et géologique qui prédispose le territoire au phénomène d'inondation. Son chapitre 2 insiste sur la responsabilité de l'Homme dans l'aggravation et même le déclenchement des inondations. La deuxième partie s'occupe de l'évolution morphosédimentaire et morphodynamique des fonds de vallée ainsi que des liens nature-société. Son chapitre 3 donne une synthèse stratigraphique des dépôts quaternaires accumulés dans les plaines à partir des travaux antérieurs. Son chapitre 4 concerne l'évolution géomorphologique des paysages fluviaux au cours des temps historiques. Son chapitre 5 s'intéresse à la dynamique fluviale et ses rapports avec le risque fluvial depuis les Romains, à partir d'une approche géoarchéologique. La troisième partie se propose de quantifier la morphodynamique actuelle et les risques fluviaux, moyennant une approche géomatique et de terrain. Son chapitre 6 examine la nature et l'intensité de l'activité géodynamique fluviale ainsi que la part des facteurs naturels et anthropiques dans les mécanismes fluviaux. Son chapitre 7 révèle la dynamique érosive et sédimentaire actuelle comme la vulnérabilité des vestiges archéologiques face aux aléas naturels et humains. La quatrième partie s'attache à connaître l'histoire événementielle des grandes crues enregistrées récemment ainsi que les zones inondables. Son chapitre 8 expose les résultats du dépouillement des archives

textuelles et photographiques relatives aux crues permettant de dresser un inventaire chronologique des inondations mémorables, des pertes en vies humaines et des dommages occasionnés, avant de procéder à leur analyse. Son chapitre 9 s'applique à l'étude et la cartographie des inondations récentes majeures, grâce au couplage des données de terrain, SIG et télédétection. De l'observation directe à la cartographie numérique des résultats, en passant par la consultation de la documentation bibliographique, l'analyse sédimentologique et le traitement géomatique de données, l'approche de travail se veut systémique et interactive. Les missions de terrain ont été effectuées entre 2008 et 2017 en se servant des mêmes outils et accessoires (marteau, carnet de notes, caryons et marqueurs, décamètre, sacs à échantillons, GPS). Les analyses de laboratoire s'appuient principalement sur la granulométrie laser des sédiments à l'aide d'un granulomètre Laser *Mastersizer 2000* ainsi que sur la minéralogie des dépôts argileux par la technique rayons X sur un diffractomètre *PANalytical X'Pert PRO*. Deux datations radiométriques au ^{14}C AMS ont été également obtenues via le laboratoire *Beta Analytics* basé aux États-Unis en Floride. Les applications de géomatique utilisées sont variées et touchent aux domaines du SIG, de la télédétection et de la géostatistique. Voilà les principaux éléments méthodologiques dont les précisions seront données dans chaque partie et chapitre.

Première partie

Le système fluvial de la moyenne Medjerda : un milieu favorable au risque d'inondation

Chapitre I. L'eau, la roche, le relief

Chapitre II. Le bâti, le barrage

Introduction

Compris entre la ville de Ghardimaou et la ville de T'borba, le terrain d'étude, se trouvant administrativement à la rencontre de trois gouvernorats (Jendouba, Beja, Mannouba), fait partie du bassin-versant de la vallée de la Medjerda (24000 km²) dont les deux tiers sont au nord du Tunisie et le reste à l'est de l'Algérie (fig. 1. A). Il correspond à la majeure partie de la vallée alluviale s'étendant sur 297 km de longueur et 8 km de largeur environ avec 2158 km² de superficie, où s'écoule l'oued Medjerda, le cours d'eau le plus important du pays, et ses affluents montagnards (fig. 1. B). La topographie consiste en de vastes dépressions dissymétriques presque sans pente, bordées au nord et au sud par des reliefs peu élevés mais énergiques. Les formations géologiques qui y affleurent, dont les marges actives sont soumises à diverses actions tectoniques (régimes distensifs et compressifs), sont majoritairement tendres (à dominante argilo-sablo-limoneuse) et d'âge quaternaire. Les nappes alluviales du fond de vallée sont entaillées par de nombreux oueds confluents méandriques, généralement larges et profonds. Les versants sont découpés par un réseau hydrographique souvent dendritique où les branches supérieures se raccordent à de grands organismes proches (dizaines de kilomètres) et lointains (centaines de kilomètres). Les apports des oueds dépendent directement des caractéristiques climatiques qui se distinguent par la modestie et la forte variabilité spatio-temporelle des pluies. En effet, la région n'est pas à l'abri des excès pluviométriques dus à des averses persistantes à épisodes multiples. À l'occasion des événements exceptionnels, d'énormes volumes d'eau, chargés en sédiments, empruntent les sections des oueds en crue et envahissent les terres déprimées. Ils posent de graves problèmes de stagnation d'eau et d'inondation très gênants pour la vie de la population. Mais une large part de responsabilité incombe aussi à l'Homme dans l'accentuation de son emprise sur le milieu fluvial surtout à l'ère de l'Anthropocène (du XIX^e au XXI^e siècle). Cette responsabilité apparaît à travers le fort développement de l'habitat sur des aires franchement inondables ou aux abords des cours d'eau et même dans les lits fluviaux. Elle apparaît aussi à travers l'endiguement de la plupart des organismes hydrographiques conduisant à la perturbation des écoulements. Cette partie décrit et explique, avec documents cartographiques et photographiques à l'appui, le contexte géographique et géologique de la moyenne vallée de la Medjerda qui la prédispose aux crues et aux inondations. Elle insiste également sur le rôle grandissant de l'Homme dans la genèse et l'aggravation du risque d'inondation. Outre l'emploi des supports de base comme la carte topographique et la carte géologique, le travail se fonde sur l'observation directe des

formes du terrain ainsi que sur l'exploitation des documents de synthèse établis à l'aide des applications géomatiques.

Chapitre I. L'eau, la roche, le relief

Il s'agit de la topographie, de la lithologie, de l'hydrographie et avant tout de la pluviométrie. La combinaison de leurs effets produit fréquemment de dangereux débordements des eaux affectant différentes concentrations humaines.

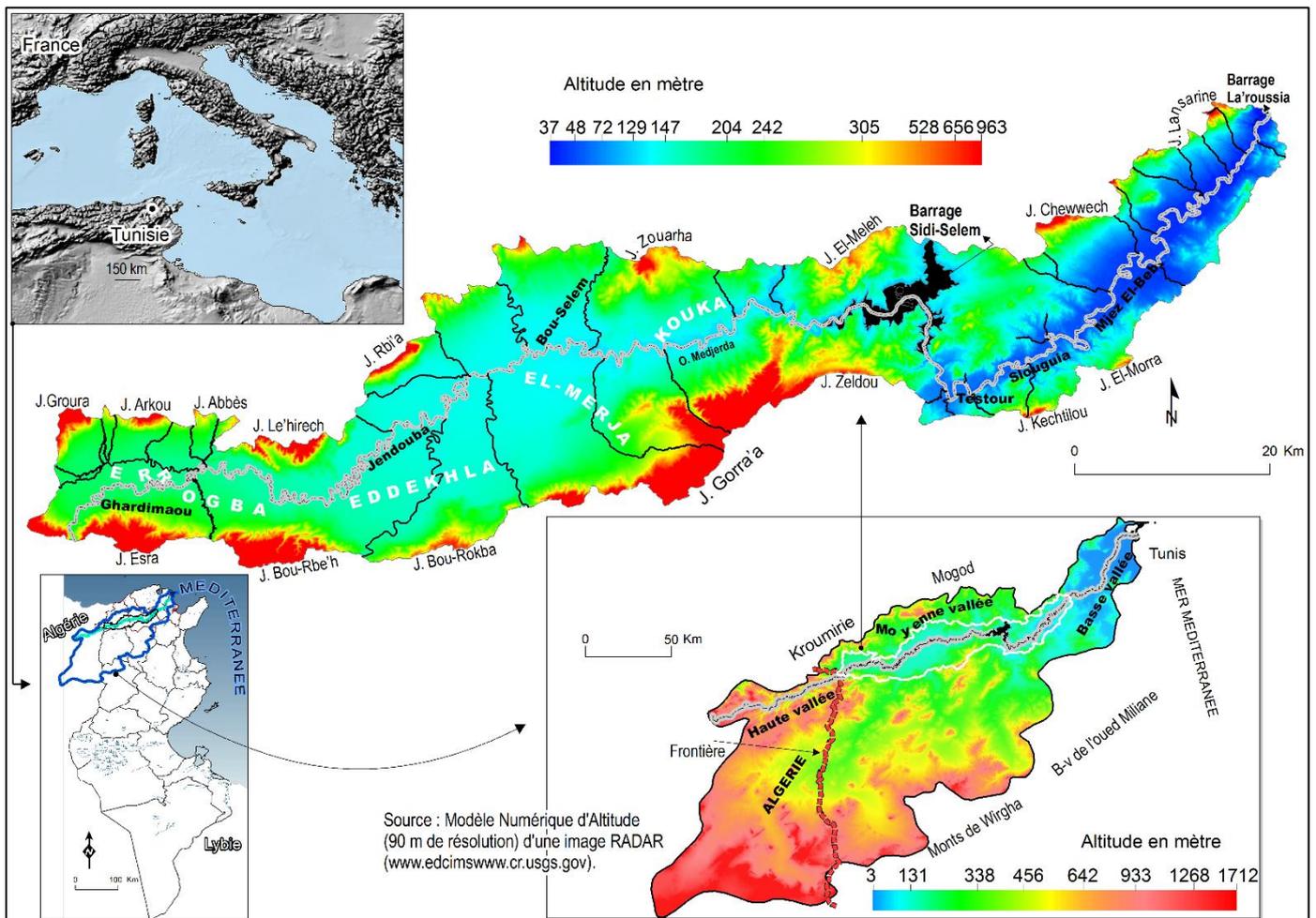


Fig. 1. Images hypsométriques en équidensités colorées montrant les reliefs du bassin-versant de la vallée de la Medjerda et de sa partie moyenne, objet de l'étude.

I.1. Des plaines plates et étendues encadrées par des alignements montagneux assez hauts et exigus à versants souvent pentus

La moyenne vallée de la Medjerda est naturellement scindée en deux parties séparées par le barrage-réservoir de Sidi-Selem qui occupe une sorte de gorge au relief accidenté (fig. 1 et 2). La partie amont comprend, de l'ouest vers l'est, les régions de Ghardimaou-Jendouba et de Sidi-Smail-Bled Kouka (Beja sud). Elle peut être subdivisée en deux secteurs, compte tenu de ses caractéristiques topographiques et morphologiques. Le premier secteur, dénommé « Errogba » (cou) à proximité de la frontière du pays par allusion à un chameau accroupi tendant le cou vers l'Algérie (Monchicourt, 1913, p. 26), est compris entre la ville de Ghardimaou et le village de Sidi-Meskine (S1, fig. 2). Le second, plus vaste, appelé « Eddekhla » (entrée) par la population locale pour exprimer ce qui est central, est situé entre l'agglomération de Jendouba et le village de Mestouta (S2, fig. 2). En revanche, la partie aval existe en contrebas de la retenue de Sidi-Selem (S3, fig. 2) et couvre les terrains de Testour, Slouguia, Mjez El-Beb jusqu'à T'borba (S4, fig. 2) ; ce dernier marque la limite ouest de la basse vallée de la Medjerda. Quatre secteurs sont alors définis en vue d'une présentation topographique, suivant une logique amont-aval et rive droite-rive gauche.

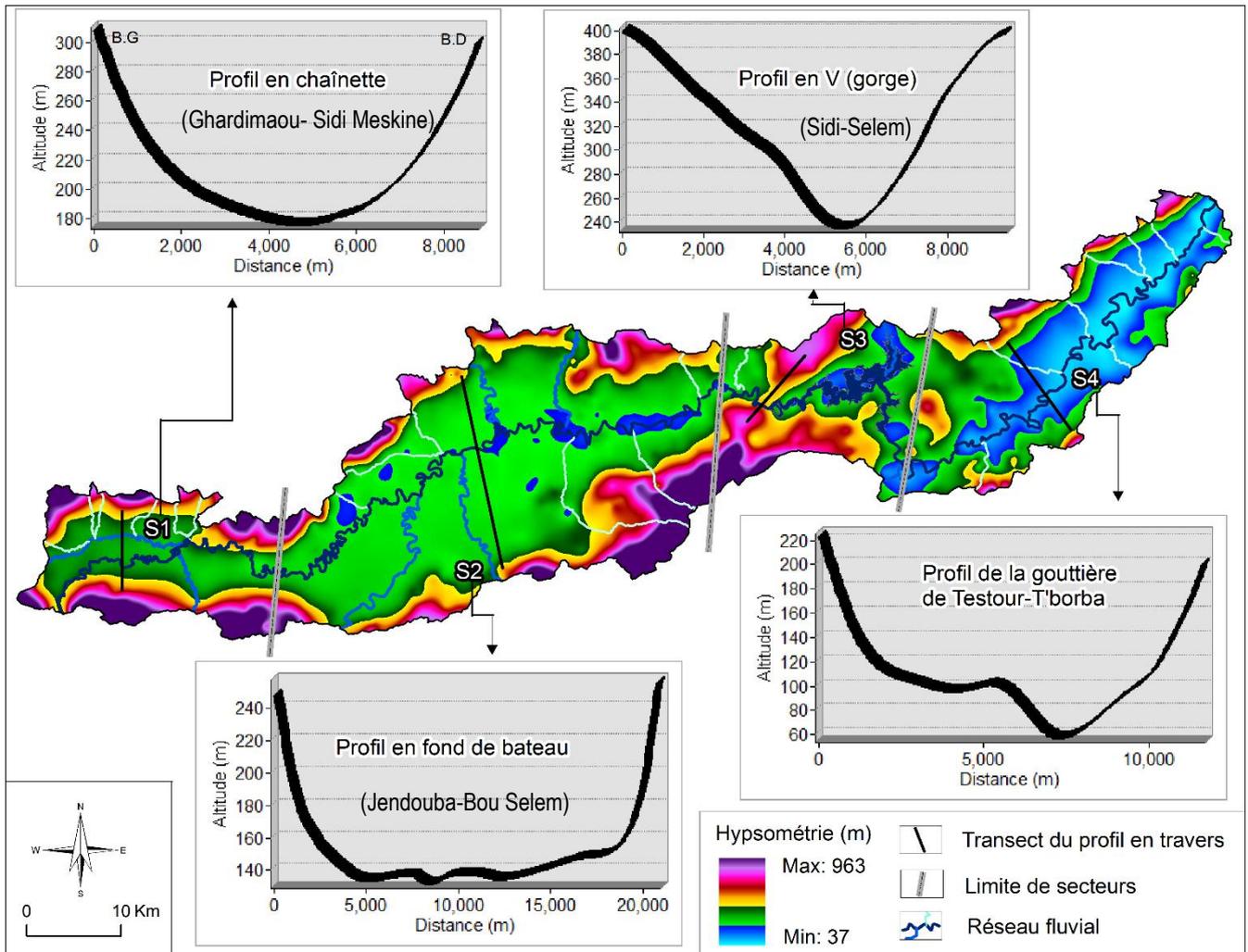


Fig. 2. Sectorisation du cours moyen de la vallée de la Medjerda (4 secteurs).

I.1.1. Le secteur compris entre Ghardimaou et Sidi-Meskine (S1)

Il s'étend sur 26 km de long depuis l'entrée de l'oued Medjerda dans le territoire tunisien, à 4 km de la station frontière de Ghardimaou, jusqu'à l'amont de la ville de Jendouba (distance parcourue 64 km). Il présente une portion de vallée dissymétrique, d'environ 6,5 km de largeur et 1,65 % de pente moyenne, à fond plat, bordé par de petites lignes de crêtes dont les versants assez raides et griffés de ravins se font face (fig. 3).

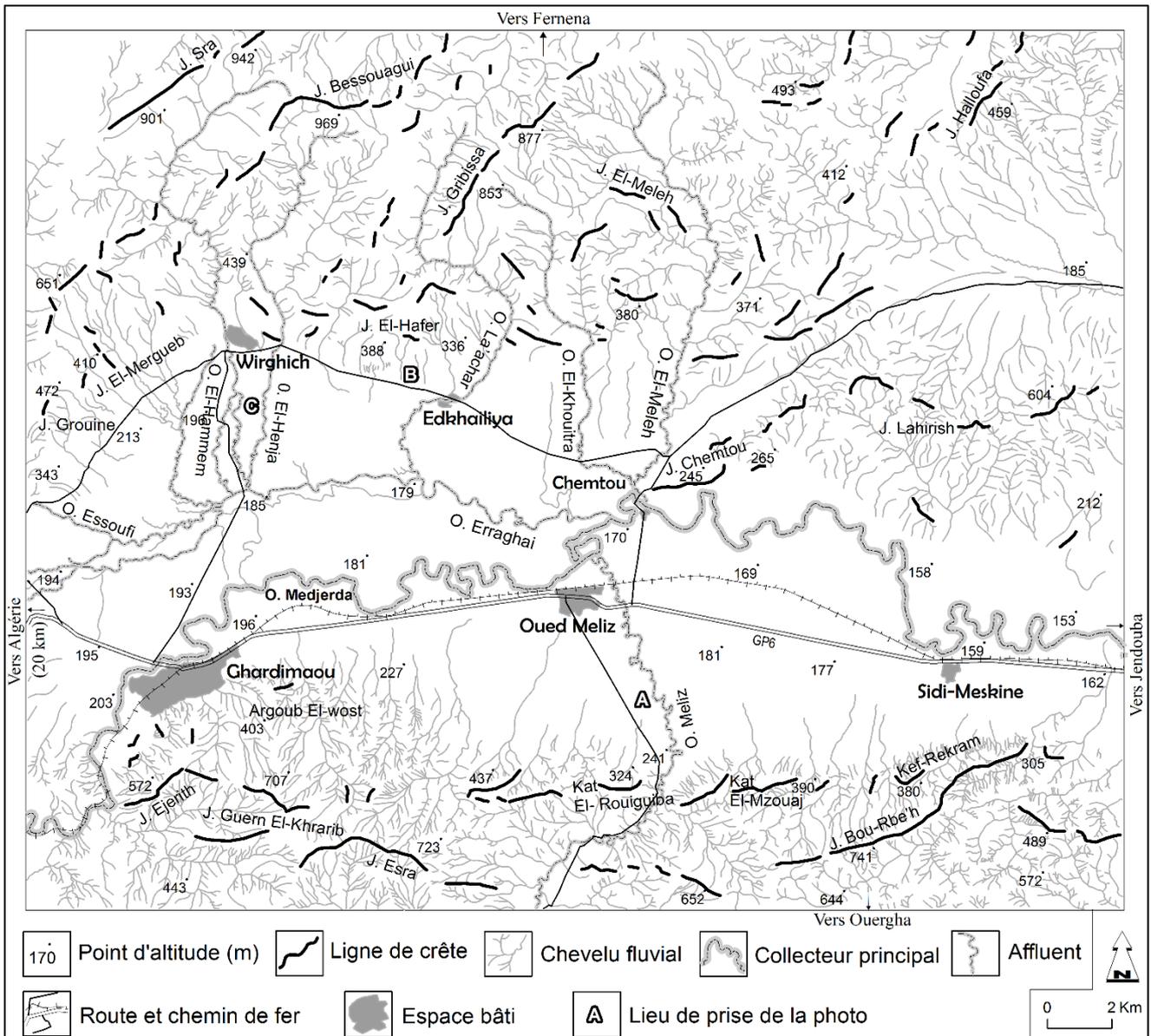


Fig. 3. Cadre orohydrographique du secteur de Ghardimaou-Oued Meliz-Sidi Meskine (S1).

I.11.1. La rive droite

Elle comporte des ensembles montagneux d'environ 25 km de long et 3 km d'envergure, constitués essentiellement de deux séries de lignes de crêtes parallèles et d'inégales hauteurs. La première série de crêtes mineures, dominant directement la vallée, est formée de petits Jbels qui culminent à une altitude moyenne de 387 m (Argoub El-Wost, 403 m ; Kat El- Rouiguiba, 324 m ; Kat El-Mzouaj, 390 m ; Kef-Rekram, 380 m). La deuxième série de crêtes majeures est représentée par des sommets hauts qui s'élèvent en moyenne à 686 m d'altitude (J. Ejerith, 572 m ;

Guern El-Khrarib, 707 m ; J. Esra, 723 m ; J. Bou-Rbe'h, 741 m). Le profil longitudinal fait apparaître plusieurs discontinuités dues à la présence de nombreux cours d'eau qui l'incisent, parmi lesquels seul l'oued Meliz le traverse de part en part. Le profil transversal présente des versants septentrionaux irréguliers car fortement affectés par le ravinement, où les valeurs de pente oscillent entre 9,3 et 20,8 %. Au bas des versants, s'étendent de vastes plateaux qui relient sur quelques hectomètres à 3 km les massifs montagneux aux plaines. Ils montrent le maximum de leur extension dans la partie centrale, grâce aux apports de l'oued Meliz le seul affluent de l'oued Medjerda de ce côté. Leur surface, située entre 200 et 250 m d'altitude et légèrement inclinée vers le nord en direction de l'artère principale, s'avère assez régulière en raison de la faiblesse des pentes (< à 4 %) et de la rareté des cours d'eau qui l'entaillent. Les plaines, d'altitude moyenne de 177 m et de largeur variable entre 1 et 3,5 km, se caractérisent par une topographie monotone très peu vallonnée où les pentes sont très faibles souvent inférieures à 0,20 % (photo 1). Elles abritent quatre agglomérations à savoir Ghardimaou, Oued Meliz, Chemtou et Sidi-Meskine dont le développement est en rapport avec l'axe routier de la GP6.



Photo 1 (A sur fig. 3). Vue depuis la berge droite du cours aval de l'oued Meliz en regardant vers le relief dominant de Guern El-Khrarib et de Esra (x : 462077 ; y : 4032724). Elle montre une vaste plaine presque sans pente, mis à part des anciens talus, exploitée en céréales jusqu'aux pieds des versants ravinés où l'on reconnaît un silo à l'arrière-plan (photo : L. Lahmar, 8/11/2008).

I.1.1.2. La rive gauche

Elle comprend des massifs montagneux vigoureux composés de deux à trois alignements de crêtes dont celles qui surplombent immédiatement la vallée sont peu élevées (J. Grouine, 472 m ; J. Mergueb, 410 m ; J. El'Hafer, 388 m). D'où l'apparition des parties sommitales des reliefs à l'arrière-plan qui sont plus hauts (J. Sra, 942 m ; J. Bessouagui, 969 m ; J. Gribissa, 853 m). L'ensemble montagneux, d'environ 7,5

km de largeur maximale, s'étend sur une distance de 23 km et décrit une ligne courbe dont les extrémités appartiennent à Jbel Grouine (472 m) vers l'ouest et à Jbel Lahirish (690 m) vers l'est. Les crêtes sont découpées par de nombreux oueds encaissés et ramifiés qui ont tendance à s'élargir avant même de déboucher en plaine et rejoindre l'artère fluviale principale. Les versants méridionaux présentent une allure générale concave et des pentes fortes variant de 8 à 20 % mais souvent supérieures à 16 %. La zone des piémonts, en contrebas des versants, s'étend globalement entre la courbe de niveau de 230 m et celle de 190 m. Elle correspond à des plateaux étendus d'une superficie approximative de 34 km² et d'une largeur moyenne de 1,6 km. Ce sont des surfaces planes, légèrement pentues (< à 3 %) et qui s'abaissent doucement vers le sud-est (photo 2). Elles sont entaillées par sept affluents puissants au bord desquels se sont implantées certaines agglomérations comme celles de Werghich sur l'oued El-Hammem et celle de Ettahma (Edkhailiya) sur l'oued El-Henja, qui signifient respectivement fait de violence et de mouvement. Les plaines sont circonscrites aux lits des collecteurs principaux de la Medjerda et d'Erraghai ainsi que des affluents latéraux. Elles se situent à 171 m d'altitude moyenne et s'étalent sur environ 2,85 km de largeur. Elles se caractérisent par une platitude quasi parfaite si bien que les pentes sont extrêmement faibles et ne dépassent pas 0,15 % (photo 3).



Photo 2 (B sur fig. 3). Une vue de versant à versant à travers la vallée de la Medjerda à Ghardimaou, prise depuis le versant sud de Jbel El'Hafer à Kef Edhba'a à 1,5 km de douar Edkhailiya (x : 455468 ; y : 4041466 ; photo : L. Lahmar, 23/6/2009).



Photo 3 (C sur fig. 3). Vue prise depuis des ruines archéologiques sur la rive gauche de l'oued El-Hammem à El'Hfeya 2 (x : 451521 ; y : 4039987) en direction du village de Werghich (El-Guel'a) au nord (photo : L. Lahmar, 13/6/2009).

I.1.2. Le secteur compris entre Jendouba et Mestouta à l'amont du barrage-réservoir de Sidi-Selem (S2)

Le territoire s'étire sur 47,8 km, depuis l'aval de Sidi-Meskine (Jendouba) jusqu'à l'amont de la retenue du barrage de Sidi-Selem (Beja sud). Il se compose d'une vaste dépression dissymétrique, à fond plat et marécageux et au sein de la quelle coule l'oued Medjerda et ses affluents, encadrée par un relief montagneux et collinaire à crêtes courtes, nombreuses, grossièrement parallèles, et à versants assez pentus et très découpés. Le paysage correspond à un openfield avec un habit aggloméré et dispersé le long des axes de communication (fig. 4).

grossièrement parallèles entre elles et orientées SW-NE. Les premières crêtes, basses à profil sinueux, qui bordent le fond de la Medjerda sont à des altitudes relativement voisines, de 307 à 476 m, exceptionnellement plus dans les Jbels de Sfa-El-H'nencha (545 m), de Sfa-El-Whaibia (528 m), et de Djebba (600 m) qui dépassent de peu 500 m. Elles forment cependant une barrière sérieuse par leur massivité liée à l'importance du talus de raccordement, atteignant près de 218 m de dénivellation et révélant des valeurs de pentes assez élevées variant de 7 à 20 %. Au pied de ces lignes de hauteurs, s'observent des plateaux de faible étendue qui s'inclinent vers le NW de 200-250 m à 160-180 m environ. Ils se caractérisent par des pentes faibles (< à 4 %) et par des surfaces peu accidentées par des cours d'eau faiblement incisés, en dehors des oueds de Mellègue et de Tessa (photo 4). Ils dominent des plaines alluviales par un talus de 10 à 26 m de commandement. Ce sont globalement les plaines d'accumulation marécageuses d'Eddekhla et d'El-Merja qui se présentent comme un vaste plan, élargi au centre et rétréci à l'est et dont la largeur varie de 1 à 10 km ; seuls quelques bossellements portant souvent des traces d'occupation antique l'interrompent ici et là surtout à El-Merja. Elles s'inclinent généralement vers le NE, de 155-143 m à 123-130 m environ, en pente infime avoisinant 0,7 ‰, ce qui explique en partie les difficultés de drainage et les sinuosités que décrivent l'artère maîtresse de la Medjerda et ses principaux affluents d'oueds Mellègue, Tessa et Tibar qui l'entaillent. Elles offrent un paysage de champs ouverts à grandes et très grandes parcelles avec un habitat groupé en villes et villages-rues comme à Jendouba, à Sidi-Smaïl et à Mestouta (photo 5).



Photo 4 (A sur fig. 4). Vue sur la rive droite de l'oued Mellègue depuis le fond de son lit, à 900 m à l'Est de Sidi-Ameur en face de la localité d'Errhaimiya (x : 485575 ; y : 4038054). Au dernier plan, le chaînon montagneux de Bou Rokba-Dawwess sous forme de deux alignements domine nettement la large dépression de Ain El Karima-El'itha (photo : L. Lahmar, 30/11/2013).



Photo 5 (B sur fig. 4). Vue en légère plongée depuis l'ancien pont de la Medjerda à Sidi-Smail, montrant le paysage géographique de la rive droite (x : 509703 ; y : 4050249). Noter l'aspect imposant du relief montagneux en bordure sud de la vallée malgré la modestie des altitudes (photo : L. Lahmar, 24/7/2009).

I.1.2.2. La rive gauche

Elle est formée d'une région de crêtes souvent courtes, peu continues et sans ordre, qui occupent une bande de 12 km de largeur moyenne. Les sommets se tiennent généralement entre 223 et 976 m, le point culminant est de 1037 m à Jbel Bou-Guenda dans l'extrémité nord-ouest du paysage montagneux, là où les altitudes sont les plus élevées. À partir de ces lignes de hauteurs, un chevelu hydrographique dense et hiérarchisé prend naissance et rejoint des grands oueds comme Bou-Hertma, Kesseb et Beja qui confluent à leur tour plus à l'aval avec l'axe fluvial de la Medjerda (photo 6). Le deuxième trait dominant du relief est l'existence d'une topographie de petits Jbels et de collines parfois juxtaposées bordant la vallée, ce qui lui confère un aspect aéré (photo 7). D'ouest en est, les crêtes sont basses si bien que les sommets se situent en moyenne autour de 311 m, à l'exception de Jbel Rbi'a (627 m), et s'abaissent progressivement en direction du barrage-réservoir de Sidi-Selem. Elles exposent du côté sud des versants souvent longs, concaves, et faiblement pentus (moins de 6 %), hormis les parois raides de Jbel Rbi'a (jusqu'à 30 %). À la base de tels versants se présentent des plateaux au modelé monotone, où les cotes se tiennent aux alentours de 150-180 m et les pentes sont fréquemment inférieures à 3 %. Ils sont mollement vallonnés et drainés en direction du SE (photo 8). Le contact avec les plaines en contrebas se fait par un talus d'une dizaine de mètres. Il s'agit grosso modo des étendues basses et planes de Ben-Bechir, de Bou-Selem-A'ssela et de Kouka, à largeur moyenne de 3,80 km, à altitude voisine de 137 m, et à pente presque nulle de 0,35 ‰. Elles sont parcourues de nombreux oueds tributaires de la Medjerda comme les grands oueds de Bou-Hertma, de Kesseb et de Beja. C'est un paysage aux horizons largement ouverts à base de grandes cultures céréalières avec une faible occupation humaine, à part l'agglomération de Bou-Selem.



Photo 6 (C sur fig. 4). Vue en direction du nord de la ville de Jendouba depuis Sidi Dhawa (x : 481122 ; y :4041365), montrant l'aspect montagneux des hauteurs parallèlement alignées lié à la raideur des pentes contrastant avec la platitude de la surface alluviale (photo : L. Lahmar, 10/8/2008).



Photo 7 (D sur fig. 4). Exemple de reliefs en crêtes allongées et à caractère volumineux au Nord-est de l'oued Bou-Hertma (x : 491883 ; y :4057487 ; photo : L. Lahmar, 1/12/2013).



Photo 8 (E sur fig. 4). Exemple de topographie collinaire aux formes adoucies dans la région d'Erroumeni, située à 5 km au nord-est de la ville de Bou-Selem (photo : L. Lahmar, 22/7/2009).

I.1.3. Le secteur de part et d'autre de la retenue de Sidi-Selem (S3)

Il se localise entre le confluent de l'oued Beja et le marabout de Sidi Ali-Ben Selem à 5 km en amont de la ville de Testour et mesure 19 km de long sur 18,5 km de large. Il est parcouru par l'oued Medjerda, à méandres encaissés et de 43,6 km de longueur, qui coule dans le sens W-E puis N-S à travers un défilé à 80-110 m d'altitude et en pente faible de 1,32 ‰. Depuis 1981, ce cours d'eau est barré par la digue du barrage de Sidi-Selem, le plus grand ouvrage établi en Tunisie, qui occupe une superficie d'environ 36,85 km² (photos 9 et 10). Le relief qui l'enserme comprend principalement des massifs montagneux peu élevés (moins de 400 m en général) mais pourvus de crêtes souvent longues et de versants déclinés portant un chevelu fluvial développé (fig. 5).

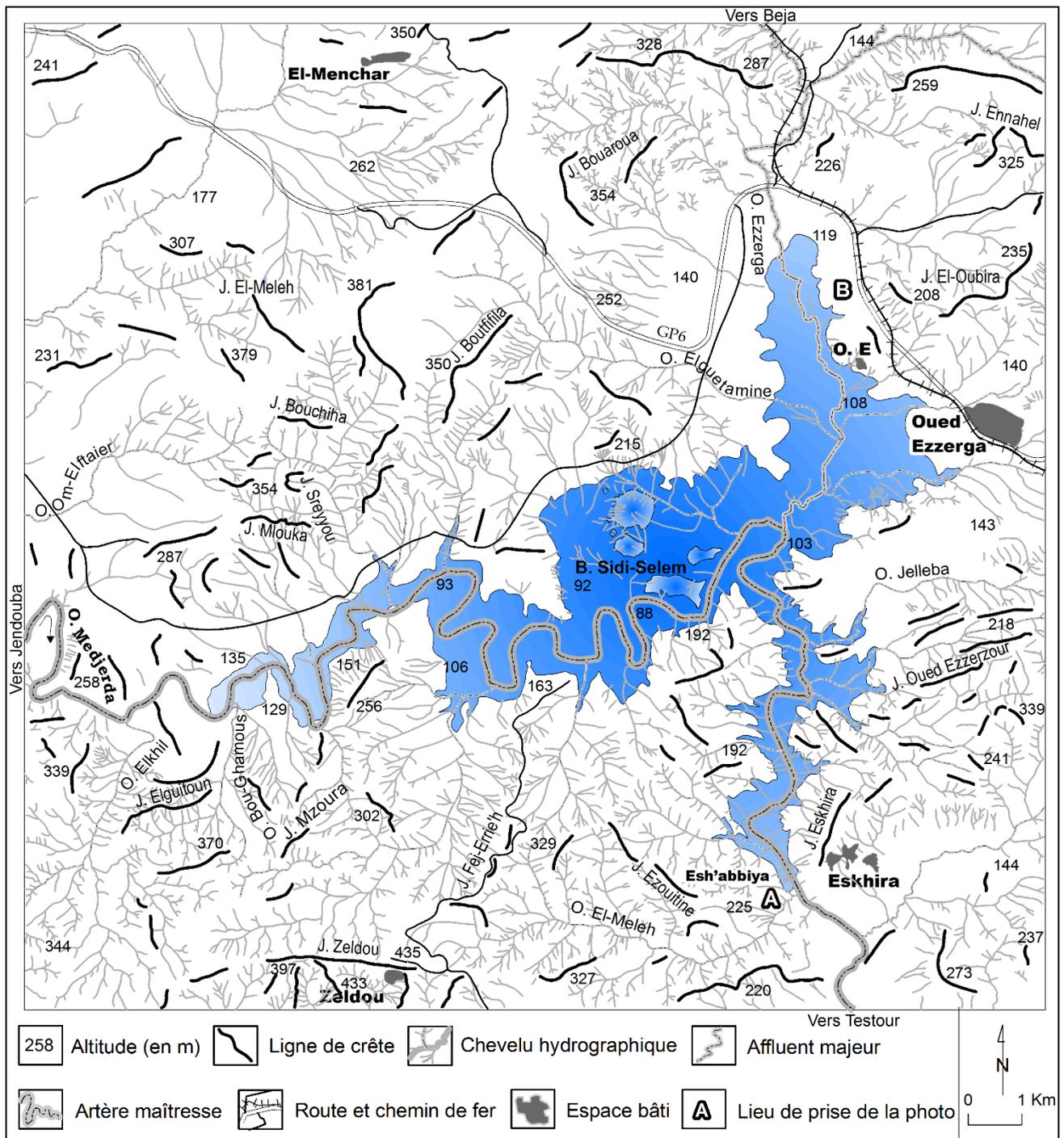


Fig. 5. Cadre topographique et hydrologique du secteur du barrage de Sidi-Salem (S3).

I.1.3.1. La rive droite

Elle possède un volume montagneux important doté de crêtes assez longues aux orientations variées qui sont à des altitudes relativement voisines, de 220 à 397 m, le point culminant est de 435 m à Jbel Zeldou (fig. 5). Les versants dessinent souvent un profil rectiligne puis convexe avec quelquefois des escarpements à la base, tandis

que leurs pentes oscillent entre 8 et 31 %. Ils sont découpés par un réseau hydrographique dense, ramifié, et généralement encaissé. Les principaux organismes qui les longent, comme les oueds d'El-Khil, de Bou-Ghamous, et d'El-Meleh par exemple, d'ailleurs tributaires de la Medjerda, ont des sections étroites aux parois abruptes et ravinées. Sur le plan de l'occupation du sol, de petites agglomérations comme Zeldou et Esh'abbiya sont installées sur des terres cultivées spécialement en céréales.



Photo 9 (A sur fig. 5). Vue sur la retenue de Sidi-Selem, immédiatement en aval de sa digue (photo : Ministère de l'Agriculture, 2015).

I.1.3.2. La rive gauche

Elle a une morphologie relativement aérée surtout au nord et à l'est. Les reliefs se présentent sous la forme de crêtes souvent assez longues, montrant non plus des alignements mais des linéaments discontinus. Celles-ci sont séparées par des cols et des dépressions traversés par des oueds, parfois en gorge, et par des voies de communication. Les altitudes n'excèdent pas 400 m, ce point culminant est relevé à Jbel El-Meleh et à Jbel Bou-Chiha. Ailleurs, elles se situent souvent entre 208 et 391 m (J. Mlouka, 271 m ; J. Sreyyou, 354 m ; J. Oued Ezzerzoum, 253 m). Les versants

sont courts et leurs pentes sont fortes, entre 7 et 37 %, soit une moyenne de 22 %. Ils sont découpés de ravins et petits torrents profonds aux berges abruptes. L'occupation du terrain s'organise selon de faibles concentrations humaines comme celles d'oued Ezzerga en ses deux sites, d'El-Monchar et d'Eskhira, où l'activité agricole principale menée par les occupants est la céréaliculture.



Photo 10 (B sur fig. 5). Vue sur le barrage de Sidi-Selem et son voisinage depuis la route reliant le village d'oued Ezzerga à la ville de Jendouba (photo : L. Lahmar, 14/1/2014).

I.1.4. Le secteur compris entre la ville de Testour et la ville de T'borba (S4)

Situé en aval de la digue du barrage de Sidi-Selem, ce secteur mesure 52 km de long sur 23 km de large (fig. 6). Le paysage morphologique d'ensemble est celui d'un couloir topographique au fond duquel coule l'oued Medjerda sur une longueur de l'ordre de 93,5 km et une pente d'à peu près 0,55 ‰, bordé par des reliefs montagneux et collinaires peu élevés (< à 500 m) à versants raides entaillés par un chevelu fluvial dense et hiérarchisé. Les parties les plus basses du relief sont le domaine de la céréaliculture, de l'arboriculture, des oliviers et des cultures maraîchères (photo 13).

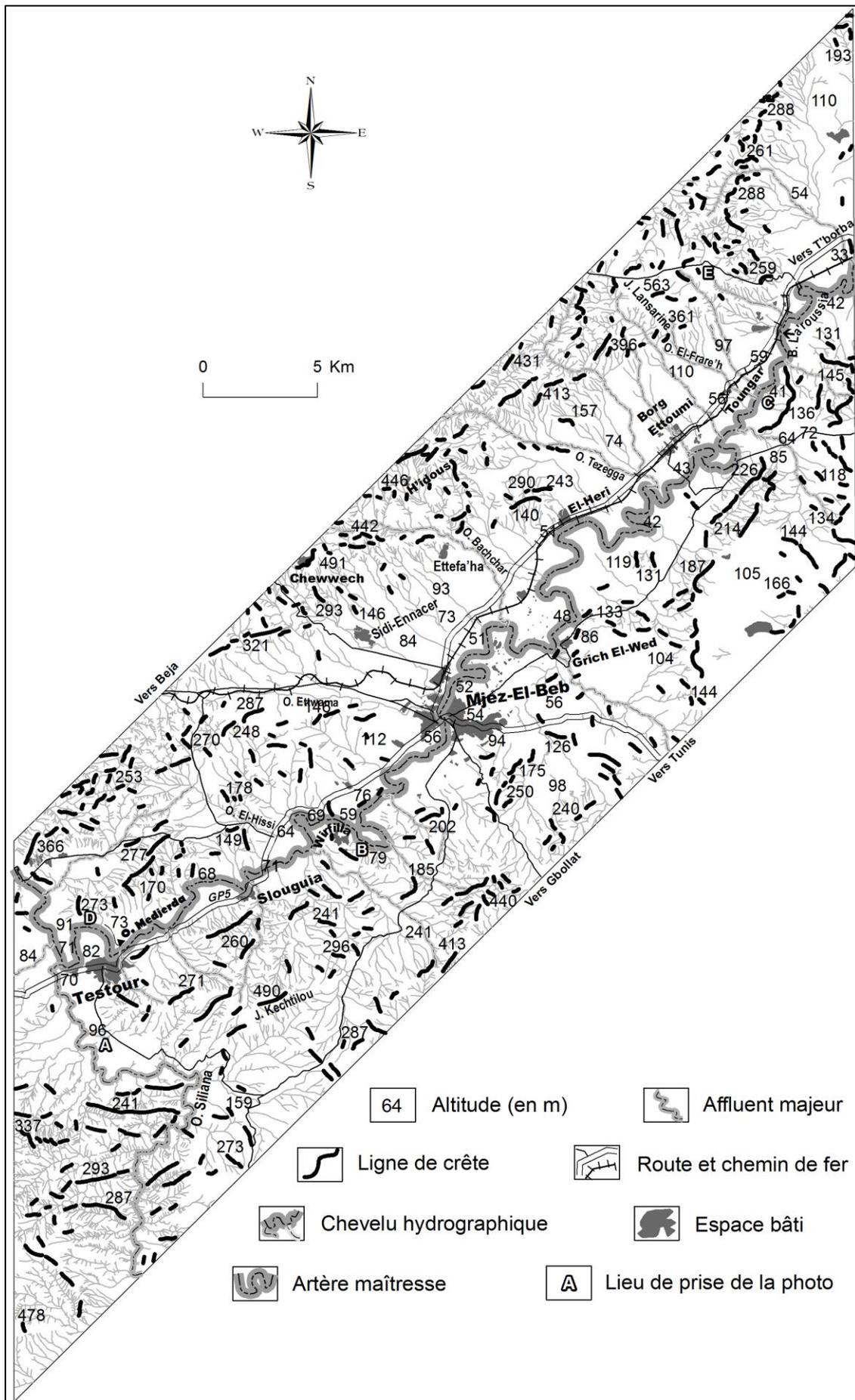


Fig. 6. Localisation et grandes lignes du paysage géomorphologique de Testour à T'borba (S4).

I.1.4.1. La rive droite

Elle inclut des ensembles montagneux et collinaires espacés, de 10 km de largeur moyenne, ayant une morphologie relativement aérée et un réseau hydrographique peu développé. Les reliefs montrent un système de crêtes discontinues, atteignant 244 m de hauteur moyenne, l'altitude culminante est de 490 m à Jbel Kechtilou, séparées par des dépressions au sein desquelles coulent des oueds souvent profonds et passent des voies de communication. Ils exposent également des versants pentus (jusqu'à 28 %) qui dominent, en différents endroits, par des parois escarpées le lit fluvial de la Medjerda. Les topographies de plateaux situées au-dessous de tels reliefs se tiennent aux alentours de 70-90 m. Elles présentent des surfaces légèrement pentues (< à 5 %) mais assez vallonnées, si bien qu'elles s'apparentent à des croupes molles appelées localement « Argoub ». Les terrains plus bas correspondent à des plaines alluviales étroites, d'environ 1,1 km de largeur moyenne, qui atteignent le maximum de leur étendue au niveau de la ville de Mjez El-Beb (photos 11 et 12). Leur altitude se situe le plus souvent entre 80 et 50 m tandis que leur pente est très faible avoisinant 0,85 ‰. Ils sont occupés par d'importantes agglomérations telles que Testour, Slouguia, Wirfella, Mjez El-Beb, Grich El-Wed, qui se succèdent le long de l'axe fluvial de la Medjerda.



Photo 11 (A sur fig. 6). Vue sur le méandre hypertrophié de la Medjerda au lieu-dit Eddeghra (x : 550495 ; y : 4050172), dominé par un relief très proche de l'oued et peu élevé mais pentu et fort (photo : L. Lahmar, 13/1/2014).



Photo 12 (B sur fig. 6). Vue sur le cours aval de l'oued Siliana, l'affluent le plus grand du secteur d'étude, à 4 km avant sa rencontre avec la Medjerda (x : 538843 ; y : 4041358). Noter, d'une part, l'ampleur de la section du cours d'eau qui n'apparaît ici que partiellement et d'autre part, l'imprudence et l'insouciance de l'Homme vis-à-vis des risques d'inondation et d'érosion (photo : L. Lahmar, 13/1/2014).



Photo 13 (C sur fig. 6). Exemple de relief collinaire et montagneux à différentes positions bordant l'oued Medjerda, et terres agricoles, en contrebas, se composant de plantations d'oliviers, d'arbres fruitiers et d'artichauts (vue depuis le versant nord de Kalaat Eddemous au lieu-dit El-Ma'hfoura, x : 568006 ; y : 4069831 ; photo : L. Lahmar, 26/4/2008).

I.1.4.2. La rive gauche

Elle contient des reliefs montagneux modestes, de largeur variable de 2 à 6 km, à crêtes courtes dont les altitudes oscillent entre 146 et 491 m ; le point culminant est de 563 m à Jbel Lansarine. Ils sont parcourus par de multiples oueds profonds à

chevelu hydrographique important, d'où l'abondance des sources qui semblent expliquer le peuplement ancien de la région autour des villages de Toukeber, de Chewwech et de H'idous (fig. 6). Les versants montagneux sont tantôt rapprochés, tantôt écartés de la vallée principale de la Medjerda, et leurs pentes varient de 5 à 25 % avec une moyenne de l'ordre de 16 %. Le contact avec le lit de la Medjerda s'établit soit directement par des parois abruptes comme aux environs de Testour et Slouguia (photo 14), soit par l'intermédiaire de vastes plateaux visibles surtout à Sidi Ennacer, à Borj Ettoumi et à Toungar (photo 15). Ces plateaux s'inscrivent dans une tranche altitudinale comprise entre 60 et 120 m où les pentes sont douces, proches de 2,46 %, et légèrement inclinées vers le SE. Ils sont entaillés par de nombreux cours d'eau souvent encaissés (O. El-Hissi, O. Ettwama, O. Bachchar, O. Tezegga, O. El-Frare'h), rejoignant l'artère maîtresse de drainage. Leur surface porte des établissements humains regroupés en petits villages comme ceux de Sidi-Ennacer, d'Ettefa'ha ou de Toungar. En position basse se trouvent des plaines alluviales étroites dont la largeur moyenne est de 1,22 km, bordant du côté gauche le lit fluvial. Elles se caractérisent par des altitudes basses variant entre 72 et 37 m, et des pentes infimes avoisinant 0,83 ‰. Toutefois, quelques monticules isolés, d'une hauteur moyenne de 15 m, ainsi que des talus de berge les accidentent par endroits. Sinon, ce sont plutôt des terres déprimées inondables, d'où la faible densité d'occupation humaine, mise à part la partie nord de la ville de Mjez El-Beb.



Photo 14 (D sur fig. 6). Vue sur la vaste boucle du méandre façonné par l'oued Medjerda à Testour, passant vraiment au pied du versant sud de Jbel El-Hendi, haut de 273 m (x : 538472 ; y : 4046613 ; photo : L. Lahmar, 3/1/2014).



Photo 15 (E sur fig. 6). Vue depuis le sommet d'Erragouba Ettouila vers le barrage de dérivation de La'roussia établi sur l'oued Medjerda (x : 566555 ; y : 4074318). Au premier plan, un versant sud peu pentu et assez couvert par la végétation mais découpé par des entailles encaissées dans des affleurements triasiques. Au second plan, la topographie relativement régulière de la plaine et mise en valeur agricole du territoire par des groupes humains (photo : L. Lahmar, 1/3/2008).

Conclusions

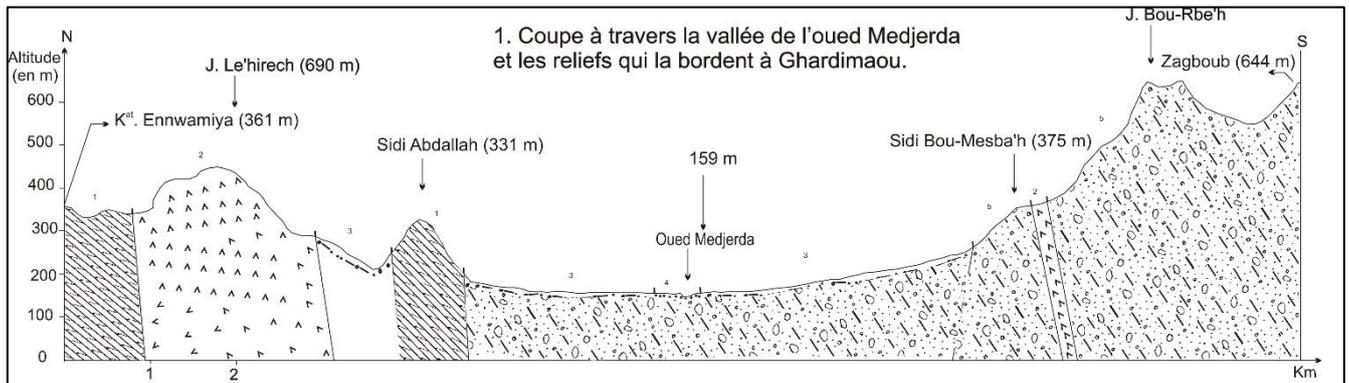
Il apparaît donc que la morphologie de la vallée moyenne de la Medjerda favorise nettement les risques liés aux eaux notamment ceux des inondations. Elle montre des vastes plaines alluviales basses et à très faibles pentes, bordées au nord et au sud par des reliefs de forte énergie. Les plaines sont parcourues par plusieurs grands oueds confluents, dont l'axe principal est celui de la Medjerda, sur les bords desquels et aux environs s'installent de nombreuses populations humaines. Ce sont des terres souvent facilement inondables et à drainage naturel difficile. Les versants sont assez raides et fortement découpés, si bien que certains d'entre eux sont séparés par d'assez amples vallées perçant de part en part les crêtes peu élevées.

I.2. Des formations géologiques jeunes et tendres

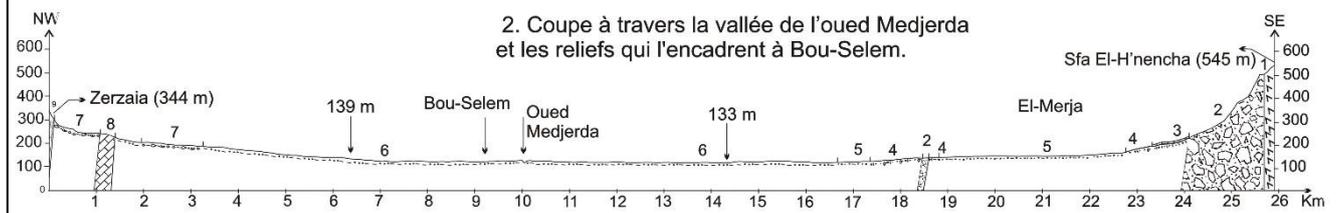
Le bassin fluvial de la moyenne Medjerda correspond à une avant fosse molassique néogène péri-alpine, limitée au nord par le domaine des nappes de charriages et au sud par la zone des diapirs (Rouvier, 1977 ; Ghanmi, 1980 ; Ben Ayed, 1986 ; Ould Begga, 2006 ; fig. 9). Il se présente aussi comme un fossé d'effondrement d'âge plio-quadernaire (Castany, 1954 ; Gottis et Sainfeld, 1955). Les terrains sédimentaires qui le constituent sont récents et s'étendent du Trias au Quaternaire (fig. 7 et 8). Les formations les plus anciennes (Trias-Oligocène) n'occupent que de faibles superficies (13,12 %) et affleurent la plupart du temps sur les reliefs montagneux. Or, les formations récentes sont largement dominantes et couvrent environ 1852,2 km², soit 85,79 % de la surface totale (2158,74 km²). L'examen des différentes cartes géologiques couvrant la région d'étude ainsi que leur notice permet de ranger, sur le plan de litho-résistance, les formations lithostratigraphiques en trois ensembles d'extension et de matériaux variables.

I.2.1. Une extension réduite des affleurements résistants

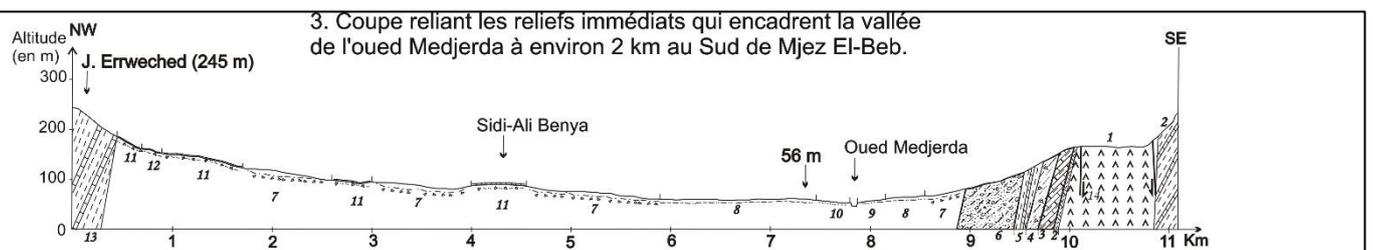
Ils correspondent à des roches dures et homogènes, essentiellement des calcaires et des dolomies. Ils appartiennent aux séries du Jurassique à l'Eocène, et constituent l'ossature des principales formes structurales. Leur superficie est faible et ne dépasse pas 5 % du total des affleurements, soit 100,65 km². Le Jurassique, dont l'épaisseur est supérieure à 400 m, apparaît spécialement à Jbel Chemtou et Kef El-Agueb à Jendouba. Le Crétacé, ayant au moins 3200 m d'épaisseur (Gottis et Sainfeld, 1955), s'observe au Nord de Bou-Selem à Balta Bou'awen (Jendouba) et au Nord de Testour et Mjez El-Beb (Beja). L'Eocène, atteignant au minimum 150 m, se voit aussi bien au nord de la ville de Jendouba et de Bou-Selem que dans la région de Amdoun, de Beja sud et de Mjez El-Beb. Le Miocène, surtout le Miocène supérieur et le Pliocène, affleure dans le bassin de Jendouba et celui de Testour, où les formations font plus de 2000 m d'épaisseur (communication orale de Zargouni, 2021).



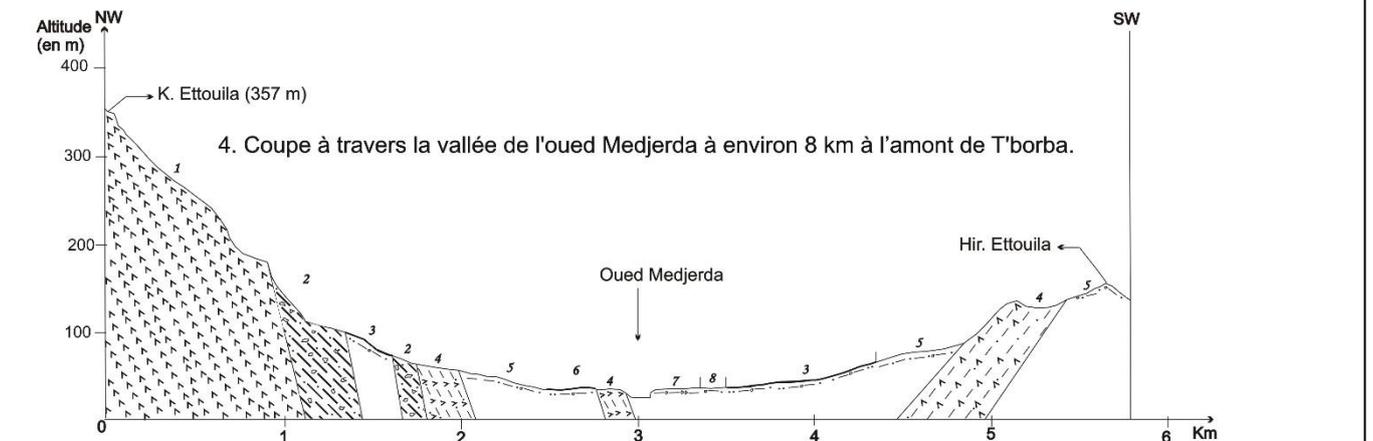
- 1- Dolomies, lias et marbres d'âge jurassique
- 2- Shistes de Le'hirech d'âge permo-triasique
- 3- Alluvions anciennes (limons, argiles, cailloutis et graviers)
- 4- Alluvions actuelles des oueds
- 5- Argiles, marnes, grès et conglomérats d'âge miopliocène



- 1- Trias : dolomies, gypses, calcaires et argiles
- 2- Messinien-Pliocène : conglomérats, argiles et sables
- 3- Quaternaire moyen : croûtes et encroûtements
- 4- Quaternaire indifférencié
- 5- Actuel : sols, limons et argiles
- 6- Alluvions actuelles des oueds
- 7- Éboulis de pentes et recouvrement divers
- 8- Cénomaniens supérieurs-Turonien inférieur : calcaires (faciès Bahloul)
- 9- Campanien supérieur : calcaires (faciès Abiod)



- 1. Trias : argiles, dolomies et gypses ; 2. Cénomaniens inférieurs à moyens : alternances de marnes grises et de calcaires en plaquettes ; 3. Campanien-Maastrichtien : marnes et calcaires ; 4. Eocène supérieur : argiles avec rares intercalations carbonatées à la base ; 5. Oligocène : calcaires gréseux et argiles ; 6. Messinien-Pliocène : conglomérats, sables et argiles ; 12. Pléistocène inférieur : argiles sableuses à concrétions carbonatées et croûtes calcaires feuilletées ; 11. Pléistocène moyen : sables silteux à concrétions carbonatées et croûtes calcaires feuilletées ; 7. Pléistocène supérieur : argiles sableuses et lits de graviers ; 8. Holocène : argiles sableuses grisâtres à brunâtres ; 9. Holocène-Actuel : argiles et sables de méandres abandonnés ; 10. Actuel : silts fins de zone inondable ; 14. Faille.



- 1. Trias : grès, argiles, dolomies et gypses ; 2. Messinien continental : marnes, marnes sableuses et conglomérats ; 3. Pléistocène moyen : marnes sableuses à croûtes calcaires ou encroûtements à nodules calcaires ; 4. Pléistocène : argiles gypseuses à la base et grès jaune au sommet ; 5. Pléistocène inférieur : marnes et marnes sablo-caillouteuses ; 6. Pléistocène moyen : marnes sableuses à croûtes calcaires ; 7. Holocène : alluvions marneuses et lits de graviers ; 8. Pléistocène supérieur : marnes sableuses ou encroûtements.

Fig. 7. Coupes géologiques à travers la moyenne vallée alluviale de l'oued Medjerda.

I.2.2. Une étendue notable des affleurements mixtes

Ils occupent environ 520 km², soit 24 % de la superficie entière. Le complexe triasique, formé d'argiles bariolées, de calcaires dolomitiques et de gypses, est le plus représenté avec une surface de l'ordre de 170 km² (8 %). Il constitue principalement le noyau de l'imposant massif de diapir de Tibar-Bou Chi'ha où se trouve la retenue du barrage de Sidi-Selem. Il apparaît également à Jbel Le'hirech à Jendouba, aux Jbels El-Hendi, Ras El-Krar et Jebbes à Testour ; où aux Jbels El-Morra, Bou-Mous, El'Hmara à Mjez El-Beb et aux Jbels Ettouila et Bou'Okkez à T'borba (photo 16). D'âge oligo-aquitainien, les roches faites d'argiles, de grès et de marnes ne sont visibles que sur des superficies réduites, quelque 13 km² (0,60 %). Elles affleurent à Jbel Forgsan et Jbel El'Hafer à Ghardimaou, à Jbel El-Ghar et Jbel Ghawes à Mjez El-Beb ou à Jbel Lesswed et Jbel Bou'Okkez à T'borba. Quant aux formations néogènes, elles débutent par des dépôts d'argiles gypseuses, de grès, de marnes sableuses et de conglomérats remontant au Mio-Pliocène. Épais de plus de 500 m, les dépôts couvrent à peu près 337 km², soit 15,6 % de la surface du terrain. Ils se retrouvent à Jbel Mergueb et Jbel El'Hafer au nord de Ghardimaou ainsi que sur toute la bordure sud des plaines de Ghardimaou et Jendouba. Également, à Jbel Siyyar et Jbel Bella'a au Nord de Tibar (T'borsok), à Jbel Fej-Leria'h et Jbel Kechtilou à Testour, et à Jbel Ejjedderiya à T'borba. Ils sont souvent surmontés par des formations argilo-sableuses contenant différentes formes d'accumulations calcaires d'âge pléistocène et couvrant une superficie importante d'environ 464 km², soit 21,49 % de l'ensemble du territoire. Celles-ci constituent le substratum des nappes alluviales d'âge historique.



Photo 16. Complexe triasique formé d'argiles bariolées, de dolomies grises et de gypses à stratifications entrecroisées. Vue sur le versant sud de K^{at} Ettouila, à 8 km en amont de la ville de T'borba (x : 567274 ; y : 4074129 ; photo L. Lahmar, 1/3/2008).

I.2.3. Une extension considérable des formations tendres

Elles forment presque la totalité des plaines de la moyenne Medjerda et sont toutes du Quaternaire (photo 17). Elles occupent près de 1052 km², soit 48, 72 % de la

somme des affleurements ; la proportion s'élève à 85,79 % si l'on inclut le pourcentage des formations pléistocènes (21,47 %). Les résultats de forages établis dans les plaines de Ghardimaou et Jendouba-Bou Selem révèlent que les sédiments quaternaires sont constitués fréquemment de graviers, de galets et d'argiles (Guellala *et al.*, 2005, p. 142 ; Guellala *et al.*, 2016, p. 638). L'épaisseur des dépôts, dans le secteur de Ghardimaou par exemple, se situe entre 300 m à l'Ouest et 65 m à l'Est. Par ailleurs, les accumulations historiques se développent dans le fond des oueds et se distinguent par leur couleur et leur matériel alluvial fin, dans lequel la priorité est donnée à des argiles, sables puis limons. Elles offrent souvent le modelé de terrasses, hautes de 3 à 12 m, où se superposent des couches alluviales d'apports fluviaux (photo 18).



Photo 17. Formation quaternaire montrant une superposition de croûte calcaire dure sur un encroûtement pulvérulent. Vue dans le cours aval de l'oued Mellègue au lieu-dit El-Ghraba, au Sud de la ville de Jendouba (x : 478774 ; y : 4028780 ; photo L. Lahmar, 23/12/2008).



Photo 18. Exemple de dépôt de plaine fait très souvent de couches alluviales à dominante fine d'âge holocènes-historiques, et reposant sur des formations argilo-sableuses de couleur rosâtre attribuées au Pléistocène. Vue sur la berge gauche de l'oued El-Meleh, haute de 12 m, à Chemtou à l'Ouest de Jendouba (x : 461356 ; y : 4038327 ; photo L. Lahmar, 6/11/2008).

Conclusions

Sur le plan géologique, il s'agit d'un bassin fluviatile intra-montagneux bordé par des failles favorisant une forte subsidence. Le bassin montre sur la plus grande de sa superficie un remblaiement souvent d'alluvions argileuses quaternaire et surtout historique. Ces formations alluviales accompagnent particulièrement les principaux oueds où elles constituent l'ossature des terrasses. Leur faciès, fin et tendre, offre une faible pénétrabilité de l'eau à travers le sol et favorise donc le débordement et la stagnation longue des eaux. Les formations plus anciennes s'étalent du Trias au Mio-Pliocène et comportent des affleurements soulignés par des argiles gypseuses et des dolomies. Leur caractère tendre et semi-tendre facilite aussi bien l'action de ruissellement des eaux que d'érosion hydrique.

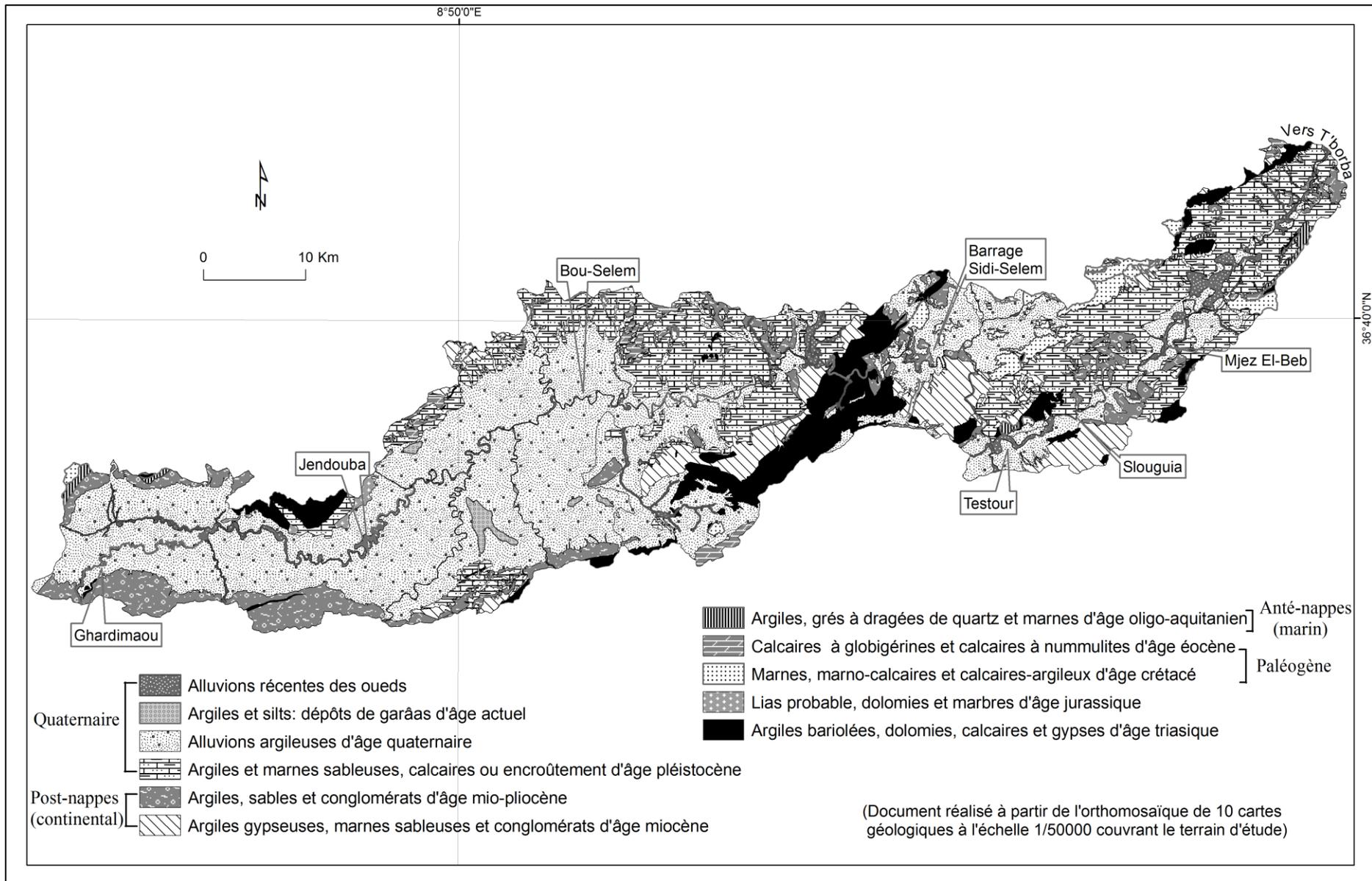


Fig. 8. Carte des affleurements lithostratigraphiques de la moyenne vallée alluviale de Medjerda.

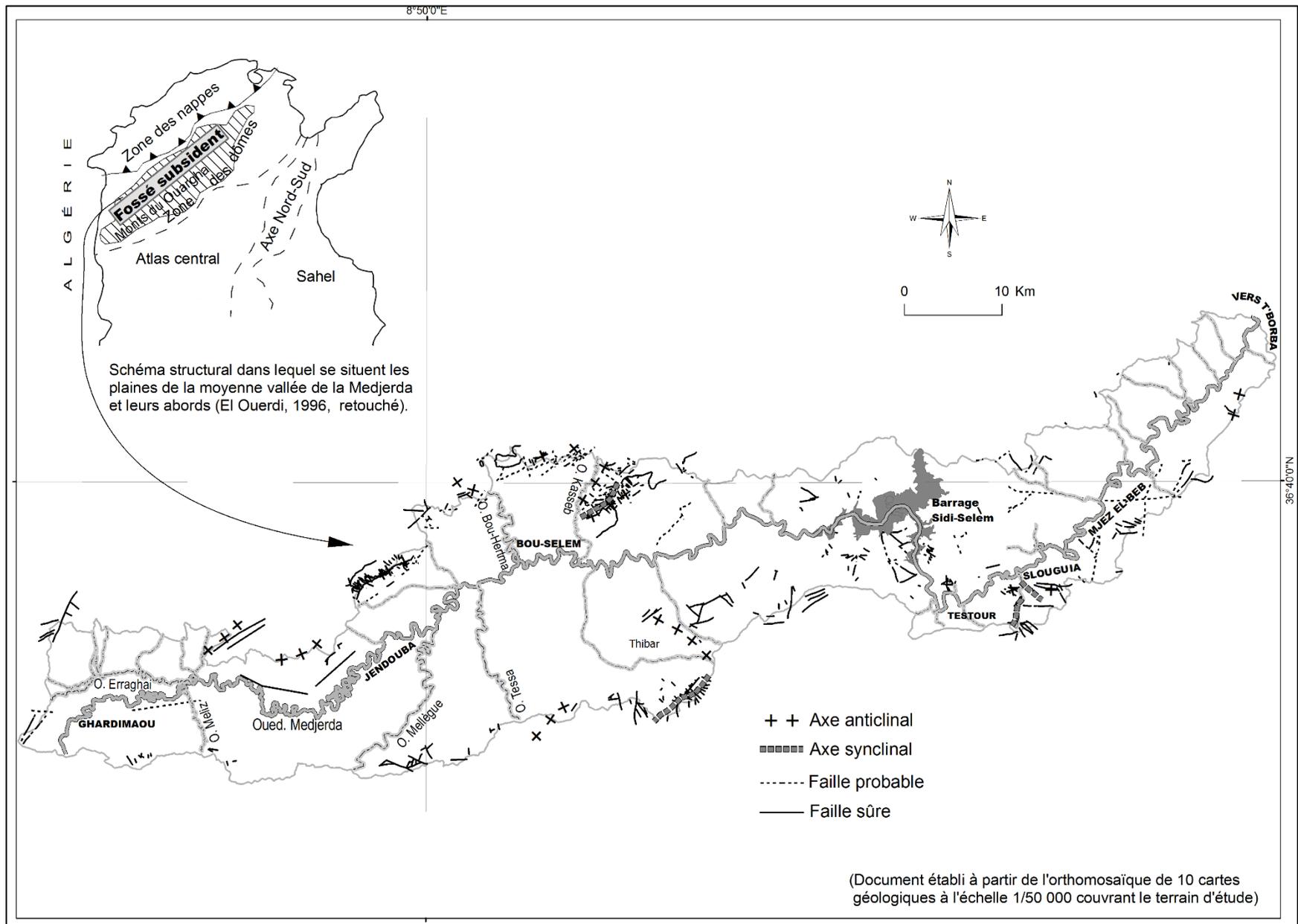


Fig. 9. Les principaux axes et accidents structuraux de la moyenne vallée alluviale de la Medjerda.

I.3. Un réseau fluvial dense, hiérarchisé et puissant

Large est basse, la vallée alluviale de la moyenne Medjerda constitue un espace de rencontre d'une part, des eaux concentrées des oueds qui les traversent, et d'autre part, des eaux d'écoulement descendant des reliefs limitrophes. Elle possède un dispositif hydrographique très développé (fig. 10). La densité de drainage, qui se définit comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la superficie du bassin-versant, atteint $2,65 \text{ km/km}^2$. Elle se situe dans l'intervalle compris entre 2 et 5 qui caractérise le drainage sur des roches imperméables (Bravard et Petit, 1997, p 14 ; Chorowicz et Deroin, 2003, p. 32). Le degré de développement du réseau est indiqué aussi par la densité hydrographique, exprimée par le nombre de drains par unité de surface (Musy, 2005), qui est de l'ordre de $7,12 \text{ km/km}^2$.

I.3.1. Dans les reliefs locaux, un chevelu hydrographique développé et convergent

Les versants sont griffés de très nombreux oueds prenant naissance dans les pentes locales ou provenant d'autres bassins d'alimentation. Des incisions en forme de V, vigoureuses, apparaissent même à perte de vue sur le terrain (photo 19). Le dessin du réseau hydrographique permet de distinguer généralement une disposition arborescente, où les oueds confluent souvent avec des organismes plus importants orientés toujours vers le collecteur de la Medjerda. Certains organismes, plus grands, prennent source dans des régions éloignées comme dans les massifs de la Dorsale tunisienne (oueds Tessa et Siliana) ou encore plus loin dans le territoire algérien (oueds Erraghai et Mellègue).



Photo 19. Exemple de versant découpé par un système de ravins ramifiés et actifs. Vue sur la rive droite de l'oued Meliz, à environ 1 km en amont du pont du village (photo : L. Lahmar, 8/11/2008).

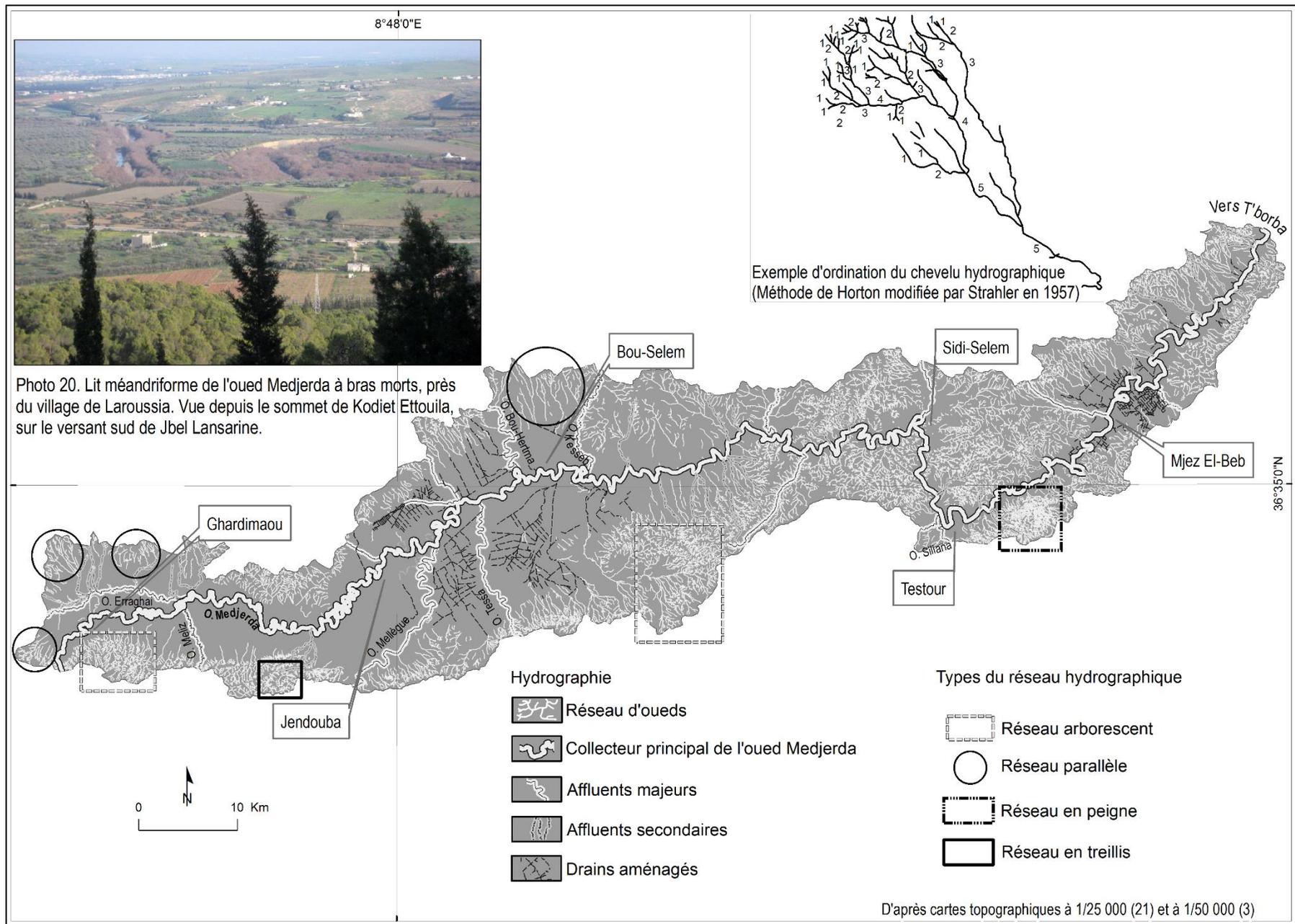


Fig. 10. Dispositif hydrographique du tronçon moyen de la vallée de la Medjerda.

I.3.2. Dans les plaines, un système de vallée larges et confluentes

Les plaines alluviales sont parcourues sur toute leur longueur et largeur par des cours d'eau. Le plus important d'entre eux, même à l'échelle du pays, est l'oued Medjerda qui prend source en Algérie et traverse à Ghardimaou en Tunisie sa moyenne vallée. D'ici à l'amont de T'borba, notre zone d'étude, la Medjerda s'écoule actuellement sur 291 km vers le nord-est ; il lui reste 23 km pour parvenir à son embouchure à Kalaat landloss (Tunis). Profond de 3 à 12 m environ et large de 67 m en moyenne, il décrit des lits à fond mobile ou libre. Ceux encaissés n'existent que dans le secteur du barrage-réservoir de Sidi-Selem à Beja. Les méandres libres se développent sur des surfaces planes et dans des formations meubles d'alluvions, d'où leur capacité de migration remarquable. Ils ont un tracé irrégulier et tortueux, voire même hypertrophié (photo 21) ; mais leur configuration n'est pas forcément stable comme l'attestent les traces de recoupement et de bras morts situés au voisinage. Le modèle méandrique concerne également de nombreux affluents dont les principaux sont, de l'amont vers l'aval, les oueds Erraghai, Mellègue, Tessa, Bou-Hertma et Siliana (photo 22). Ils se caractérisent par des sections larges et assez profondes, parfois comparable ou même supérieure à celle du collecteur principal de la Medjerda qui les reçoit. À l'occasion de fortes pluies, ils mobilisent des volumes d'eau extraordinaires et sont souvent la cause du gonflement impressionnant des eaux dans le fleuve.



Photo 21. L'un des méandres hypertrophiés de l'oued Medjerda vu à Eddeghra El-Kbira à Mjez El-Beb (x : 550495 ; y : 4050172 ; photo : L. Lahmar, 14/1/2014).



Photo 22. L'une des sections de l'oued Mellègue, large de 240 m et profonde du côté de la berge droite de 20 m environ, vu à l'*imada* d'El-M'alla au Sud de Jendouba (x : 478718 ; y : 4029164 ; photo : L. Lahmar, 23/12/2008).

Conclusions

La vallée apparaît fortement incisée par un réseau hydrographique dense, ramifié et convergent. Sur les versants, d'ailleurs souvent à faible végétation, d'innombrables drains à dessin arborescent dévalent les pentes et confluent avec des oueds plus importants provenant parfois d'autres bassins d'alimentation. Ils mobilisent lors des fortes pluies de grands volumes d'eau et de sédiments, jouant ainsi un rôle capital dans le déclenchement des crues en aval. Dans les plaines, les grands organismes fluviaux qui les parcourent se présentent en réseau fluvial en arêtes de poisson, et montrent un tracé à méandres et un profil asymétrique. À l'occasion des crises hydrologiques, ils écoulent des apports liquides et solides considérables souvent à l'origine de débordement et de la stagnation durable des eaux.

I.4. Des pluies ordinaires mais persistantes et capricieuses : les enseignements de plus de cent ans de recul

Dans la partie moyenne de la vallée de Medjerda, le risque d'inondation y demeure bien réel, et a même eu tendance à s'accroître récemment. Les causes sont variées, et la pluviométrie, au premier chef, figure sur la liste des facteurs. Dans les nombreuses publications qui lui ont été consacrées, les spécialistes ont surtout mis en évidence le caractère très variable de pluies (Ginestous, 1927 ; Bellil, 1975 ; Kassab, 1979 ; Henia, 1980 ; Bousnina, 1986 ; Henia, 1993 ; Zahar, 1997 ; Hlaoui, 2008). Certains chercheurs ont attiré l'attention sur le phénomène possible de succession des périodes humides et sèches (Bousnina, 1986 ; Benzarti, 1994 ; Bergaoui, 2001 ; Sakka, 2008). Le présent travail tente d'abord, grâce à une cartographie des précipitations sur soixante ans, de montrer les modes de distribution et d'évolution spatio-temporelle des pluies. Puis il retrace, sur la base de quelques modèles statistiques, les principaux épisodes humides et secs observés depuis la fin du XIX^e siècle. Il vise également à chercher des liens qui peuvent exister entre la répartition des séquences pluvieuses et sèches d'une part, et la distribution des dates d'inondations d'autre part.

I.4.1. Données, méthodes et outils

L'étude repose sur l'exploitation de longues chroniques pluviométriques auxquelles s'ajoute la liste de tous les événements majeurs survenus dans la région. Elle s'appuie également sur des moyens statistiques et géostatistiques dont certains programmes de SIG et de traitements de données permettent d'en tirer profit.

I.4.1.1. Les archives pluviométriques (*)

Ce sont des séries de pluies journalières de 65 stations réparties sur deux périodes d'étude (1928-1958 et 1980-2009). Elles comprennent des observations parfois plus que séculaires, et continues durant au moins trente années successives (fig. 11). Cependant, les relevés de neuf stations parmi celles choisies manquent en effet quelques années d'enregistrement. Ces lacunes de trois ans au plus ne sont pas trop

(*) Nous tenons à remercier M. Jalel Dallel qui nous a communiqué une bonne partie des données de pluie. Nous remercions également le regretté M. Lotfi Boughrara de la D.G.R.E qui a mis à notre disposition les fichiers pluviométriques de la dernière décennie.

gênantes puisque le taux de remplissage (*) est à 84 % (Bousnina, 1986). Et pourtant, on a opté pour leur comblement à partir des données de stations voisines (fig. 11).

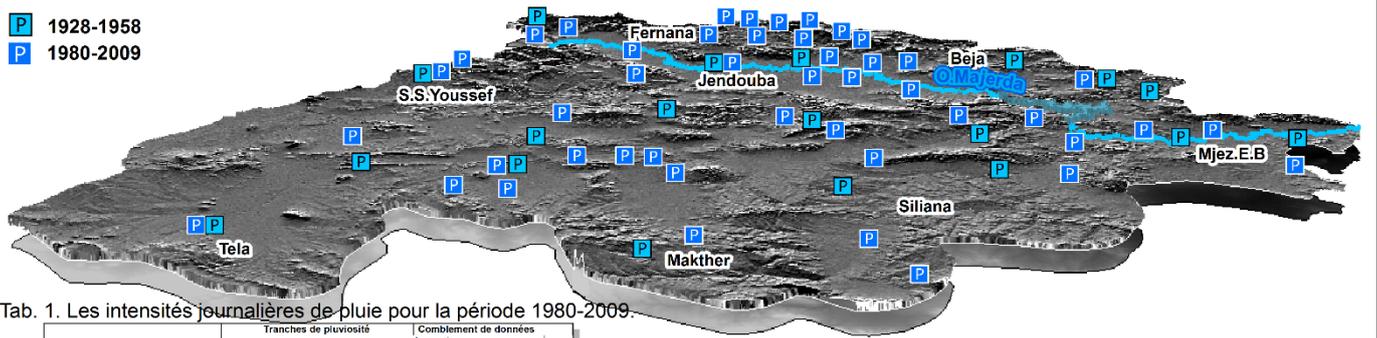
I.4.1.2. Les moyens statistiques et géostatistiques

L'analyse statistique se fonde sur l'emploi de modèles et d'indices susceptibles d'identifier le régime pluviométrique. Le choix est fait sur l'application de quatre tests d'homogénéité de séries et trois indices de précipitations dont les chercheurs ont souvent recours (Bergaoui *et al.*, 2001 ; Kingumbi *et al.*, 2001 ; Meddi *et al.*, 2007). Sans doute, le niveau de précision des résultats dépend fortement de la qualité de données. Plus la série de pluie est longue et complète plus l'identification des séquences pluvieuses est claire. Pour ce travail, on dispose de données de six stations ayant des enregistrements qui couvrent un peu plus d'un siècle. Par ailleurs, la géostatistique offre un précieux outil de cartographie et d'analyse des champs pluviométriques. La méthode d'interpolation optimale retenue est de type Krigeage qui intègre dans son processus d'estimation la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme. Il s'agit d'un graphique qui montre la relation entre les points de mesure et les distances qui les séparent (fig. 12). L'estimation est améliorée par l'usage de la technique de Co-Krigeage qui introduit en plus de la pluie bien d'autres variables comme celle des altitudes. Les cotes d'altitude sont extraites d'un modèle numérique d'élévation à un pas d'espace de 30 m.

(*) Il est calculé de deux manières par la prise en compte de la variable « station » ou celle « années ». C'est le rapport du nombre des stations ou des années exemptes de lacunes à l'effectif total des stations ou des années considérées. Dans le premier cas, le taux de remplissage est à 86,1 % ; dans le second, il est à 81,7 %. Notons, qu'une année manquante, se répétant parfois dans plus d'une station, est comptée une seule fois.

Postes pluviométriques retenus pour la période d'étude :

- P 1928-1958
- P 1980-2009



Tab. 1. Les intensités journalières de pluie pour la période 1980-2009.

ID	Code	Station	Tranches de pluviosité			Comblement de données lacunaires	
			inférieure à 10 mm	entre 10 et 30 mm	supérieure à 30 mm	Années manquantes	station voisine
1	50078	Ain Beya-O Ghzela	190.4	381.0	286.8		
2	50138	Ain Daeba	189.1	489.6	532.3		
3	50276	Ain El Karma	146.4	184.0	54.8		
4	50350	Ain El Merja	146.5	280.3	117.4		
5	50511	Ain Younga-SE	153.4	175.6	89.3		
6	50355	Ain Zena	175.6	440.0	338.1	1979-1980	Beni M'tir
7	50553	Ain Ziguia	153.9	207.3	59.1		
8	50591	Akwet-Gare	164.5	187.8	75.0		
9	50738	Badrouna	180.3	220.4	61.5		
10	50787	Barraje Lakhmes	173.9	165.0	79.2	1993-1994	Akwet-Gare
11	51286	Beni M'tir	179.9	471.2	465.8		
12	51133	Boti Hamdouna	175.8	194.7	57.7		
13	51403	Bouhetma	200.6	301.1	197.2		
14	57018	Boussem-DRE	191.5	186.9	55.3		
15	51809	Chamtou-ferme	161.9	208.4	45.9		
16	51072	Mellouga-SM	175.1	200.2	61.1		
17	52510	Dehmani-Municipalité	160.9	196.5	56.0		
18	52653	Fa'ih-Tessa	146.7	186.5	84.3		
19	52859	Fernana-Ghzela	186.5	381.3	289.9		
20	52864	Ghardimaou-DRE	186.4	206.2	69.4		
21	51856	Jendouba	180.8	371.1	358.6		
22	53619	Kef-SMA	191.2	184.4	66.2		
23	53778	El Krib-ferme	190.0	230.7	116.0		
24	53876	Ksar Allobogors	163.2	166.9	72.1		
25	53839	El Ksour Ecole	147.7	193.9	67.2		
26	54292	Mjez El Bab-PF	161.2	171.6	70.8		
27	54611	Munchar Ecole	133.1	251.3	70.1	1985-1988	Beja_INRAT
28	55053	OUED RIMI	123.2	200.4	57.8	1992-1993	Siliana-Laou
29	55288	RAGHAY SUPERIEUR	166.9	245.2	98.3		
30	55502	Sakiet Sidi Youssef	203.4	314.4	100.6		
31	55862	Sned El Haddad	51.0	315.7	172.3	1883-1984; 1992-1993	Ain Zena
32	56887	Sirs Ecole	105.4	173.7	77.1		
33	56888	Sirs Délégation	145.4	184.3	82.4		
34	56380	Sidi Hamada	149.8	209.4	120.2		
35	56765	Siliana-Laou	146.4	147.9	86.1		
36	56988	Jendouba	176.5	189.6	54.9		
37	57022	Boussalem	155.0	220.2	58.4		
38	56904	Skhra-Boussalem	173.7	229.5	103.0		
39	56832	Slougua	182.5	164.2	70.0		
40	57328	Tejenwine	123.7	198.7	83.6		
41	57678	Tela-SM	148.9	181.2	87.1		
42	57658	Tibarak-SM	198.1	246.1	133.7		
43	57643	Tesse-Sidi Midien	169.7	187.4	59.7		
44	57690	Tibar-SM	201.6	268.5	100.2		
45	58072	Zawem-Gare	125.3	176.5	70.8		
46	58158	Zawem-SM	175.1	204.9	54.2		

Emplacement des postes pluviométriques dans la partie moyenne du bassin-versant de l'oued Medjerda.

Tab. 2. Les intensités journalières de pluie pour la période 1928-1958.

ID	Code	Station	Tranches de pluviosité			années manquantes	station voisine
			inférieure à 10 mm	entre 10 et 30 mm	supérieure à 30 mm		
1	50229	Ain El Gharsa-El Krib	172.8	172.0	126.3	1927-1928	
2	50276	Ain El Karma	163.0	177.5	66.9	1957-1958	Ben Arar
3	50745	Bhret Hir. El Merja	184.2	180.0	88.5		
4	50799	Beauce Tunisienne	195.0	189.7	83.3		
5	50823	Beja-INRAT	219.4	195.2	132.1		
6	51226	Ben Arar	164.2	203.8	79.2		
7	52186	Oued Ermal	130.9	206.1	79.2		
8	52511	Ebba Ksour	189.4	224.5	65.2		
9	52685	Felja-SM	170.3	226.3	470.3		
10	52042	Jenissa-Gare	124.9	229.9	56.8		
11	54103	Makther-SM	164.7	232.8	98.9	1942-1943	
12	54290	Mjez El Bab-Till	162.1	235.6	68.7	1942-1943	
13	54524	Montarnaud	156.4	259.0	80.8	1942-1943	
14	54611	Munchar Ecole	210.4	273.6	70.5	1942-1943	
15	56358	Sidi El Facil	174.8	274.6	84.0		
16	56990	Jendouba	185.7	276.9	61.5		
17	57678	Tela-SM	151.8	284.8	84.5	1944-1945	Jerissa-Gare
18	57690	Tibar-SM	229.7	303.5	84.8	1945-1946	
19	58158	Zawem-SM	194.9	493.5	54.1	1943-1944	Jendouba

Fig. 11. Localisation des postes pluviométriques et données d'intensité journalière de pluie pour les périodes 1928-1958 et 1980-2009.

I.4.1.3. Les programmes de traitements de données et de SIG

Le travail consiste d'abord à stocker les enregistrements de pluie, sous la forme de fichiers Excel, dans un système de gestion de bases de données de type Microsoft Access (fig. 12). Le calcul des indices pluviométriques est effectué à l'aide du logiciel Statistica (www.stat.soft.fr) ; celui des tests d'homogénéité des séries chronologiques est réalisé par les programmes de Khronostat (www.hydrosciences.org) et de XLSTAT (www.xlstat.com). La cartographie des pluies est établie grâce au module d'analyse géostatistique du logiciel de SIG ArcGis, selon la méthode de Co-Krigeage.

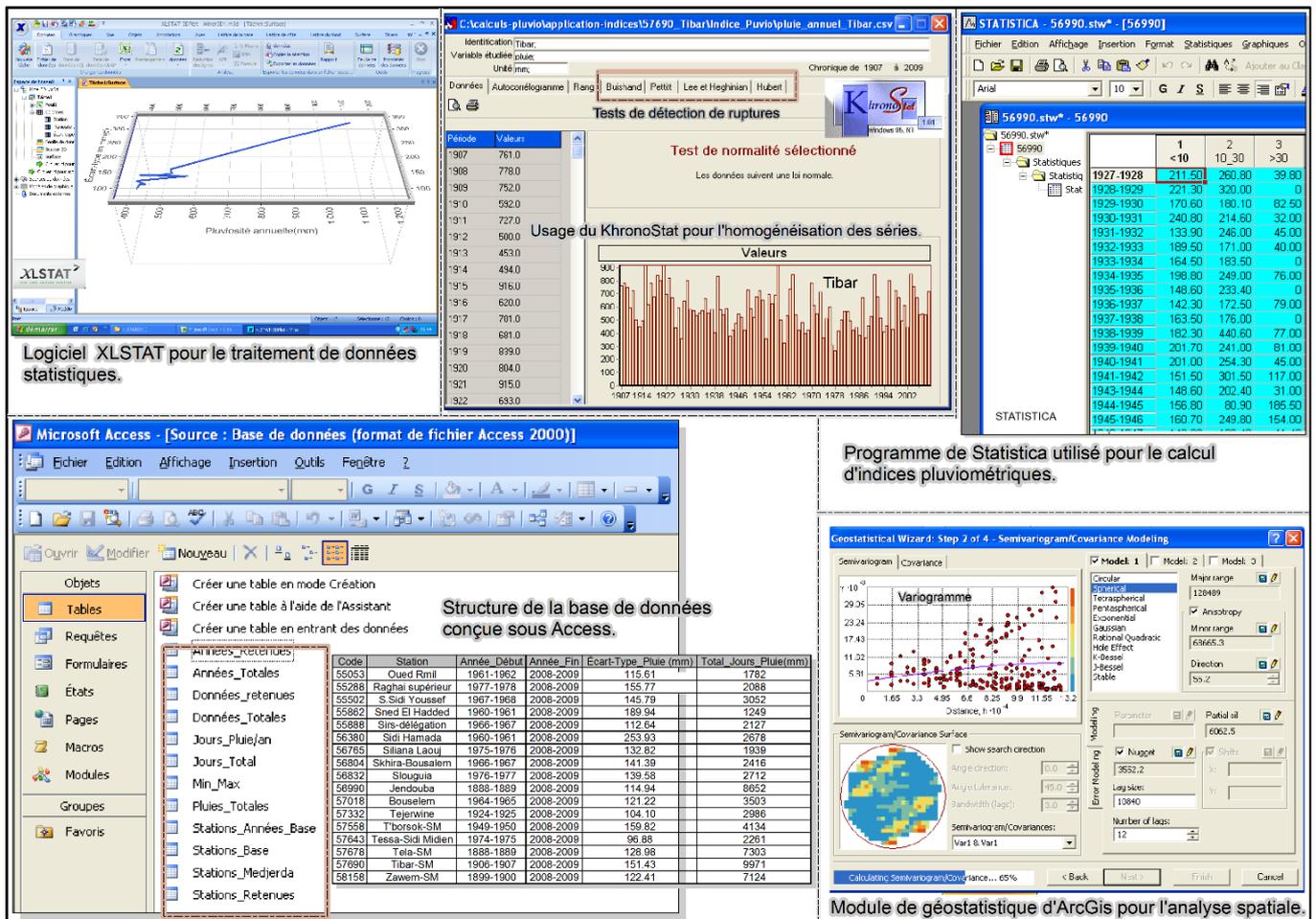


Fig. 12. Quelques interfaces des programmes informatiques utilisés.

I.4.2. Les caractères de pluie

La bibliographie existante relative à ce sujet est aussi abondante qu'intéressante. Mais l'examen des données récentes recueillies permet d'apporter des éclairages sur certains points non moins importants. L'accent est mis d'abord sur la variabilité des hauteurs d'eau à l'échelle annuelle et saisonnière ; ensuite sur les tendances d'évolution spatio-temporelles des intensités pluviométriques à travers une analyse comparée de deux périodes à intervalles égaux de trente ans.

I.4.2.1. La variabilité des pluies annuelles et saisonnières

Elle concerne la période comprise entre 1980 et 2009.

I.4.2.1.1. Les moyennes pluviométriques annuelles

Généralement, les volumes précipités sont modestes et présentent un fort contraste spatial (fig. 13). La répartition des volumes d'eau (1980-2009), étant comprises entre 1117 et 411mm, montre que seulement 9 % de la superficie totale est concernée par des valeurs de pluie supérieures à 800 mm. Ce sont précisément les régions de Kkmir et de Bled Beja, exposées aux fronts pluvieux du nord-ouest, qui sont les plus arrosées. Cependant, à quelque 30 km de ce lieu en direction du sud, les lames d'eau diminuent fortement si bien que 72 % des terrains reçoivent moins de 500 mm, et encore moins de 450 mm dans les plaines abritées des oueds Mellègue et Tessa.

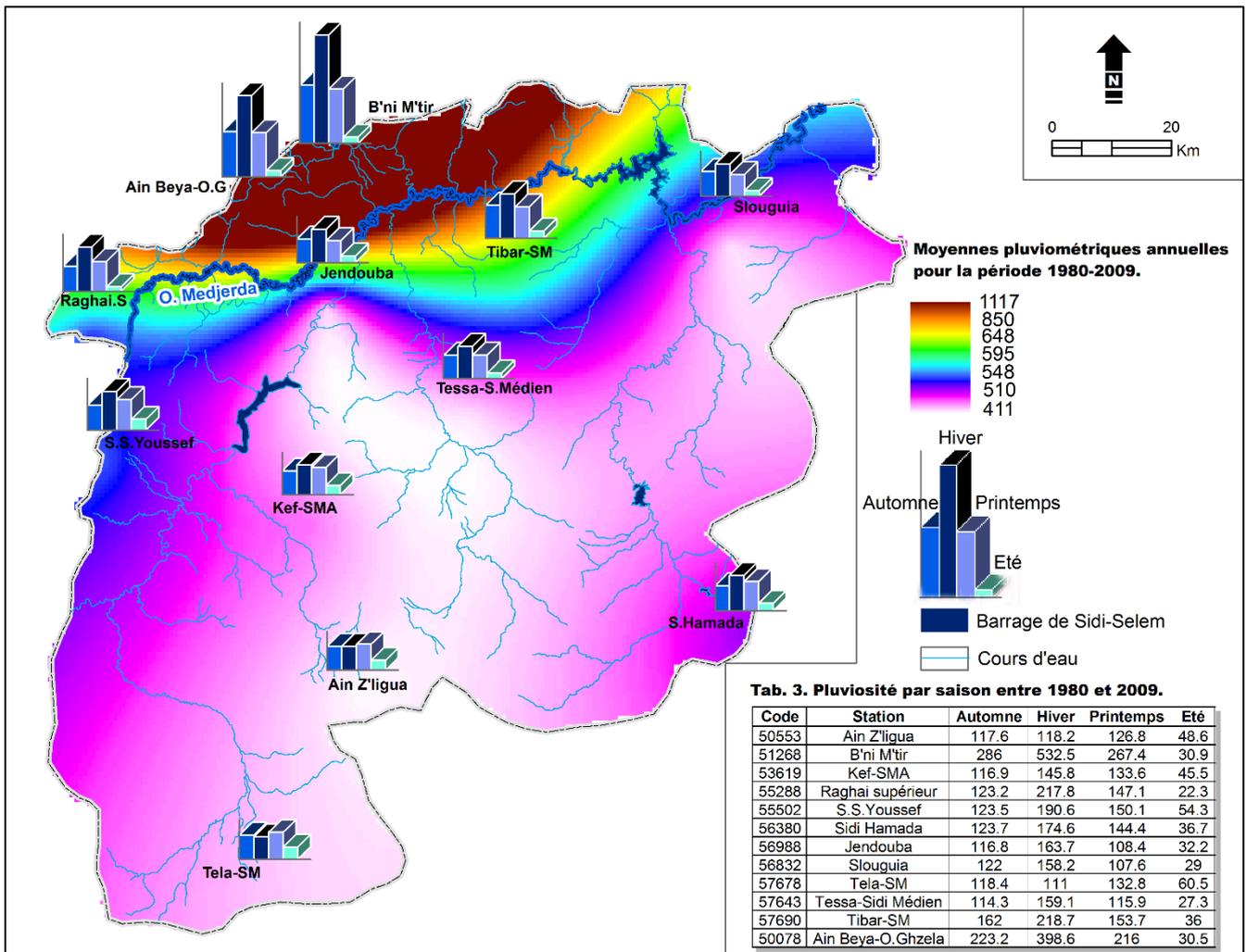


Fig. 13. Distribution des hauteurs pluviométriques annuelles pour la période 1980-2009. Les diagrammes en barre expriment le pourcentage saisonnier des moyennes annuelles au cours de la même période.

Cela n'empêche que certaines hauteurs à El-Kef où à Siliana enregistrent plus de 530 mm. Entre ces deux régions pluviométriques se distinguent les grandes plaines de la moyenne vallée de la Medjerda où les modules annuels sont assez faibles et se situent

généralement entre 550 et 650 mm. Mais elles changent de valeurs parfois sur de courtes distances en raison surtout de la position d'abri par rapport au flux pluvieux (Henia, 1980). La distribution des pluies est donc irrégulière et cette irrégularité ressort encore mieux à partir des valeurs de l'écart-type qui expriment une variabilité absolue très élevée des pluies annuelles (tab. 4 ; fig. 14). La variabilité est supérieure à 224 mm et dépasse largement la moyenne nationale, considérée déjà forte, qui est d'environ 100 mm (Bousnina, 1986). Elle est généralement proportionnelle aux totaux annuels, autrement elle est d'autant plus forte que les volumes précipités sont plus élevés. Son intensité est également très variable et semble être déterminée non seulement par l'altitude mais par d'autres facteurs d'ordre climatique. En fait, les grands écarts-types sont enregistrés aussi bien dans les stations perchées (Bni Mtir, Ain Beyya.) que dans celles situées à des altitudes modestes, inférieures à 181 m (Slouguia, Jendouba...). Cela n'empêche que des stations se trouvant à des altitudes élevées (Tela, Ain Zligua) peuvent enregistrer au contraire des écarts-types assez faibles (tab. 4 dans fig. 13).

Tab. 4. Volumes précipités pour la période 1980-2009.

Code de la station	Nom de la station	Altitude	Pluviosité annuelle	Écart-type(σ)
50553	Ain Z'ligua	853	411.2	121.7
57643	Tessa-Sidi Médien	180	416.7	99
56832	Slouguia	65	416.8	139.9
56988	Jendouba	143	421	106.7
57678	Tela	1020	422.7	110.9
53619	Kef	491	441.8	111.7
56380	Sidi Hamada	690	479.3	140.3
55288	Raghai supérieur	310	510.4	158.2
55502	Sakiet Sidi Yessef	803	518.4	145.2
57690	Tibar	365	570.3	136.4
50078	Ain beya-O.Ghzala	330	868.2	260.9
51268	B'ni M'tir	493	1116.9	323.4

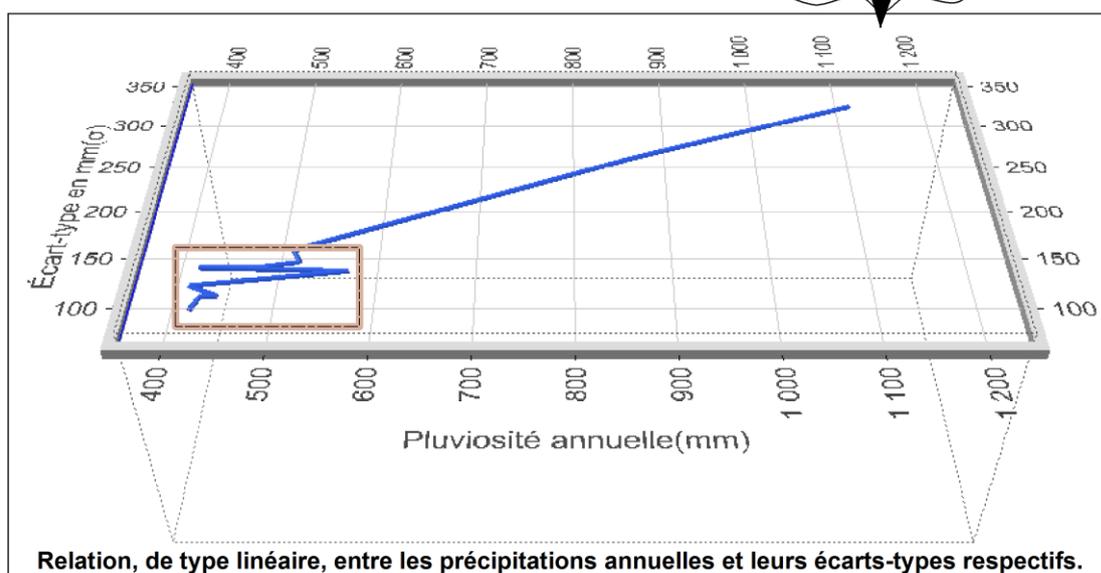


Fig. 14. La variabilité absolue des pluies est généralement proportionnelle aux totaux moyens annuels. Des exceptions existent, néanmoins, comme cela est montré dans l'encadré.

I.4.2.1.2. Les moyennes pluviométriques saisonnières (*)

Les données relatives aux moyennes pluviométriques saisonnières sont notées dans le tableau 3 de la figure 13. Leur examen montre que la plupart des stations accusent un maximum hivernal qui diffère d'un espace de l'autre. Proéminent par rapport au reste des saisons dans les stations de l'extrême nord-ouest, ce maximum est de moins en moins apparent en allant vers le sud du bassin-versant. Cela se voit en premier lieu dans les stations de plaines de l'oued Medjerda où l'écart pluviométrique entre les saisons se réduit fortement quoique l'hiver reste prédominant. L'écart se rétrécit davantage au point que le printemps occupe la place de l'hiver dans les stations du Haut Tell comme à Tela et à Ain Zligua. Le maximum printanier est dû à l'augmentation des pluies de l'été par comparaison au Tell septentrional d'une part, et à la diminution des moyennes de l'automne et de l'hiver d'autre part. Ainsi, le régime saisonnier n'est pas stable et ne cesse de changer au fil des années (Bousnina, 1986).

Conclusions

En somme, la moyenne vallée de la Medjerda reçoit généralement des volumes d'eau annuels faibles dont la répartition est très inégale. Le contraste est fort entre l'extrême nord-ouest, les grandes plaines et la partie méridionale. Mais la variabilité des pluies caractérise bien d'autres espaces et ne saurait donc se réduire à ces trois grandes régions pluviométriques. Quant à la répartition saisonnière des pluies, elle suit celle des totaux annuels et indique en gros deux maximums : hivernal au nord et printanier au sud. Cela offre de larges possibilités pour que des événements majeurs se produisent pendant une bonne période de l'année.

I.4.2.2. Variabilité de la saison pluvieuse et tendances d'évolution des intensités journalières

I.4.2.2.1. La variabilité de la saison pluvieuse

Elle apparaît à travers l'analyse des jours pluvieux pendant la période 1980-2009. L'effectif moyen des jours pluvieux est faible et ne dépasse en tout cas 90 jours (tab. 5). Il accuse des valeurs parfois élevées dans les stations d'altitude (Tela, Bni M'tir),

(*) Les saisons considérées sont l'automne (septembre, octobre, novembre), l'hiver (décembre, janvier, février), le printemps (mars, avril, mai) et l'été (juin, juillet, août).

contrairement à celles abritées situées dans les plaines (Jendouba, Tessa). De plus, le nombre de jours pluvieux change parfois subitement d'une année sur l'autre. À titre d'exemple, il est passé à Slouguia de 130 jours en 1977 à 72 jours en 1978 et à Tela de 66 jours en 1998 à 102 jours 1999. Le caractère de variabilité ressort encore mieux à partir de la distribution des durées de la saison pluvieuse par rapport à la médiane (Bousnina, 1986). Il s'agit de voir la symétrie ou la dissymétrie des valeurs de la durée (fig. 15). Plus la dissymétrie est grande plus l'irrégularité est forte. La relation peut être exprimée par le coefficient de Pearson qui plus il est différent de zéro plus il indique une dissymétrie importante. La figure 15 montre que la distribution des durées de la saison pluvieuse est très dissymétrique par rapport à la valeur médiane. L'écart est important surtout dans les stations d'altitude comme à Tibar, à Tela et à El-Kef. Le second graphique révèle cependant que la situation est un peu similaire même dans les stations de plaine comme à Jendouba. Or, la variabilité des durées de la saison pluvieuse n'est pas toujours proportionnelle à celle des volumes précipités. Certaines stations enregistrent des quantités d'eau parfois triple par comparaison avec d'autres stations, pourtant le nombre de jours pluvieux est presque le même. Durant la période 1980-2009, les stations de Bni Mtir et de Tela ont reçu respectivement 33505,6 mm et 12682,5 mm alors que la différence entre les effectifs de jours pluvieux est seulement 38 jours (tab. 5). Les totaux élevés proviennent plus des séquences de pluies intenses mais de courtes durées que des épisodes pluvieux allongés (Henia, 1996). La question des intensités pluviométriques est donc trop intéressante et il est fort regrettable de ne pas disposer de toutes les données, en l'occurrence des pluies instantanées. Mais l'analyse comparée des intensités journalières de pluie permet en partie de rendre compte de ce fait.

Tab. 5. Distribution des jours pluvieux et des volumes précipités pour la période 1980-2009.

Code-station	Nom-station	Nombre moyen de jours pluvieux	Total de jours pluvieux	Volumes précipités (mm)
50078	Ain Beya	72	2150	26045,9
51268	Bni Mtir	88	2645	33505,6
56988	Jendouba	77	2305	12630,1
57643	Tessa	63	1894	12499,8
57678	Tela	90	2683	12682,5

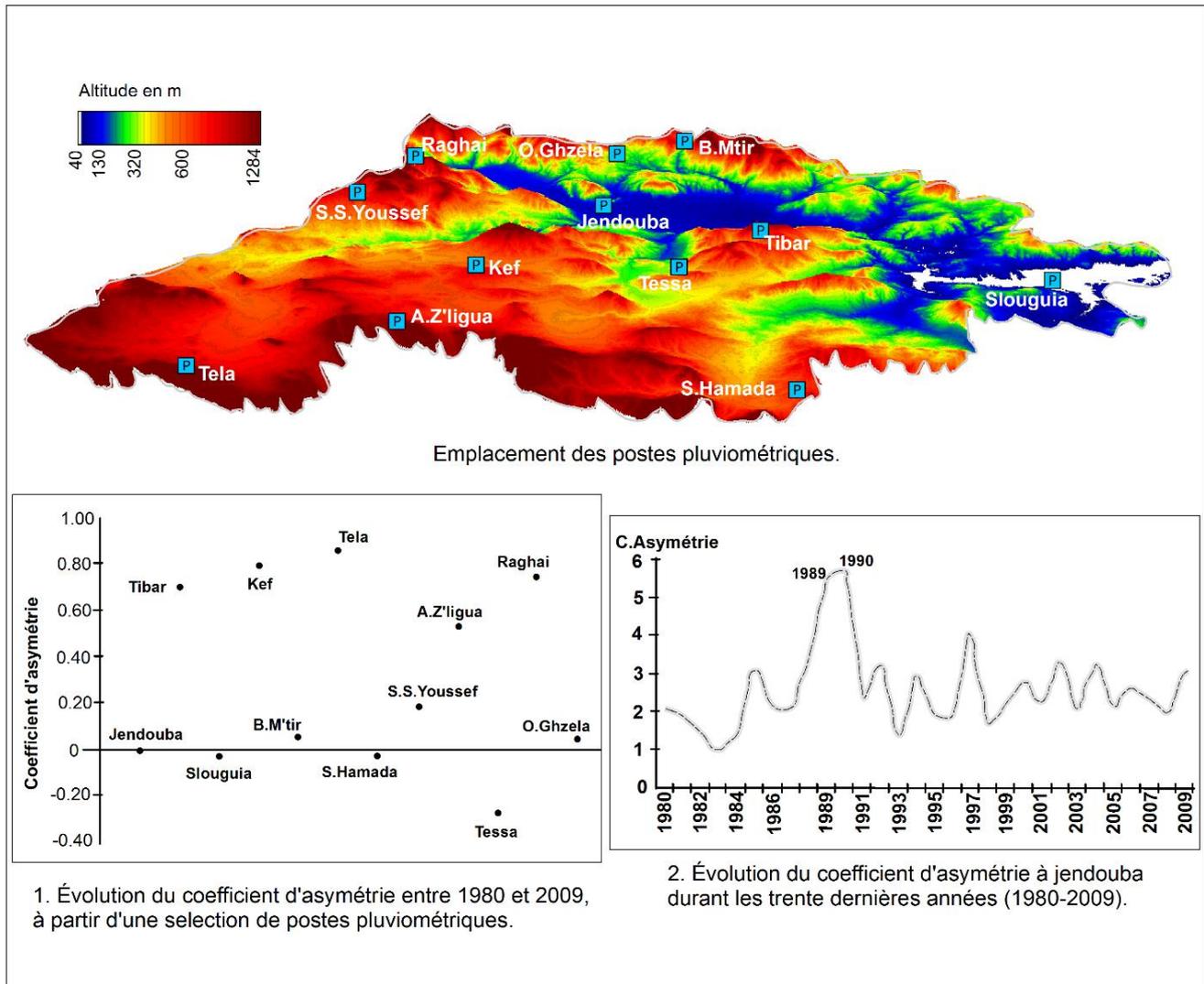


Fig. 15. Dissymétrie des durées de la saison pluvieuse par rapport à la médiane.

I.4.2.2.2. Les intensités journalières de pluies : répartition et tendances d'évolution

C'est une analyse comparée des intensités de pluies pour deux périodes à intervalles égales de trente ans. La première période va de 1928 à 1958 tandis que la deuxième s'étend de 1980 à 2009 (fig. 16). Le travail consiste d'abord à ranger les précipitations journalières en trois seuils d'intensité dont les climatologues font couramment usage. Ce sont les seuils de pluies inférieures à 10 mm, entre 10 et 30 mm et supérieures à 30 mm pour désigner respectivement les pluies faibles, modérées et fortes ou torrentielles. Vient ensuite l'étape de spatialisation des données pluviométriques moyennant l'outil de modélisation géostatistique.

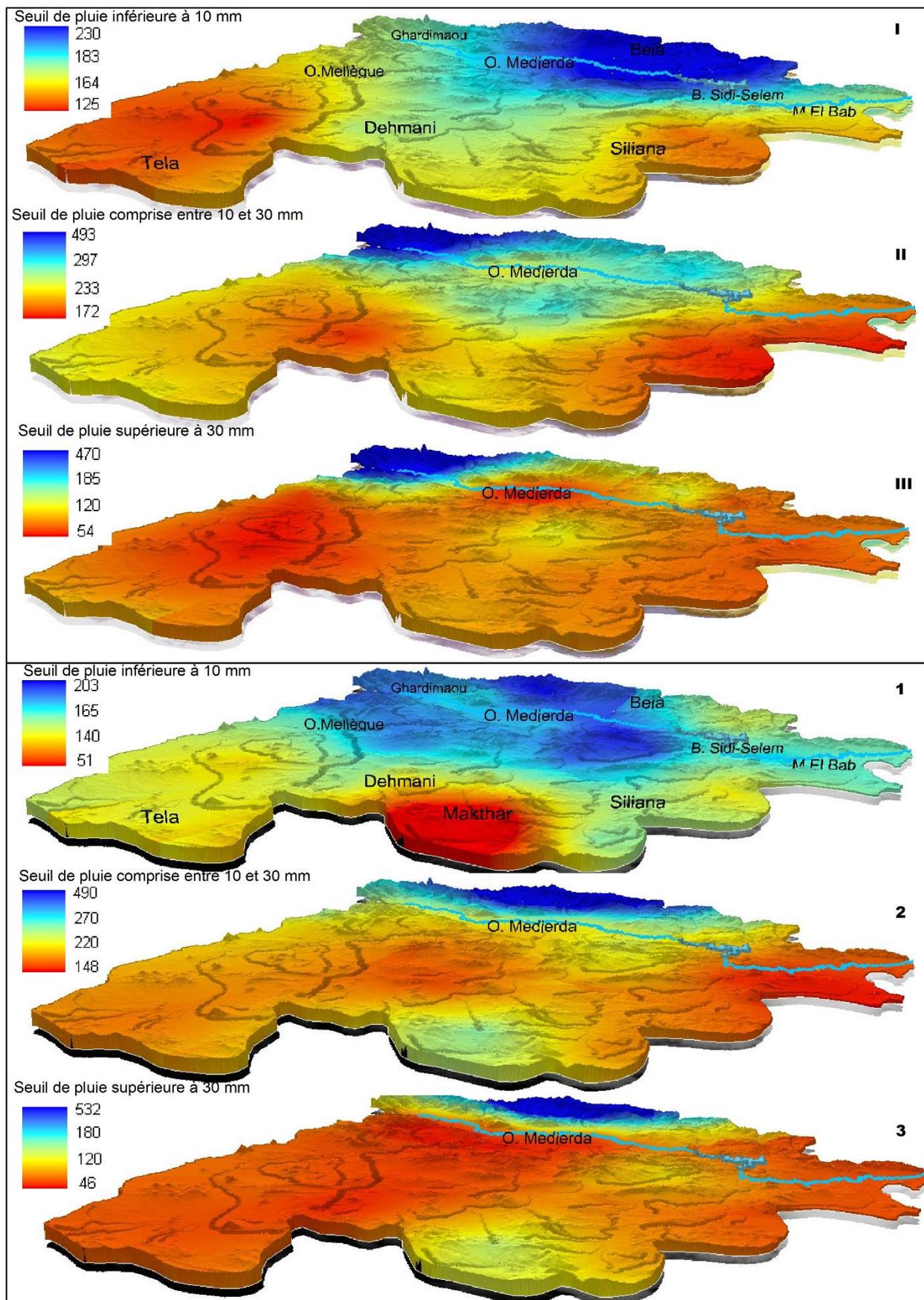


Fig. 16. Répartition des intensités journalières pluviométriques pour la période 1928-1958 (I, II, III) et la période 1980-2009 (1, 2, 3).

I.A. Répartition des intensités

Les valeurs d'intensité de pluies sont globalement faibles. Car plus de 80 % des chutes tombent à moins de 30 mm/j, contre 18 % pour les lames d'eau considérées torrentielles (> 30 mm/j). Leur répartition spatiale est, en outre, très inégale. La figure 16 montrent une importante disparité entre les champs d'intensité forte et ceux faible. Les premiers champs, figurés en dégradé de bleu, sont d'extension trop limitée ne dépassant pas en tout cas 30 % de la superficie totale et pouvant se réduire à seulement 5 % pour les intensités extrêmes. Ils couvrent les terrains du nord-ouest et à moindre degré les hauteurs de la rive méridionale de l'oued Medjerda. En revanche, les champs d'intensité faible, représentés en dégradé de rouge, s'étendent sur de larges surfaces. Ce sont en gros les terrains compris entre les versants septentrionaux de la Dorsale, de H'ïdra à Siliana et les abords de la vallée de la Medjerda. D'autres espaces pluvieux caractérisés par des intensités modérées se détachent ici et là surtout dans les régions du Haut Tell. De plus, les configurations spatiales des champs pluvieux sont assez variables. Elles changent d'allure en changeant le seuil d'intensité pour l'une ou pour les deux périodes d'observation considérées.

I.A.1. Les intensités de pluies inférieures à 10 mm

Par comparaison à la première période d'observation (1928-1958), les champs d'intensité ont visiblement évolué entre 1980 et 2009 (fig. 16, I et 1). L'évolution concerne d'abord les espaces pluvieux ayant des valeurs supérieures à 180 mm puisque leur superficie a augmenté de 20 %, soit 2975 km². Les nouveaux champs d'intensité forte sont gagnés aux dépens de ceux modérés couvrant les régions de Ghardimaou, de Neber et de T'borsok. L'augmentation des intensités est remarquée aussi dans les terrains de Tela et d'El-Kef auxquels s'ajoute la bande de terres comprises entre Siliana et Mjez El-Beb. Les valeurs de précipitations ont passé de 125 mm en moyenne à environ 150 mm pour une aire de 4062 km², soit 29 % de la superficie totale. En revanche, l'îlot pluviométrique de Makther (812 km²) connaît un fléchissement considérable des valeurs d'intensité qui ont diminué de presque deux tiers en passant de 160 à 51 mm en moyenne.

I.A.2. Les intensités de pluies comprises entre 10 et 30 mm

Contrairement au seuil précédent, le noyau pluvieux de Makther enregistre un accroissement des intensités. Il reçoit aujourd'hui environ 242 mm au lieu de 225 mm (fig. 16, II et 2). De part et d'autre de ce noyau, dominant des valeurs d'intensité

faible sur presque 66 % de la superficie totale. Elles s'échelonnent entre 172 et 233 mm avant les années soixante et varient entre 148 et 220 mm après les années quatre-vingt. La diminution de la pluviométrie est probablement liée à la baisse des hauteurs d'eau pendant la séquence déficitaire de 1989-2002. Elle paraît aussi responsable de la réduction des surfaces à intensité forte s'étendant actuellement sur 300 km². Autre fait, le cœur pluviométrique se trouve légèrement déplacer vers l'Est et plus précisément au Sud de Ain Drahim et de Amdoun par rapport à sa position ancienne dans l'extrémité ouest de Ghardimaou et de Fernana.

I.A.3. Les intensités de pluies supérieures à 30 mm

À l'exception de la remarquable migration du cœur pluviométrique et la légère augmentation des valeurs d'intensité dans l'îlot de Makther, la distribution des pluies paraît inchangée. Plus de 70 % des terrains reçoivent des volumes d'eau souvent compris entre 50 et 130 mm, ce qui témoigne de la modestie des intensités pluviométriques (fig. 16, III et 3). Et même les quelques valeurs à caractère très intense (> 500 mm) enregistrées, elles ne concernent qu'une étroite bande de terres situées à l'extrémité nord-ouest du bassin-versant de l'oued Medjerda.

Conclusions

Au total, la durée de la saison pluvieuse est très variable. Elle est dissymétrique par rapport à la valeur médiane et le nombre de jours pluvieux déjà faible change parfois subitement d'une année sur l'autre. Les intensités de pluies sont médiocres et leur répartition est très inégale. La disparité est notable entre les champs d'intensité forte couvrant moins de 30 %, voire même 5 % de superficie et ceux faible s'étendant sur de larges surfaces. L'analyse comparée des seuils d'intensité avant et après les années soixante confirme ce contraste entre les régions du Tell septentrional exposées aux fronts pluvieux et celles du Haut Tell et de la Dorsale situées à l'abri pluviométrique. Elle révèle de plus une dynamique d'évolution des intensités de pluies qui se traduit par l'augmentation ou la diminution des valeurs dans un espace ou dans un autre.

I.4.3. Essai de restitution des épisodes pluvieux et non pluvieux et leur corrélation avec l'aléa inondation

Le travail de reconstitution de ces épisodes s'appuie sur les résultats du calcul de deux méthodes différentes mais complémentaires d'analyse statistique. La première utilise des indices pluviométriques qui offrent la possibilité de déterminer au sein de

la série des séquences à tendance humide et sèche. La seconde se sert des tests d'homogénéité qui permettent d'estimer des dates de rupture de pluie.

I.4.3.1. Une alternance de séquences humides et sèches

Elle est révélée par trois indices pluviométriques appliqués à six séries de données dont la période d'observation dépasse un siècle.

I.4.3.1.1. Indice standardisé de précipitations

C'est l'indice de Nickolson (1983) qui se définit par l'expression $I_p = (H_j - X) / \sigma$, où H_j est la hauteur de pluie totale (en mm) pour une année j , et X et σ sont respectivement la moyenne et l'écart-type des pluies annuelles pendant la durée de l'enregistrement. Si l'indice est positif l'année est désignée humide, et inversement si l'indice est négatif l'année est qualifiée de sèche. Le tableau 6 montre que le rapport est légèrement en faveur des années sèches avec un pourcentage de 54,8 % contre 45,1 %.

Tab. 6. Proportion des années à tendance humide et sèche.

Code-station	Nom	Nombre d'années d'observation	% d'années sèches	% d'années humides
52665	El-Feija	115	51,30	48,7
56990	Jendouba	111	57,65	42,35
58158	Zawem	104	56,73	43,27
50823	Beja	102	55,88	44,12
57690	Tibar	103	55,33	44,67
57678	Tela	107	52,33	47,67

La représentation graphique des indices de précipitations permet de ressortir cinq séquences à tendance humide et sèche (fig. 17). Ces séquences apparaissent nettement sur toutes les figures des stations considérées malgré le changement de leur durée et parfois de leur nature. Elles montrent de plus un caractère d'alternance remarqué surtout dans les stations de Jendouba, de Zawem, de Beja et Tibar. Ce résultat sera confirmé par deux autres indices pluviométriques.

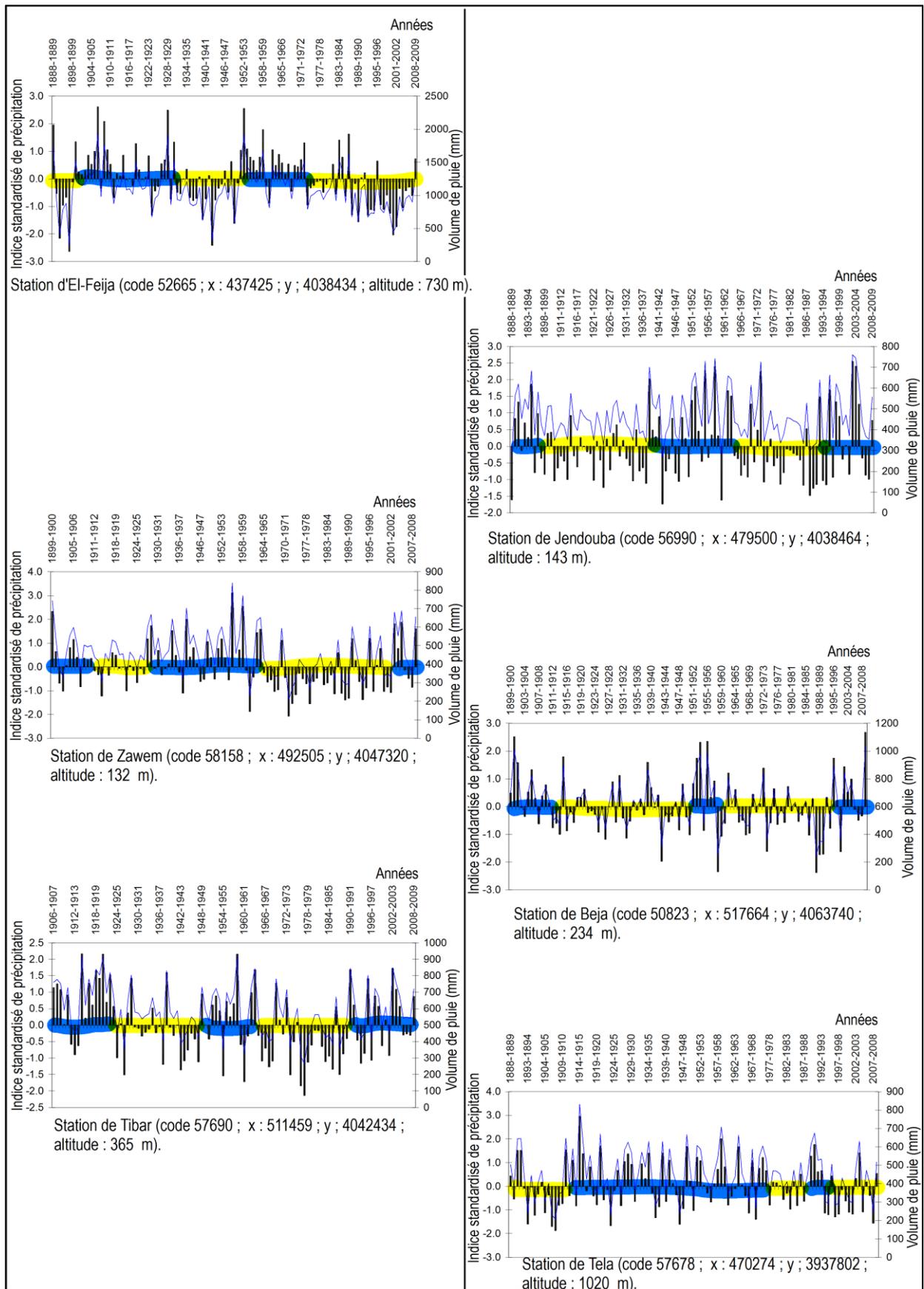


Fig. 17. Indice standardisé de précipitations et décomposition des séries en séquences humides (couleur bleu) et en séquences sèches (couleur jaune).

I.4.3.1.2. Indice de l'écart à la moyenne

C'est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P_i) et sa moyenne (P_m) : $E_m = P_i - P_m$. L'écart est positif pour les années humides alors qu'il est négatif pour les années sèches. Autrement, l'année est considérée excédentaire quand la pluie dépasse la moyenne et elle est déficitaire dans le cas contraire. Appliqué aux séries pluviométriques de Jendouba et de Tibar (fig. 18, A et B), cet indice révèle presque les mêmes séquences trouvées dans la figure 17.

I.4.3.1.3. Indice de pluviosité

C'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle (P_i) à la hauteur moyenne (P_m) : $I_p = P_i / P_m$. Une année est qualifiée d'humide si le rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à cette valeur. Les graphiques de la figure 18 (C et D), permettent de retrouver encore une fois les cinq séquences pluvieuses et sèches.

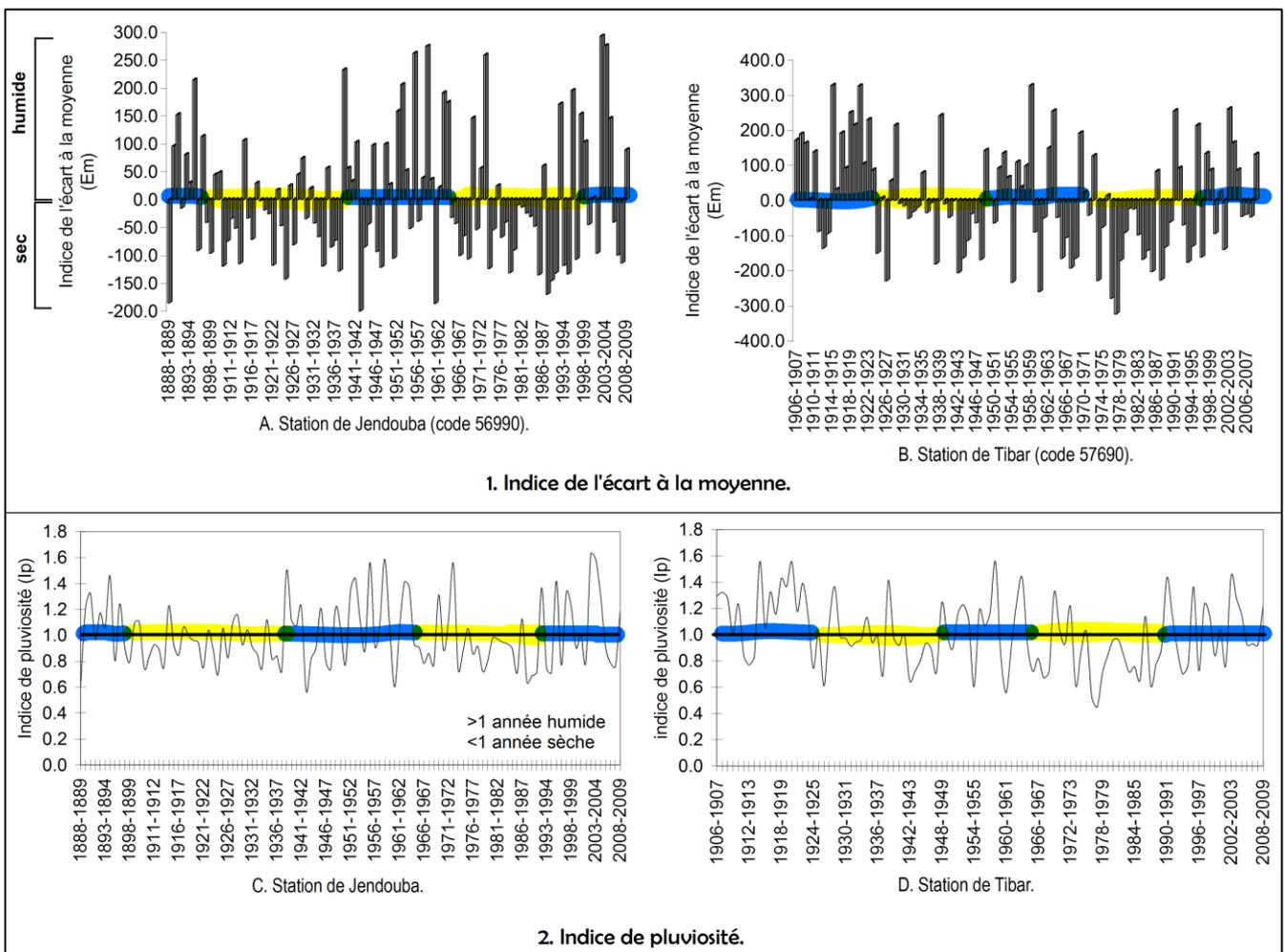


Fig. 18. Les indices de l'écart à la moyenne et la pluviosité ; les couleurs bleu et jaune signifient respectivement une séquence humide et une séquence sèche.

Il est clair que les trois indices pluviométriques aboutissent au même résultat : la succession de cinq périodes humides et sèches sur plus d'un siècle d'observations. Mais la nature et la durée des séquences définies changent d'une station à une autre. Dans le souci de mieux se renseigner sur ce fait, il convient d'appliquer des tests statistiques d'homogénéité pour quelques séries pluviométriques.

I.4.3.2. De nombreuses années de rupture

Une rupture peut être définie comme une discontinuité marquée par une date charnière qui indique une baisse ou une hausse de la pluviométrie.

I.4.3.2.1. Les tests statistiques de détection de rupture

Ils révèlent en fonction d'un seuil de détection donné des anomalies par rapport à des hypothèses de distribution statistique. Quatre tests sont ici appliqués : le test de Pettitt, de Buishand, de Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert. La réitération de la même date de rupture dans plus d'une station implique indéniablement que le changement de la pluviosité ne saurait seulement affecter un espace particulier mais devrait toucher plutôt une bonne partie de la région d'étude. Les résultats du calcul ainsi que les représentations graphiques de quelques ruptures sont donnés respectivement dans le tableau 7 et la figure 19

Tab. 7 : Tests statistiques et années de rupture dans les séries pluviométriques étudiées.

Tests statistiques d'homogénéité des séries						
Code-station	Nom-station	Période d'observation	Pettitt	Buishand	Lee et Heghinian	Hubert
52665	Feija	1889-2009	1987	1987	1987	1982 ; 2003
56990	Jendouba	1889-2009	1973	1948	1889	1889
58158	Zawem	1900-2009	1964	1964	1964	1960 ; 1996 ; 2003
57690	Tibar	1907-2009	1924	1924	1924	1924
50823	Beja	1900-2009	1958	1958	2008	1986 ; 1989 ; 2001
54524	Montarnaud	1914-2009	1966	1964	1914	1914
50591	Akwet-Siliana	1933-2009	1995	1995	1995	1981 ; 1995
54103	Makther	1889-1985	1914	1927	1908	1965 ; 1980
57332	Tejerwine	1925-2009	1936	1936	1925	1925
57678	Tela	1889-2009	1993	1993	1995	1981 ; 1995
52864	Ghardimaou	1952-2009	1995	1995	1995	1993
57018	Bou-Selem	1965-2009	2002	2002	2002	2002
54639	Neber	1938-2009	1989	1997	2002	1966 ; 1973
53839	Ksour	1914-2009	1989	1989	2002	-
52659	Fernana	1921-2009	1962	1962	1962	1939 ; 1944 ; 1980
50527	Ain Zaccar	1921-2009	1975	1975	1935	-

I.4.3.3. Essai de reconstitution

Il s'agit de définir les séquences à tendance humide et sèche à partir des dates de rupture.

I.A.1. Avant l'année 1914

D'ordinaire, pour juger l'appartenance d'une séquence à l'une des classes citées, il faut qu'elle soit délimitée par deux points de rupture. Dans ce cas, la limite inférieure est libre car les tests statistiques n'ont pas révélé de point de discontinuité autre que 1914. Mais la comparaison des volumes précipités avant et après cette date montre que le rapport est en faveur de la première période qui a connu déjà de nombreuses inondations (fig. 20). Elle est donc retenue comme une séquence à tendance humide.

I.A.2. De 1914 jusqu'au milieu des années vingt

Cette séquence à tendance sèche se situe entre 1914 et 1924/27. Elle apparaît surtout dans les séries pluviométriques de Makther et de Montarnaud à Mjez El-Beb (tab. 7).

I.A.3. ... jusqu'aux années 1935/36

Au cours de cette période les pluies annuelles ont sensiblement augmenté avant de marquer un fléchissement vers le milieu des années trente. Notons que l'année agricole de 1937/38 est considérée en Tunisie comme une année sèche (Noureddine, 1979 ; Bergaoui, 1989).

I.A.4. Entre 1937/38 et la fin des années quarante

Il s'agit bien d'une décennie à pluviométrie déficitaire. Son achèvement, indiquée par la date de rupture de 1948, coïncide avec l'année agricole de 1947/48 réputée sèche et évoquée par les historiens (Noureddine, 1979).

I.A.5 ... jusqu'au milieu des années soixante

Les volumes précipités ont nettement augmenté pendant cette époque, à cause des apports de grandes pluies survenues vers la fin des années cinquante (fig. 20).

I.A.6. Entre 1965 et 1989

Cette longue période à tendance sèche peut-être décomposée en deux séquences. La première, située entre les dates charnières de 1965 et 1973/75, est marquée par une pluviosité déficitaire à quelques exceptions près. Quant à la deuxième séquence sèche, comprise entre 1973/75 et 1989, elle est bien tranchée dans les archives pluviométriques. Ce fait a été observé aussi dans d'autres régions climatiques comme à Merguellil en Tunisie centrale (Kingumbi, 2006), à l'ouest algérien (Meddi *et al.* 2009) et en Afrique centrale (Kouadio *et al.*, 2007).

I.A.7 ... jusqu'au milieu des années quatre-vingt dix

C'est une courte période à dominante humide bien que certaines stations pluviométriques aient affiché un bilan déficitaire.

I.A.8. De 1993/95 à 2002

La plupart des relevés pluviométriques examinés ont montré une diminution nette des pluies au cours de cette période. La baisse a été particulièrement forte dans l'année agricole 1993-1994 (Kasseb, 1996).

I.A.9. Enfin, entre 2002 et 2009

C'est une séquence humide dont le bilan est gonflé par les apports des grandes inondations survenues dans la région (fig. 20).

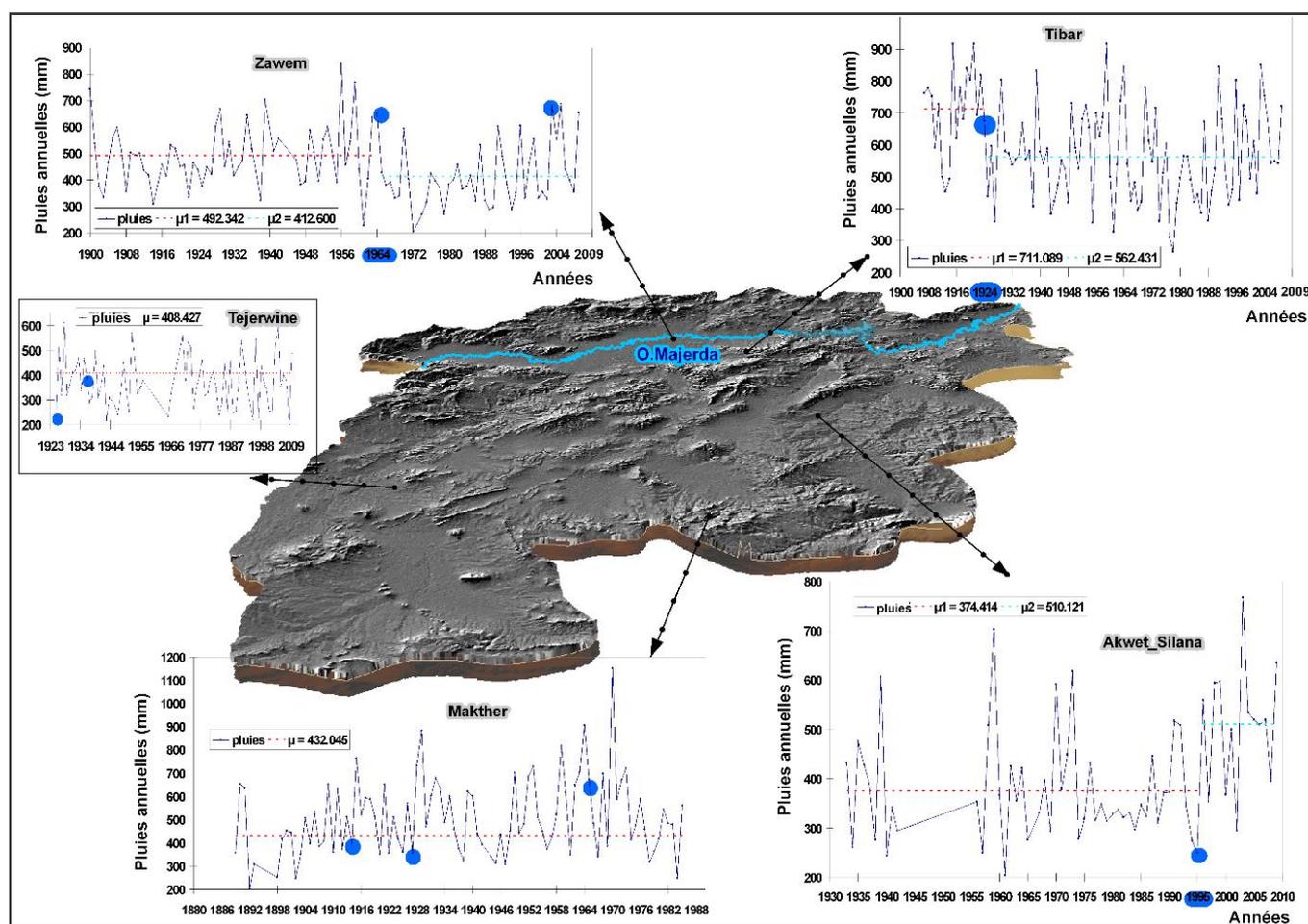


Fig. 19. Présentation de quelques ruptures pluviométriques détectées par les tests statistiques ; les dates déjà mentionnées dans le tableau 7 sont reportées et colorées en bleu. Pour la légende, on désigne par μ_1 et μ_2 respectivement la pluviosité annuelle avant et après la date de rupture. L'absence de μ_2 sur les graphiques de Tejerwine et de Makther ne signifie pas, pour autant, qu'il n'y a pas de variation du niveau des précipitations à travers le temps, mais que cette variation, si elle existe, n'est pas si significative.

Conclusions

Les indices pluviométriques et les tests d'homogénéité révèlent que la pluviométrie revêt deux caractères. D'une part, la quasi périodicité de la récurrence des épisodes pluvieux et secs, autrement l'alternance de cinq à neuf séquences à dominante tantôt humide tantôt sèche et inversement. D'autre part, la grande variabilité spatio-temporelle des séquences en question : dans l'espace, puisqu'une séquence humide par exemple dans une station donnée peut ne pas être enregistrée ailleurs ; dans le temps, car la durée qui sépare une séquence de l'autre varie très fortement.

I.4.3.4. L'aléa pluvieux et l'aléa inondation : essai de corrélation

Dans le présent cas d'étude, l'aléa pluvieux est associé à l'existence de neuf épisodes humides et secs présentés dans le paragraphe précédent. Quant à l'aléa inondation, il est lié à l'enregistrement de vingt-huit événements majeurs qui ont eu lieu depuis la fin du XIX^e siècle à nos jours, compte tenu des pertes en vies humaines et/ou des dégâts matériels inventoriés. Cette chronique est le fruit d'une recherche minutieuse parmi les documents d'archive dont les résultats sont présentés dans le huitième chapitre. L'idée consiste à superposer ces deux couches d'information afin d'établir des liens éventuels entre la distribution des dates de crues et la répartition des séquences pluvieuses et sèches (fig. 20). Le but est de chercher à mieux comprendre le phénomène d'inondation et prévoir ses tentatives d'évolution dans l'avenir. Il apparaît que la majorité des catastrophes a eu lieu au cours des périodes humides (fig. 20). La proportion y atteint 68 % avec un minimum de quatre événements par séquence, exception faite pour celle courte de 1989-1995. Le maximum se situe avant l'année de rupture de 1914 avec sept grosses crues enchaînées les unes aux autres. Cependant, bien d'autres inondations ont survenu lors des périodes sèches comme la célèbre catastrophe de mars 1973 ce qui s'explique par la variabilité des pluies. La même figure indique aussi que la récurrence des inondations a fortement diminué après l'année 1976 et surtout 1982, dates respectives de la mise en eau de la retenue des barrages de Bou-Hertma et de Sidi-Selem. En effet, à l'exception des crues de 1980 et de 1984, d'ailleurs spatialement localisées, aucun événement majeur ne s'est produit jusqu'à 2000. En cette année-là une grande crue a eu lieu annonçant

l'avènement de la récente séquence humide marquée jusqu'ici par quatre inondations. Cela montre que les ouvrages hydrauliques en général, malgré leur rôle certain, ne sont pas toujours en mesure de protéger les habitants contre les débordements.

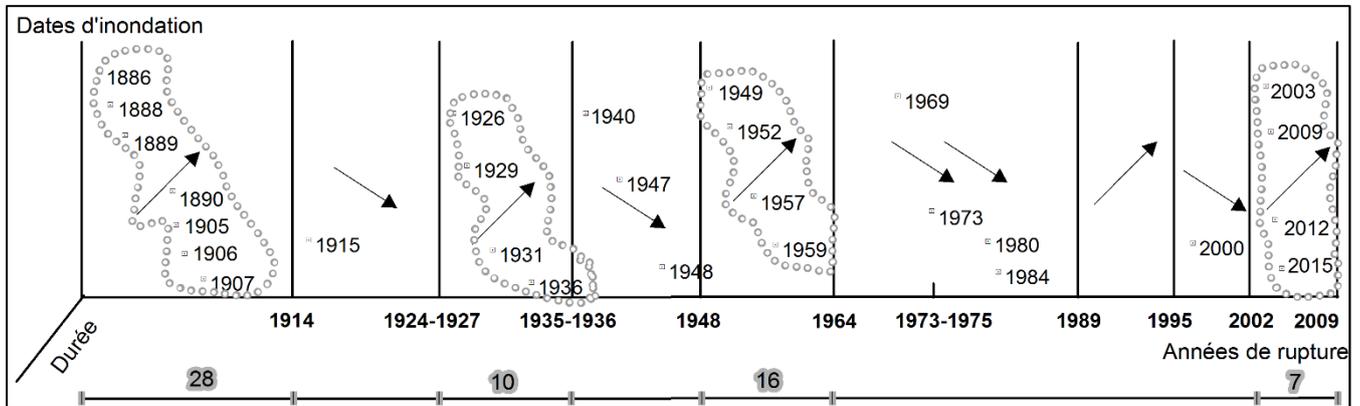


Fig. 20. Distribution des inondations enregistrées sur les périodes à tendances humide (flèche vers le haut) et sèche (flèche vers le bas).

Conclusions

Dans sa première partie, ce travail semble appuyer certains résultats auxquels sont parvenus les spécialistes. En effet, la pluviométrie dans les régions du cours moyen de l'oued Medjerda revêt au moins quatre caractères, à savoir : la médiocrité des volumes précipités, la disparité des distributions de pluies, la variabilité des jours pluvieux et enfin la modicité des intensités journalières pluviométriques. La répartition des précipitations montre de façon générale une signature spatiale fortement associée au facteur d'exposition aux fronts pluvieux.

Dans la seconde partie, l'exploitation des archives de pluies et d'inondations moyennant des outils statistiques et géostatistiques a permis d'attirer l'attention sur deux faits importants : 1) l'alternance de cinq à neuf séquences humides et sèches sur plus d'un siècle d'observations et 2) la forte corrélation entre le groupement des dates de grosses crues et la production des épisodes pluvieux. Cela ne signifie pas pour autant que de graves inondations n'ont pas eu lieu au cours des périodes sèches mais que leur fréquence est relativement faible. Il paraît aussi que les débordements des eaux ne dépendent pas fondamentalement de l'abondance des précipitations mais plutôt d'un ensemble de facteurs dont la responsabilité appartient en grande partie à l'Homme.

Conclusion du chapitre I

Les données naturelles du milieu plaident en faveur d'une prédisposition au phénomène d'inondation. La topographie est plane et basse dans les plaines, elle est montagneuse dans les reliefs limitrophes. La déclivité faible de la surface et la raideur des pentes sur les hauteurs impliquent évidemment des conditions favorables au ruissellement en amont et à la stagnation d'eau en aval. La lithologie est souvent tendre et sensible aux agents de l'érosion, essentiellement dominée par des formations argileuses à argilo-sableuses néogènes et quaternaires. Le sol argileux, à cause de sa faible porosité, devient rapidement saturé empêchant toute infiltration d'eau. Le réseau hydrographique est fortement développé et actif, donnant lieu à un chevelu dendritique et à de larges vallées méandriformes et confluentes. Ce dispositif favorise le ruissellement pluvial et l'écoulement concentré mais présente aussi des difficultés de drainage dans les terrains déprimés. Enfin la pluviométrie, malgré sa modestie et sa variabilité, est à caractère persistant et répété fournissant ainsi des volumes d'eau considérables à l'origine d'inondations sérieuses.

Chapitre II. Le bâti, le barrage

Malgré leur caractère inondable et insalubre, connu depuis longtemps, les plaines moyennes de la vallée de la Medjerda demeurent attractives pour les populations humaines. Elles doivent leur attraction à la fertilité du sol de vocation agricole, et à l'importance stratégique du terrain qui contrôle aussi bien les communications et les trafics vers l'intérieur du pays et vers la mer que vers l'Algérie. La majorité de la population se concentre dans des agglomérations urbaines développées sur les bords de l'oued Medjerda. En dehors des villes, l'occupation humaine est assez forte à proximité du fleuve et ses affluents ainsi que le long des axes majeurs de circulation routière et ferroviaire. Les terres habitées sont déprimées, à peine inclinées, imperméables, et appartiennent parfois à l'emprise naturelle des eaux courantes. Et pourtant, l'Homme est venu s'y installer en négligeant quelquefois le risque d'inondation et de stagnation des eaux si évident. Le résultat était de fréquents et dangereux débordements qui semblent augmenter, paradoxalement, après la construction de nombreux barrages-réservoirs sur les principaux oueds. Car ces aménagements hydrauliques sont responsables du changement du régime hydro-sédimentaire naturel, qui s'est traduit à la fois par un affaiblissement des écoulements, un rétrécissement des bandes actives et un engraissement des lits fluviaux. Ils sont aussi à l'origine de nouveaux problèmes qui les concernent directement, relatives au risque des éclusés et au phénomène d'envasement des retenues, rendant plus délicat la gestion des crues en temps de crise.

En s'appuyant sur des vues aériennes et satellitaires de même que des photographies de paysages, le présent travail vise à montrer les principales imprudences commises par l'Homme lors de l'aménagement de son milieu fluvial à risque d'inondation. Les imprudences sont en rapport avec l'occupation progressive et irréfléchie des espaces inondables et la construction des barrages, perturbant l'écoulement normal des eaux d'oueds et les menaces qui en découlent.

II.1. Une occupation humaine dense et continue sur des terres inondables

Dans la partie moyenne de la vallée de la Medjerda, la majorité de la population riveraine vit dans les villes. Depuis l'indépendance et surtout lors des années 1970-90, la région connaît une croissance urbaine soutenue accompagnée d'une extension des surfaces urbanisées (Belhedi, 2005, p. 1). Le processus d'urbanisation est étroitement lié au processus de développement économique, fondé sur des infrastructures hydro-agricoles modernes. Aujourd'hui, près de 156500 habitants résident dans les agglomérations urbaines, bordant l'oued Medjerda et ses affluents ou s'en approchant (Institut National de la Statistique, 2020). Mais certaines populations urbaines et aussi rurales sont sujettes à de fréquents débordements et stagnations prolongées des eaux, très gênants et souvent lourds de conséquences. La responsabilité leur incombe puisqu'elles sont parfois installées aux dépens des sections d'oueds et dans des zones de convergence des écoulements (photos 21-25). Les exemples d'empiètement des riverains sur le milieu fluvial sont nombreux et ressortent à la simple lecture d'une carte topographique ou d'une photographie aérienne (fig. 21). Parmi les plus expressifs, outre l'agglomération de Bou-Selem, figurent ceux de la ville de Jendouba et de Mjez El-Beb qui feront l'objet d'une étude détaillée (fig. 22, 23 et 24).

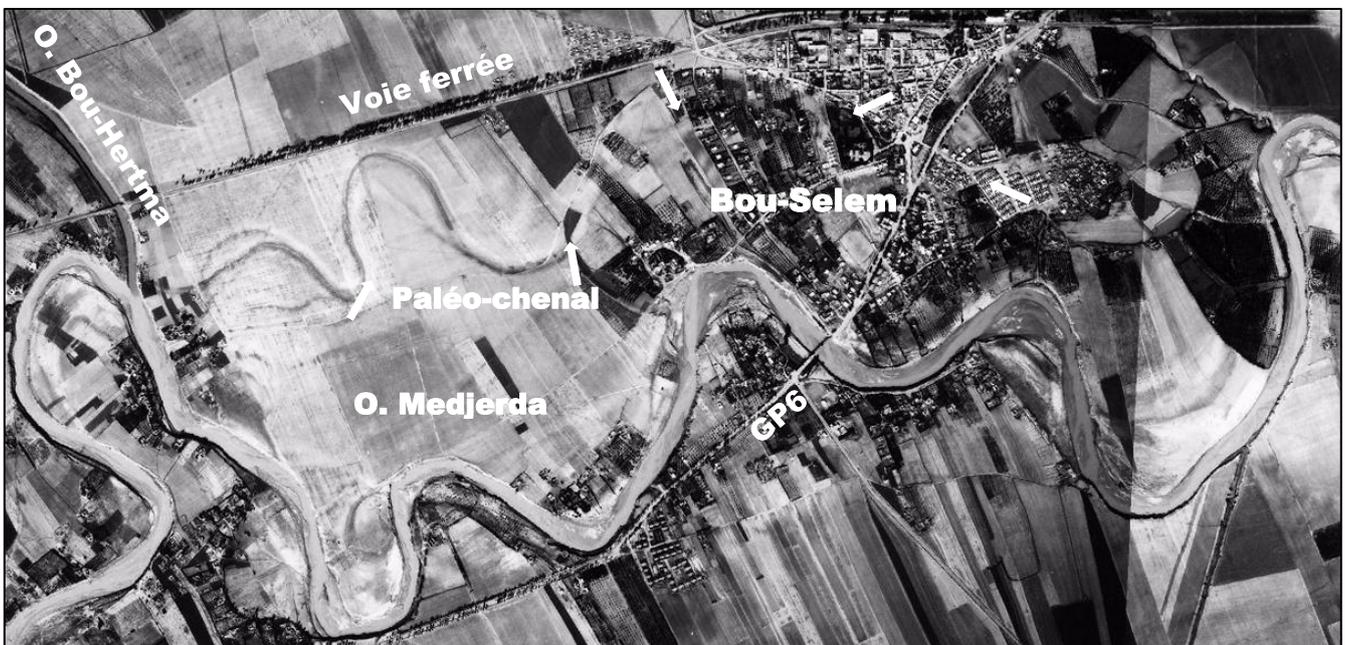


Fig. 21. Photo aérienne de 1974 montrant l'ancien cours de la Medjerda, passant au cœur de la ville de Bou-Selem, avant d'être envahi, aujourd'hui totalement, par le bâti.



Photo 23. Le quartier urbain d'Ettatawer à Jendouba (x : 481074 ; y : 4037976). Parcellisation de terrains inondables à lotir, attestée par des bouteilles en plastique à goulot inversé (Cl., personnel, 01-03-2015).



Photo 24. La cité d'El-Hena à Bou-Selem (x : 496978 ; y : 4050959). Station de transport en commun rural, placée au fond du lit ancien de la Medjerda, déjà bétonné! (Cl., personnel, 28-04-2017).



Photo 25. Le centre-ville de Mjez El-Beb, vue à l'amont du pont et en regardant vers le sud (x : 454389 ; y : 4055993). Encombrement du lit de l'oued Medjerda par la ripisylve gênant la circulation des eaux, et rejet de tas de décombres au sommet de la berge droite (Cl., personnel, 30-04-2017).

Photos 23, 24 et 25. Photos illustrant les principales imprudences commises par l'Homme dans le cadre de l'urbanisation, conduisant à l'aggravation et même au déclenchement du risque d'inondation.

II.1.1. Cas de l'agglomération urbaine de Jendouba

La ville de Jendouba se trouve à l'entrée (*Eddekhla* en arabe) d'un vaste terroir d'openfield céréalier. Elle est bâtie en grande partie sur la rive droite de l'oued Medjerda qui s'écoule au milieu d'une large plaine alluviale plate (141 m d'altitude), bordée par des reliefs modestes mais escarpés. Elle doit son existence à un marché hebdomadaire (souk El-Arba qui signifie marché du mercredi), créé avant l'occupation française, et à une voie ferrée reliant Tunis-Ghardimaou à Souk El-Ahras en Algérie, achevée en 1884 (Cagnat et Saladin, 1894, p. 258 ; Khanoussi, 2013, p. 44). Aujourd'hui chef-lieu de gouvernorat du même nom, la ville compte 76068 habitants en 2014 contre 61092 en 1994, 44000 en 1984, et seulement 2182 individus en 1931 (Bonniard, 1934, p. 445 ; recensements de l'INS). La croissance démographique s'est traduite par une extension notable des surfaces urbanisées. Elles sont passées d'environ 64 ha en 1948 à 134 ha en 1974 à 209 ha en 1989 et à 303 ha en 2012 (fig. 22). Autrement, près de 4 ha en moyenne se sont transformés en béton chaque année. La densité de la population est en augmentation, et atteint 304 hab./km² en 2009 contre une moyenne nationale de 64 hab./km² (MEAT, 2010, p. 19 ; MEAT, 2012, p. 33). Les nouveaux quartiers urbains se sont développés autour du noyau ancien particulièrement dans sa partie sud, c'est-à-dire un peu loin du cours de la Medjerda. Mais certains d'entre eux se sont implantés le long des berges de l'oued et sur des terrains franchement inondables (fig. 22 et photo 25). C'est le cas du quartier de Timiriya qui était en fait un champ de tir des gendarmes français et celui de Zghaddiya limitrophe ainsi que celui de La'Hwailiya plus en amont. Dans ces quartiers d'habitat en partie non-réglementaire, le risque de débordement des eaux fluviales est fréquent et les dégâts sont souvent lourds (photo. 26). Et pourtant, on assiste à une densification du bâti attestée par de nouvelles constructions encore en briques rouge (fig. 22, photos 27-29).



Photo 26. Constructions et canalisations des eaux pluviales au quartier d'Ezghaddiya, sérieusement atteintes par les eaux de crue de l'oued Medjerda en mai 2009 (Cl., personnel, 5/5/2009).

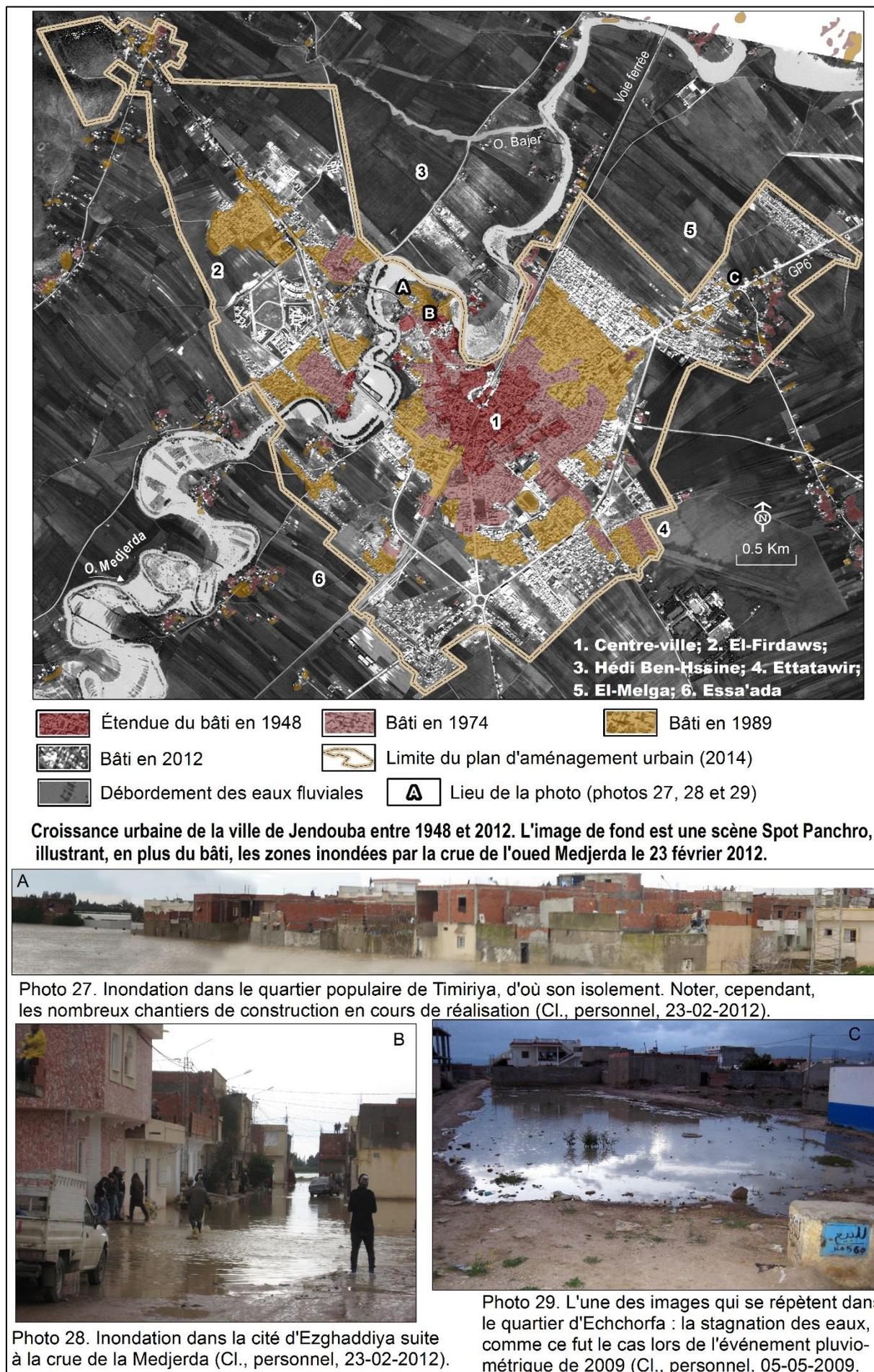


Fig. 22. Extension spatiale de l'agglomération de Jendouba durant la période 1948-2012 et problèmes d'inondation et de stagnation des eaux dans les terres déprimées.

La périphérie de l'aire urbaine connaît aussi une densification et une extension des espaces bâtis, malgré les contraintes du milieu naturel. L'un des exemples les plus expressifs existe dans le secteur d'El-Melga, où plusieurs bâtisses sont alignées le long d'une route qui emprunte réellement le fond du paléochenal de Mellègue dont le lit actuel est à 1,5 km environ vers l'est (fig. 23). À l'occasion des événements pluviométriques majeurs comme ceux de mai 2009 et de février 2012, l'oued reprend son ancien cours et cause de sérieux problèmes aux habitants (photo 29 de fig. 22 et fig. 23).

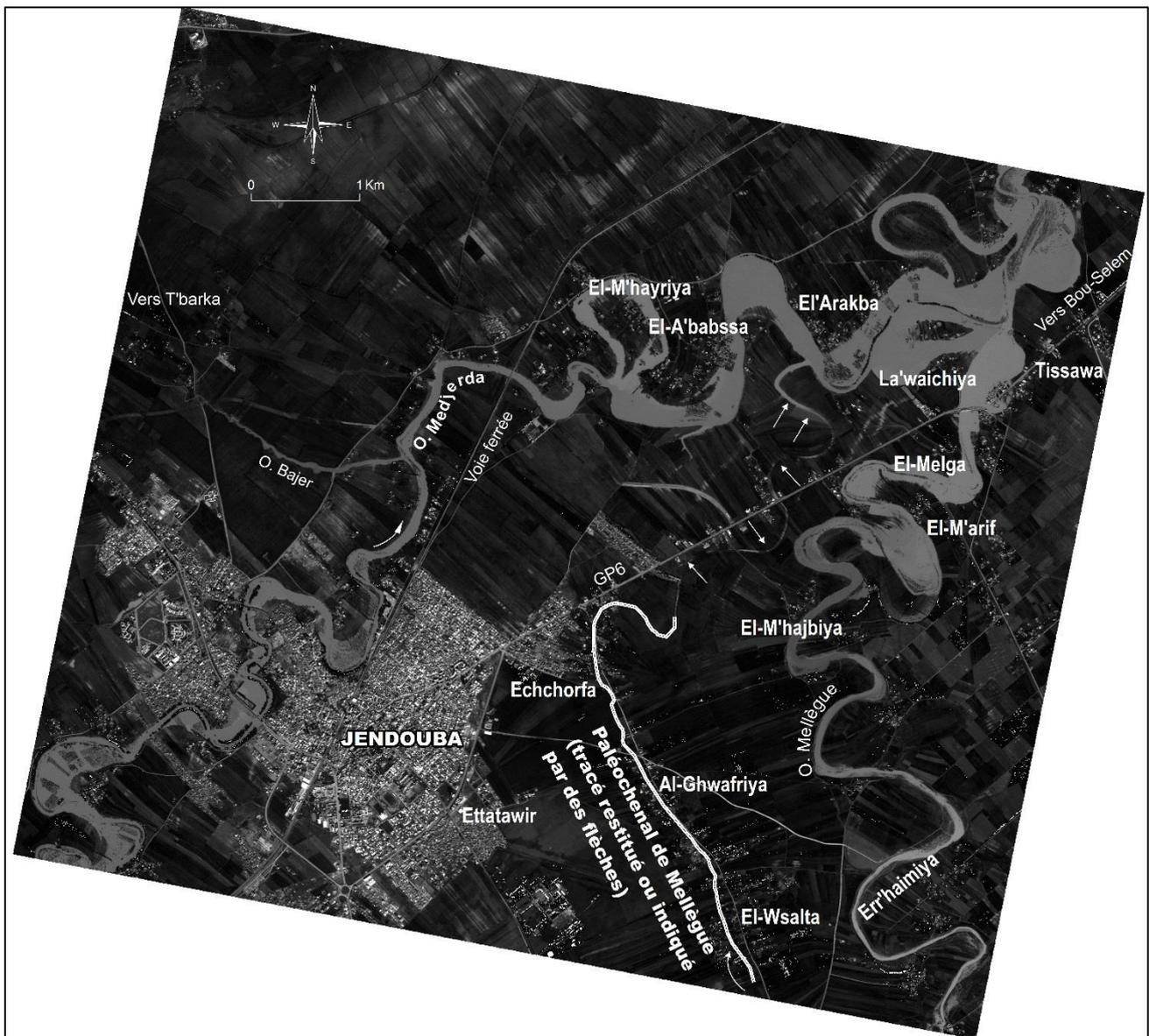


Fig. 23. Processus de suburbanisation dans la ville de Jendouba aux dépens des sections d'oueds abandonnés comme celui de Mellègue. C'est le cas des quartiers d'Echchorfa, d'Al-Ghawafriya et d'El-Wsalta. L'image de fond est un extrait de la scène Spot 5 panchromatique. Elle révèle d'une part, les débordements des oueds Medjerda et Mellègue lors de la crue du 23 février 2012, et d'autre part, la réactivation du paléochenal de Mellègue où s'installent plusieurs concentrations humaines.

II.1.2. Cas de l'agglomération urbaine de Mjez El-Beb

La ville de Mjez El-Beb (passage de la porte) se situe de part et d'autre de l'oued Medjerda qui traverse une plaine alluviale très uniforme, dominée par des crêtes basses aux versants raides et découpés. Elle conserve depuis longtemps un fort pouvoir d'attraction sur les populations, en raison de la fertilité du sol à base céréalière et de la position stratégique du site comme lieu de transit obligé des trafics. La population urbaine enregistre depuis au moins le XIX^e siècle une croissance continue mais à des rythmes variés selon les périodes. Elle était de quelque 4408 habitants entre 1906 et 1956, puis s'est élevée à 10275 en 1975 à 18141 en 1994 et à 22287 en 2014 (Violard, 1906, p. 123 ; Poncet, 1959, p. 250, Statistiques de l'INS). La densité urbaine, calculée à partir de la superficie du plan d'aménagement urbain de 2009 (7,96 km²), est de l'ordre de 2800 hab/km² contre une moyenne régionale du gouvernorat de Beja égale à 87 hab/km² en 2004 (INS, 2004, p.39). La croissance urbaine se manifeste aussi par un fort développement de l'habitat avec un rythme accéléré dès les années 1970. Les surfaces bâties, qui n'étaient que 18 ha environ en 1948, ont presque doublé en 9 ans seulement (1973-1982) passant de 20 ha à 41 ha, et plus que sextuplé en 31 ans (1982-2013) devenant 268 ha (fig. 24). L'accroissement moyen annuel des espaces bâtis atteint respectivement 2,33 % et 7,32 % pendant les deux périodes d'observation. L'étalement urbain s'est fait le long des axes routiers mais aussi à proximité des cours d'eau et dans la zone de divagation de l'oued Medjerda. Les quartiers d'Ezzouhour et d'El'Hwerir par exemple se sont développés au milieu des paléoliths fluviaux dont les traces sont reconnaissables sur les différentes photographies aériennes examinées (fig. 24). D'ailleurs, il est étonnant que ces derniers ne figurent ni sur les cartes et plans topographiques de la ville, ni sur les documents cartographiques établis par nos devanciers (Jaziri, 2009 ; Ayari *et al.*, 2016 ; Fehri, 2018). Mais il n'est pas étonnant de voir de nombreuses maisons, voire des quartiers entiers affectés à chaque forte pluie par des inondations ; car l'installation humaine s'est produite souvent dans des lieux inhabitables d'un point de vue des conditions hydromorphologiques.

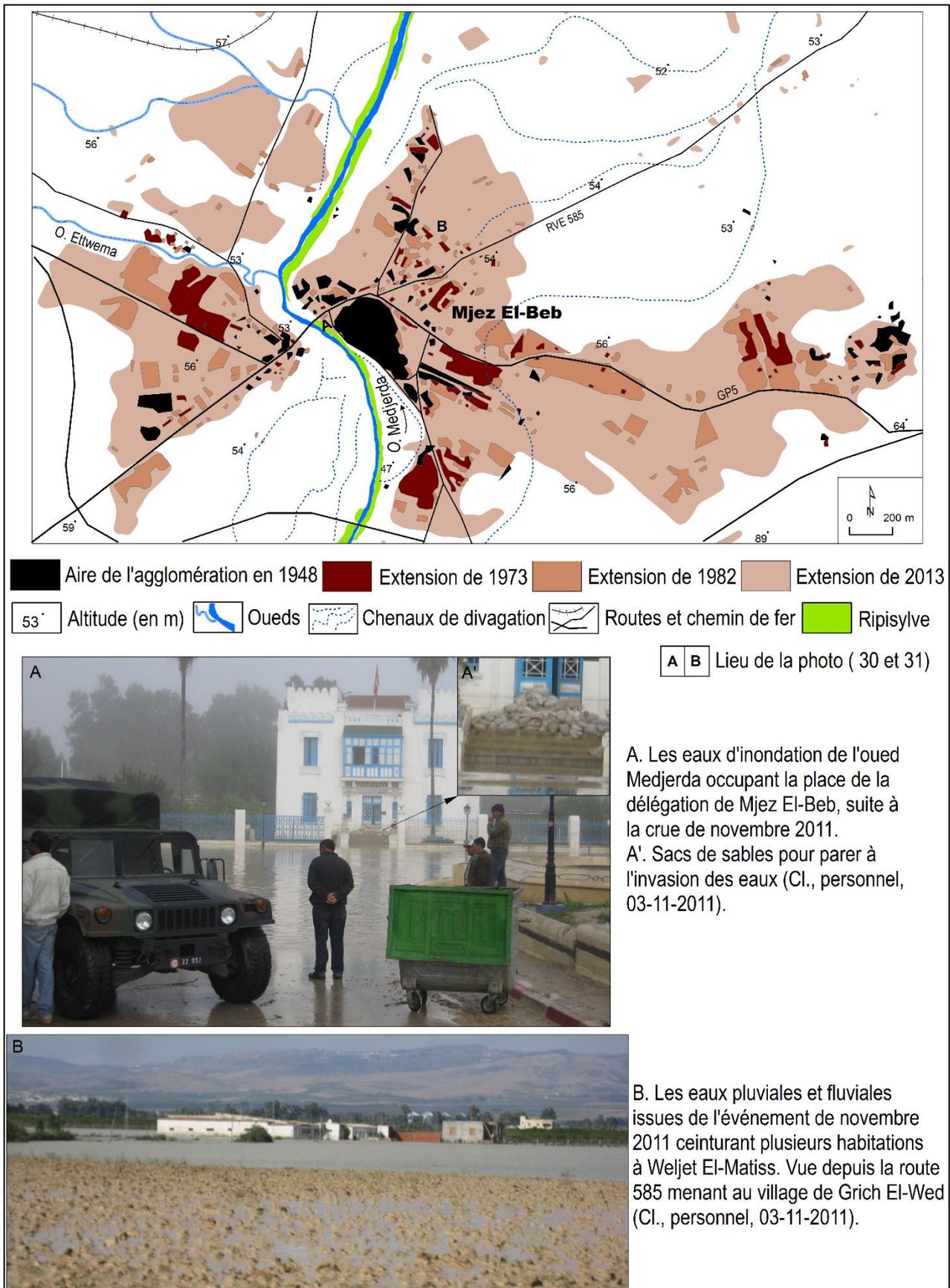


Fig. 24. Extension spatiale de la ville de Mjez El-Beb (1948-2013), parfois au détriment des sections naturellement inondables des oueds.

II.2. La politique des barrages et les risques associés

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, la vallée de la Medjerda et ses affluents étaient des organismes libres, peu perturbés par l'action de l'Homme. Les crues étaient fréquentes et puissantes, et les sections d'oueds étaient larges et dégagées. Certaines photos anciennes trouvées dans les archives et comparées avec celles récentes en témoignent (photos 33 et 34). Mais dès 1954, le réseau fluvial principal subit d'importants travaux d'endiguement qui s'inscrivent dans le cadre de la stratégie nationale de mobilisation et d'exploitation des eaux de surface. La nouvelle approche d'aménagement et de développement du territoire vise la sécurisation de l'accès à l'eau, ressource rare, pour subvenir aux besoins sociaux et économiques croissants. Elle se fonde principalement sur l'installation d'un réseau de grands barrages-réservoirs interconnectés, formant aujourd'hui le système hydraulique de la Tunisie du Nord (fig. 25 et 26).

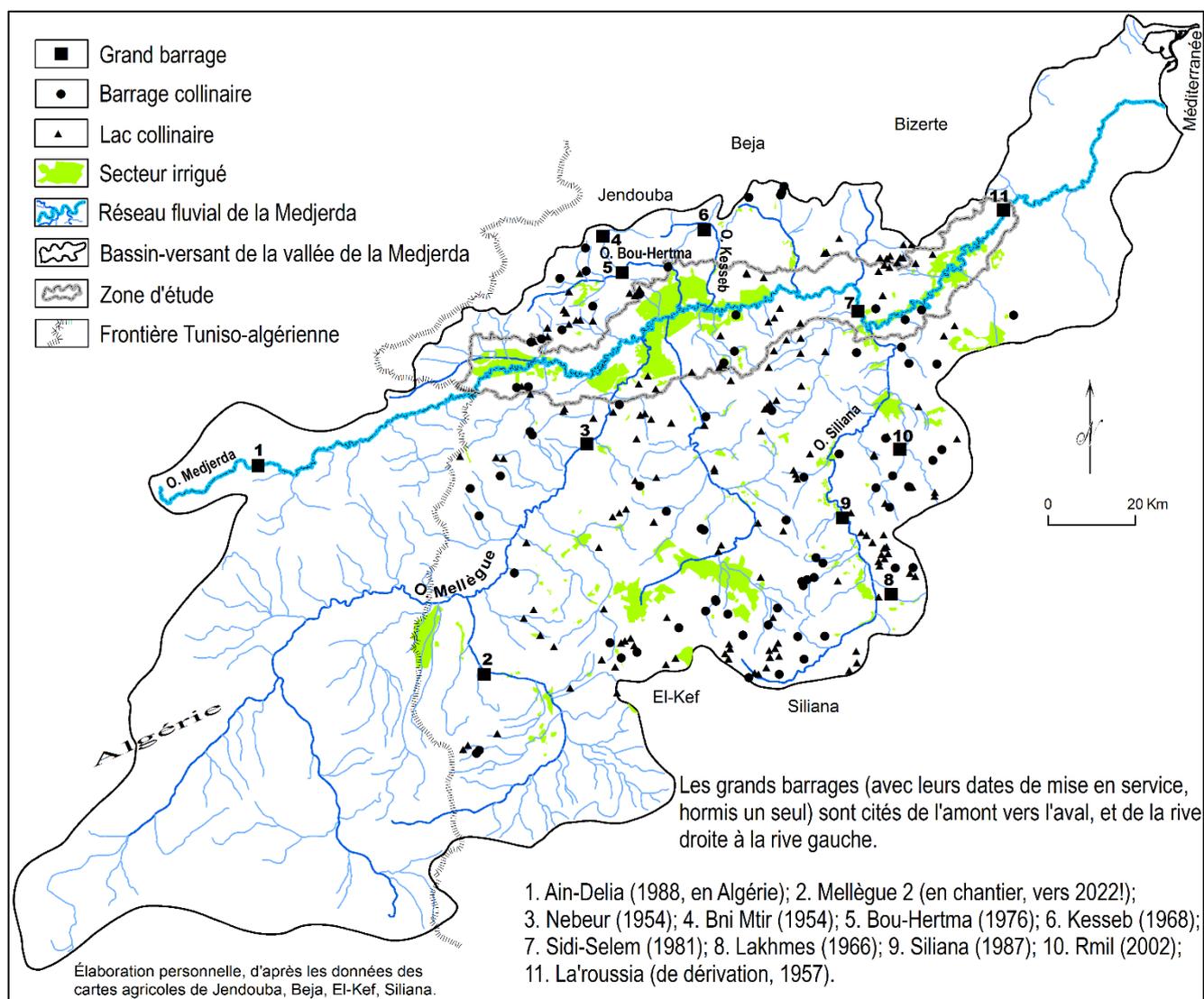


Fig. 25. Les ouvrages de grande et moyenne hydraulique ainsi que les terroirs irrigués appartenant à la partie centrale de la vallée de la Medjerda.

L'interconnexion des ouvrages permet la régulation quantitative et qualitative des flux d'eau ainsi que le transfert inter et intra-régional (Cherif, 2008, p. 95 et 97). Dans la partie moyenne du bassin-versant de la Medjerda, il y a actuellement neuf barrages construits entre 1954 et 2002 : quatre sur la rive droite (Nebeur, lakhmes, Siliana, Rmil), trois sur la rive gauche (Bni Mtir, Bou-Hertma, Kesseb), et deux sur le cours principal (celui de Sidi-Selem, le plus grand ouvrage du pays, et celui de dérivation de La'roussia). Il existe également 77 barrages collinaires et 156 lacs collinaires destinés à mobiliser les eaux de ruissellement et à réduire l'alluvionnement des vastes retenues (fig. 25). Les grands barrages ont plusieurs fonctions répondant à différentes demandes, relatives au développement de l'irrigation (environ 1000 km² de périmètres irrigués), à l'approvisionnement en eau potable, à la protection contre l'inondation et à la production de l'énergie électrique.

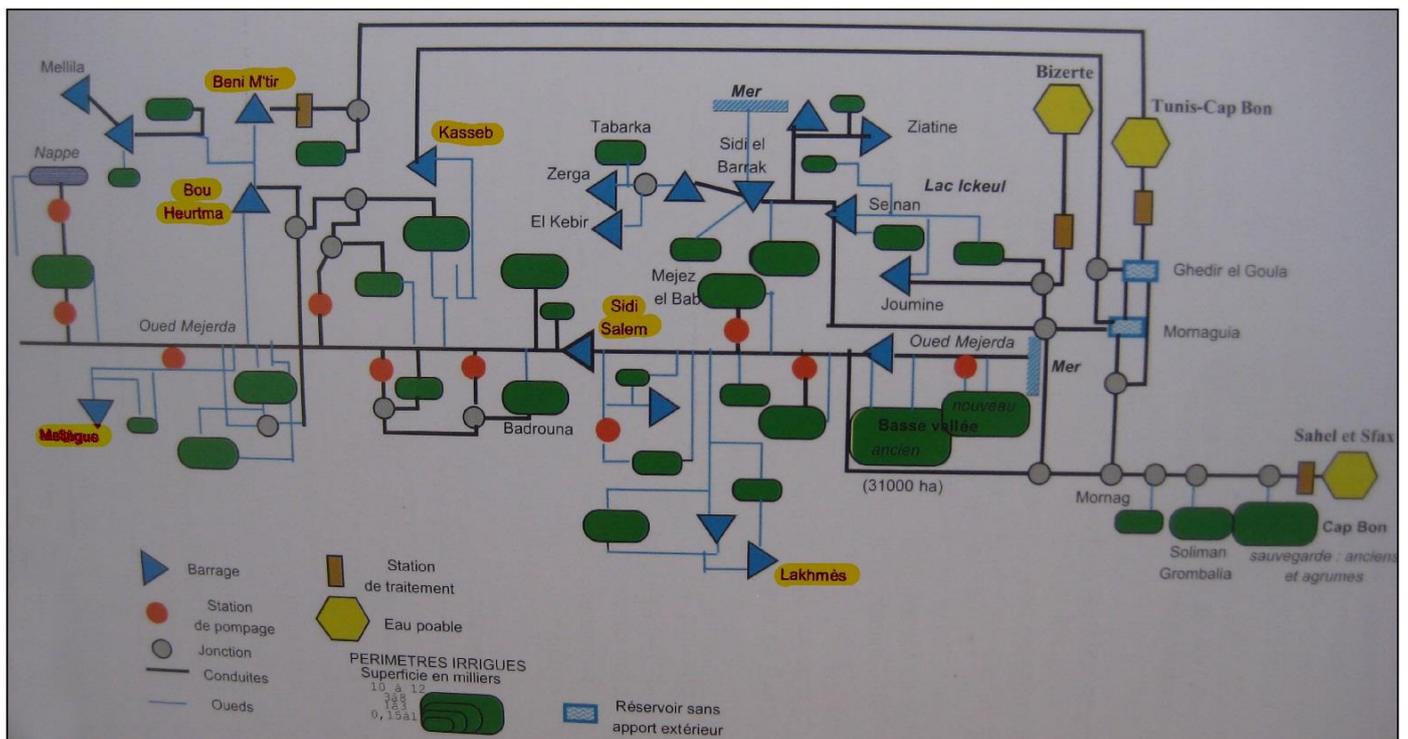


Fig. 26. Schéma topologique du système hydraulique interconnecté du Nord de la Tunisie. Certains noms de barrages figurant au texte sont mis en surbrillance (d'après Cherif, 2008, p. 94).

Sans doute, la tâche de gestion des crues majeures est la plus délicate à cause de sa sensibilité auprès de la population. Les sociétés riveraines se plaignent souvent des lâchers d'eau intempestifs des barrages qu'ils considèrent comme responsables des débordements. Or, certains de ces ouvrages sont quelquefois incapables de stocker

l'eau au-dessus d'une certaine limite. Quand la cote maximale est atteinte, l'écrêtement des crues devient difficile et la situation exige forcément des déversements qui échappent parfois aux autorités responsables (photo 32). Les volumes lâchés gonflent les flots déjà imposants des oueds et rendent quasi-inévitables l'exposition aux inondations.



Photo 26. La retenue du barrage de Bou-Hertma étant pleine, surverse sur le seuil de surface (cliché : L. Lahmar, 23/4/2009).

Le risque de déversement, qui est en élévation, est dû en outre à la réduction de la capacité de stockage des barrages suite à leur envasement progressif et souvent rapide. L'envasement affecte particulièrement la moitié des retenues dont trois sur quatre sont sur la rive droite. Il atteint des proportions inquiétantes en 2018 : 71,94 % à Nebeur, 52,23 à Siliana, 40 % à Rmil et 33,68 % à Sidi-Selem. Autrement, la retenue normale de Nebeur sur l'oued Mellègue sera presque totalement colmatée vers 2025, après seulement 71 ans de service, sur la base d'un rythme moyen de colmatage estimé à 1,4 % (Cherni *et al.*, 2010, p. 754). Le réservoir de Sidi-Selem enregistre déjà une perte de capacité d'environ 12,1 % en l'espace de vingt ans entre 1981 et 2002 (Abid, 2003, p. 10) et accumule annuellement près de 8,31 Mm³ de sédiments (ONAGRI, 2018, p. 8). La sédimentation touche également les cours d'eau qui subissent depuis leur endiguement d'importants changements, liés aux

caractéristiques des débits et à la morphologie des lits. Elle se voit le mieux dans les sections méandriformes et densément végétalisées, favorisant le piégeage des alluvions (photos 33 et 34).



Photos 27 et 28. Deux photos prises en 1905 et en 2009, immédiatement en aval du pont de Zghaddiya à Jendouba (x : 479097 ; y : 4040204). Elles montrent que le lit moyen de la Medjerda est devenu étroit, suite à son envahissement par la végétation (cliché de gauche : trouvé sur le site internet www.delcampe.net; cliché de droite : L. Lahmar, 14/4/2009).

Les dépôts de remblaiement sont à l'origine d'un double processus d'aggradation et de rétrécissement des lits fluviaux. À titre d'exemple, la comparaison des profils en travers de l'oued Medjerda au niveau de la station hydrométrique de Slouguia montre que la section mouillée a diminué de 33 % en deux ans uniquement (2001-2003, INAT *et al.*, 2004, p. 29). De plus, la débitance du cours aval de la Medjerda qui était de 1600 m³/s en 1970, c'est-à-dire avant la construction du barrage de Sidi-Selem, n'est plus aujourd'hui que de 250 m³/s (DGBRE, 2012, p. 79). Le résultat est, en de nombreux endroits, une diminution de l'aptitude des oueds à contenir des volumes d'eau comme auparavant, et donc une augmentation de l'occurrence des débordements.

Conclusion du chapitre II

La responsabilité humaine dans l'aggravation et même le déclenchement du risque d'inondation, dans le bassin moyen de la Medjerda, est indéniable. Elle se manifeste à travers l'occupation très proche des berges basses et des sections abandonnées des oueds. Ces aires inondables, et pourtant habitées, ne cessent de s'accroître à cause d'une forte urbanisation mal contrôlée. L'analyse diachronique des photos aériennes et satellitaires de différentes dates (1948, 1973, 1974, 1982, 2012, 2013) couvrant les villes de Jendouba et Mjez El-Beb, révèle que le taux d'accroissement moyen annuel des espaces bâtis est respectivement 3,73 % et 3,84 % durant 64 et 65 ans. L'imprudence de l'Homme apparaît aussi à travers les grands aménagements hydro-agricoles établis sur les principaux cours d'eau. Ces aménagements, malgré leurs avantages incontestables, sont impliqués dans le problème d'inondation. Ils ont provoqué un changement du régime hydro-sédimentaire, matérialisé par des processus de resserrement et d'engravement des lits fluviaux. La réduction de la surface d'écoulement implique l'augmentation des possibilités qu'un débordement pouvant se produire. De plus, les ouvrages hydrauliques éprouvent eux-mêmes des difficultés à cause du phénomène d'envasement rapide des retenues. Cela pose des problèmes supplémentaires dans l'avenir, relatifs à la sécurité des barrages, à leur coût d'entretien et de maintenance, et à l'épuisement des sites de grands barrages de remplacement.

Deuxième partie

Le risque fluvial dans les fonds de vallée de la Medjerda, un phénomène ancien : approche géoarchéologique

**Chapitre III. L'Histoire de la mise en place des plaines alluviales à
partir des travaux antérieurs**

**Chapitre IV. Évolution géomorphologique des paysages fluviaux au
cours des temps historiques**

**Chapitre V. La géoarchéologie fluviale, comme outil de caractérisation
de la dynamique fluviale historique et des interactions
milieux-sociétés**

Introduction

Malgré la grande réputation des plaines alluviales de la moyenne Medjerda, si l'on considère l'importance de l'hydrosystème fluvial, la richesse en vestiges archéologiques et la fertilité des sols (lesquels expliquant d'ailleurs leur attractivité à travers les âges), cet espace est longtemps resté à l'écart du champ d'observation des géomorphologues, et il n'a commencé à vraiment occuper les chercheurs que depuis une vingtaine d'années. Les publications qui lui ont été réservées apportent des éclairages utiles à la connaissance de la chronostratigraphie des dépôts alluviaux ainsi qu'à l'évolution des paléoenvironnements et des paysages depuis la fin du Tardiglaciaire. Dans cette partie, les principaux résultats évoqués s'attachent à analyser les tendances de l'évolution des plaines alluviales au cours des temps historiques. Outre l'intérêt porté à la géomorphologie des fonds de vallée à travers une présentation de cas d'étude choisis dans différentes régions du bassin fluvial, l'apport de cette partie réside dans la mise en évidence d'interactions nature-société et des risques qui peuvent en résulter, notamment ceux liés aux crues (inondations). Sur un plan général, l'accent est mis sur deux idées principales : d'une part, l'agencement des accumulations alluviales et leur position par rapport aux ruines antiques en vue d'analyser l'évolution enregistrée depuis l'Antiquité ; d'autre part, les caractéristiques de la dynamique actuelle des cours d'eau et les risques découlant de l'anthropisation récente des fonds de vallée. L'objectif est de mieux comprendre les tendances de l'évolution récente marquée par la prolifération des formes d'occupation et d'aménagement.

Chapitre III. L'histoire de la mise en place des plaines alluviales à partir des travaux antérieurs

Ces travaux sont en rapport avec des recherches morphostratigraphiques et géomorphologiques.

III.1. Les études morphostratigraphiques

Mis à part le travail de H.W. Scharpenseel et H. Zakosek (1979) dans le secteur de Bou-Selem et celui de Steinmann et Bartels (1982) dans la région de Siliana, l'ensemble des études morphostratigraphiques dans la moyenne Medjerda ne remonte pas au-delà d'une vingtaine d'années. Un programme de recherche (1999-

2009) portant sur la reconstitution des milieux fluviaux et des paléoenvironnements holocènes dans le Nord de la Tunisie a relancé les recherches par le biais de la collaboration interdisciplinaire. Les plaines de la moyenne vallée de la Medjerda tiennent une place importante dans les activités de ce programme conduit sous la direction générale du Prof. C. Zielhofer. Grâce à l'interprétation des résultats de nombreuses analyses et datations paléoenvironnementales, l'équipe de recherche est parvenue à établir une chronostratigraphie relativement détaillée des formations alluviales associées aux eaux courantes. À cet égard, l'examen des coupes stratigraphiques les plus complètes, ouvertes naturellement par les phénomènes de sapement de berge, révèle la présence de cinq principales séries sédimentaires distinctes associées à des paléoenvironnements fluviaux et appartenant en grande partie à l'Holocène et aux temps historiques. Ces paléoenvironnements fluviaux peuvent être replacés dans la chronologie suivante :

III.1.1. Le Pléistocène terminal

Il convient de noter d'abord que dans le schéma stratigraphique établi par C. Zielhofer *et al.* (2002), les cinq séries sédimentaires alluviales et les paléosols interstratifiés à l'intérieur de ces séries sont désignés S1, S2, S3, S4 et S5 (fig. 27). Ainsi, le dépôt plus ancien datant du Pléistocène récent constitue la première série alluviale. Celle-ci débute par un sédiment souvent argileux de teinte rose-rouge et contenant différentes concrétions calcaires (S1a). Elle est surmontée par un horizon pédologique (P1) dont l'achèvement est antérieur à 13.200 Cal. B.P. puisque la couche sus-jacente incorpore des objets de facture préhistorique (Zielhofer *et al.*, 2002). Le matériel recueilli comprend des restes d'ossements, des microlithes, des traces de foyers et des concentrations de coquilles interprétées comme des escargotières (S1b). Une datation sur des fragments de charbon de bois *in situ* à Chemtou a donné un âge de 11.160 ±50 B.P. ce qui cadre avec la civilisation ibéromaurusienne de l'Épipaléolithique (Zielhofer et Faust, 2003). Les auteurs suggèrent la dominance d'un climat humide, pendant la phase de pédogenèse, alternant avec des épisodes chauds à l'origine des formes de rubéfaction des sédiments.

Pendant la transition Pléistocène-Holocène vers 13.200 Cal. B.P. (début S2), la phase d'aridification tardiglaciaire se traduit par la mise en place d'un sédiment fin qui se prolonge jusqu'à 12.400 Cal. B.P. avec un taux de sédimentation de 0,6 mm/an. Le régime de remblaiement alluvial des vallées se poursuit entre 12.400 et 11.800 Cal. B.P. (fig. 27) mais la taille des alluvions observées dans les berges de l'Ain El Gsir et de l'oued Meliz devient plus grossière (S2a), témoignant d'une augmentation de la compétence fluviale peut être sous l'effet du contrôle climatique prévalant au Dryas récent (Zielhofer *et al.*, 2002).

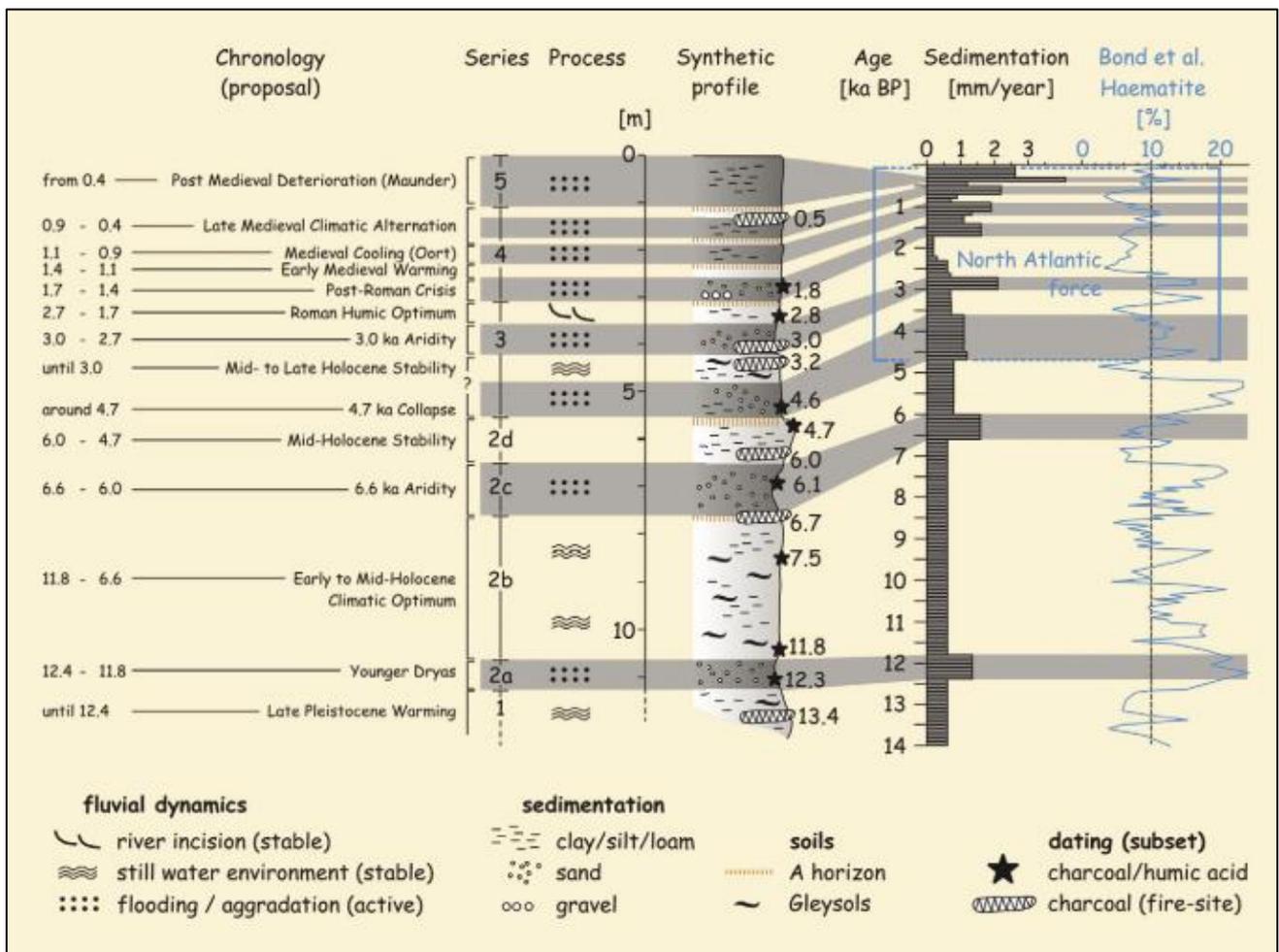


Fig. 27. Synthèse stratigraphique synthétique des dépôts accumulés dans les plaines de la moyenne vallée de l'oued Medjerda (Zielhofer *et al.*, 2005).

III.1.2. L'Holocène antéhistorique

Cette période est représentée par trois séries alluviales mises en place entre 11.800 et 4700 Cal. B.P. (fig. 27). La série la plus ancienne (S2b) va jusqu'à 6600 Cal. B.P. et montre souvent un sédiment fin à texture argilo-limoneuse avec parfois des traces

d'hydromorphie. Selon C. Zielhofer *et al.* (2004), les caractéristiques sédimentaires des alluvions et le faible taux d'alluvionnement (0,7 mm/an) plaident en faveur d'un milieu de sédimentation fluviale en mode calme. Vient ensuite une série nettement plus grossière (S2c) visible surtout sur les coupes stratigraphiques de Hakim et d'Ain El Gsir et datée entre 6600 à 6000 Cal B.P. attestant un régime rhéostasique de courte durée. L'ensemble de la série S2 est couronné par un épais paléosol d'âge néolithique (P2) formé dans une ambiance humide (à la fin de S2). L'activité pédogénétique aurait commencé avant 5500 ans Cal. B.P. et se serait arrêtée brutalement vers 4700 Cal. B.P. (S3a), suite au renforcement des conditions morphogénétiques intervenu au cours d'une récurrence aride (Faust *et al.*, 2004).

III.1.3. L'Holocène historique

À la superposition de nappes alluviales qui a prévalu jusqu'à l'Holocène moyen font suite d'épaisses constructions alluviales liées à des inondations catastrophiques (Zielhofer *et al.*, 2008). D'une façon générale, les dépôts et formes hérités de l'Holocène historique appartiennent à deux phases d'occupation inscrites dans un contexte morphosédimentaire distinct.

III.1.3.1. L'époque punico-romaine

Après une courte phase d'activité morphogénique (S3b) placée au début de l'Antiquité vers environ 3000 Cal. B.P. (fig. 27), les environnements tendent vers la stabilité entre 2800 et 1700 Cal. B.P. (S3c). Cela est dû à l'installation d'une ambiance climatique humide favorisant le développement d'un horizon pédologique désigné « sol pré-romain à romain » (P3). Ce paléosol est visible sur la berge de Ghardimaou où une datation sur des charbons de bois a livré un âge de 2785 Cal. B.P. (Zielhofer *et al.*, 2002). Toutefois, les chercheurs signalent que sa mise en évidence n'est pas toujours facile même en ayant recours à des analyses micromorphologiques réalisées à partir de lames minces (Zielhofer et Faust, 2003).

III.1.3.2. La période fini- et post-romaine

Selon Zielhofer *et al.* (2002, 2003, 2004), tout indique une reprise de la dynamique de remblaiement alluvial dès le déclin du Monde antique vers 1600 Cal. B.P. (fig. 27 et 28). En témoignent par exemple, la présence 1) d'un sédiment grossier contenant des objets archéologiques antiques et parfois associé à des figures de ravinement et à des chenaux intraformationnels et 2) d'alluvions (S4a) recouvrant quelquefois des vestiges de constructions anciennes, qui devaient normalement se trouver à l'abri des débordements fluviaux fréquents. De tels dépôts et figures sédimentaires impliquent,

toujours d'après ces auteurs, des crues violentes et puissantes dont l'activité se poursuit jusqu'à à peu près 1000 Cal. B.P. (Zielhofer *et al.*, 2002 et 2003 ; Faust *et al.*, 2005). Au Moyen Âge, suite à l'installation d'un régime biotasiq, la dynamique d'alluvionnement s'atténue au profit des phénomènes de creusement et de pédogenèse. Ceci entraîne la formation du sol médiéval (P4) daté d'environ 900 à 700 Cal. B.P. et rattaché à l'épisode de réchauffement climatique général (800 - 1300 apr. J.-C.). À cette phase pédologique succède une dynamique d'accumulation attestée par la présence d'une série alluviale fine (S4b) datée d'environ 700 à 500 ka Cal. B.P. et corrélée aux périodes du minimum de Wolf (1280-1350) et du minimum de Spörer (1450-1550). Le retour à des conditions humides vers 440 Cal. B.P. conduit de nouveau à la formation d'un horizon pédologique marquant la fin de S4. Pendant l'époque ottomane, précisément au milieu du XVI^e siècle, s'observe une fréquence accrue des événements pluviométriques majeurs (fig. 27) qui s'explique non seulement par la dégradation du climat pendant le minimum de Maunder (1600 - 1830) mais aussi et surtout par l'intervention de l'Homme (défrichement, aménagement). La fréquence de ces événements pluviométriques, qui atteint son maximum entre 400 et 300 B.P. est corrélée avec la diminution régulière des valeurs de déclinaison* (observée par Faust *et al.*, 2004 et Zielhofer *et al.*, 2008). Quant à la nature des remblaiements alluviaux, il s'agit souvent d'une superposition de nappes alluviales (S5) à matrice limono-argileuse à sableuse finement litée et de 1 à 1,50 m d'épaisseur (fig. 27 et 28).

* La valeur de la déclinaison fait partie des analyses paléomagnétiques. Les datations sont issues de la chronologie de variations des champs magnétiques de la terre (DEMF) au cours des 2000 dernières années.

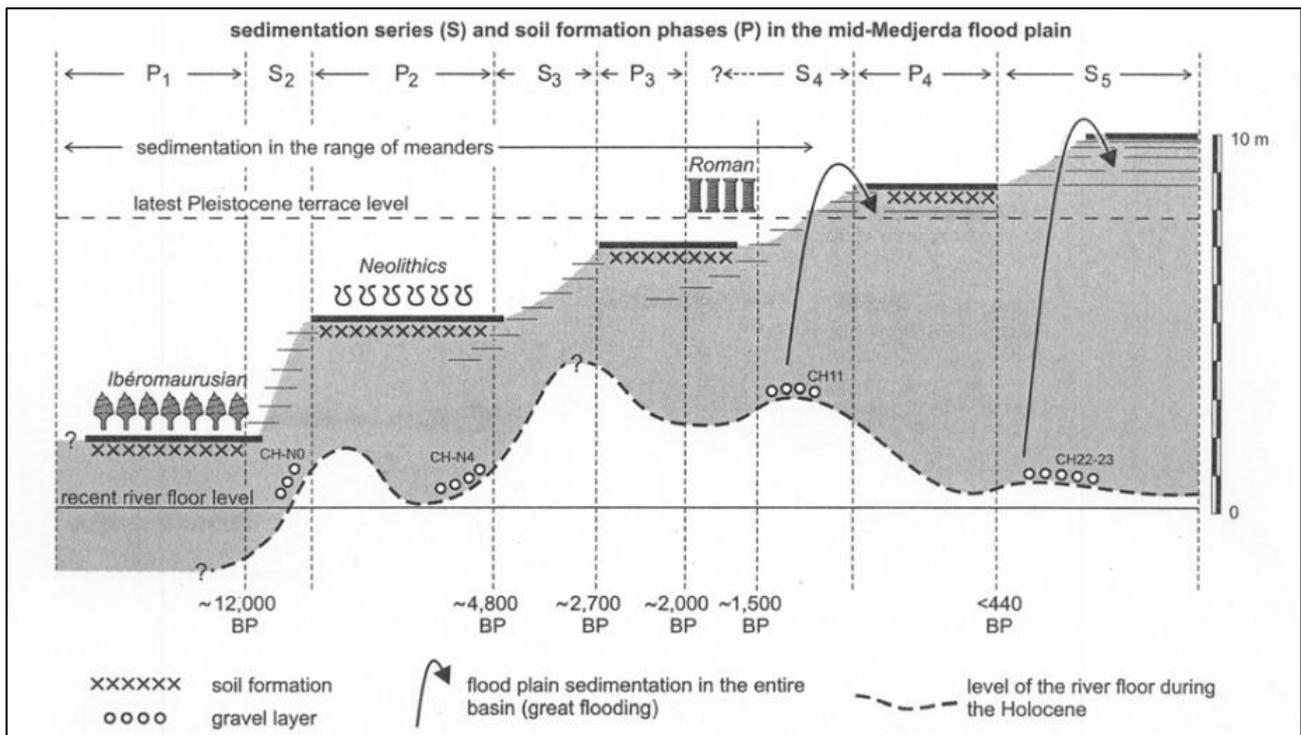


Fig. 28. Évolution de la position du chenal de la moyenne Medjerda au cours de l'Holocène (Zielhofer et Faust, 2003).

Conclusions

De l'analyse morphostratigraphique effectuée par nos prédécesseurs on retiendra que les grands traits de la dynamique des plaines alluviales sont le résultat d'une évolution récente, qui s'est déroulée au cours du Quaternaire supérieur et notamment au cours des temps récents. On retiendra aussi que la morphologie héritée est complexe témoignant de changements sensibles des caractéristiques de l'environnement et de l'action des agents de la morphogenèse. Ceci a caractérisé surtout la période qui a succédé au déclin du Monde antique, comme l'indiquent des épais remblaiements alluviaux observés dans le fond de certaines vallées et dont la genèse est attribuée à des événements hydrologiques forts, voire extrêmes. Par ailleurs, les réflexions des chercheurs se sont concentrées sur le seul examen des dépôts de berges concaves considérant que ceux-ci sont les seules à présenter les séries alluviales les plus complètes. Or, les travaux des géomorphologues vont montrer que les berges convexes offrent aussi des séries alluviales complètes permettant de définir l'agencement des formes d'accumulation d'âge historique afin de compléter le schéma d'évolution des vallées proposé par nos prédécesseurs.

III.2. Les études géomorphologiques

Si l'on suit la chronique des parutions d'études géomorphologiques, on cite d'abord la note de H. Bannour et J. Bonvallet (1988) consacrée aux dépôts quaternaires de la vallée de la Medjerda dans la zone des diapirs. Ce terrain, de quelque 28 km², se trouve à l'amont de la digue du barrage de Sidi-Selem et est aujourd'hui occupé par les eaux de la retenue. Les auteurs parlent brièvement de cinq générations de terrasses, distinguées sur la base de la nature lithologique des sédiments. À ces observations succède, en 1995, le travail de thèse de L. Naoui intitulé : « *Le lit fluvial et la vallée alluviale de la Mejerda (Tunisie) : étude de dynamique et de géomorphologie fluviales* ». En dépit du titre, cette recherche est consacrée en grande partie à l'analyse hydrologique des oueds. Dans le chapitre ayant trait à la morphodynamique actuelle (comparaison des documents cartographiques et photographiques datant entre 1920 et 1985), l'accent est mis sur la rapidité avec laquelle peuvent évoluer des tronçons de cours d'eau à l'occasion des fortes crues. Deux nouvelles thèses ont été soutenues mais elles concernent seulement les parties amont et moyenne des bassins-versants méridionaux de l'oued Siliana (Jendoubi, 2000) et de l'oued Tessa (Ben Ghazi, 2003). En fait, les travaux les plus importants, concernant la géomorphologie de la moyenne vallée de la Medjerda, ont été réalisés de 2003 à 2007. Le mérite en revient en premier lieu au Prof. A. Oueslati (2005) qui a fourni, entre autres, les premières informations relativement détaillées sur la géomorphologie du fond de certaines vallées appartenant à la région étudiée. Dans le secteur de Chemtou, il a pu identifier, en plus des constructions plus récentes, deux générations de terrasses datées par des objets archéologiques. Dans le secteur compris entre le cours inférieur de l'oued Siliana et la ville de Mjez El-Beb, l'auteur évoque deux niveaux de terrasses d'extension et d'épaisseur remarquables avec une série de banquettes (deux à quatre) accolées aux berges convexes. Il donne en outre quelques informations sur les tendances de la morphogenèse récente dont la connaissance, selon lui, est importante pour mieux apprécier les menaces qui guettent le patrimoine archéologique. Ce dernier aspect a été également étudié par nous-mêmes en 2005, dans le cadre d'un mémoire de Mastère (Lahmar, 2005) portant sur le risque d'inondation dans la plaine de Jendouba-Bou Selem. L'accent a été mis dans ce travail, grâce aux outils SIG surtout, sur l'instabilité des lits d'oued ainsi que sur la dynamique de l'alluvionnement en rapport avec les grosses crues. Deux autres recherches similaires ont ensuite proposé des éclairages sur le modelé des fonds de vallée ainsi que sur les manifestations de la dynamique actuelle. L'une a été effectuée par H. Romdhan (2005) sur le terrain compris entre la ville de Bou-Selem et la région

de Kouka un peu en amont. L'autre a été réalisée par Z. Mjejri (2007) sur le cours de l'oued Erraghai entre Bled Ettarf et Chemtou à Ghardimaou.

Conclusions

L'un des atouts des recherches évoquées ici est la prise en considération des versants qui bordent les plaines et le raisonnement en termes de bassin-versant, plaçant ainsi les plaines alluviales dans un espace plus vaste animé par des liens de cause à effet répondant au fonctionnement d'un système en cascades. De cette façon, les chercheurs ont eu la possibilité de mieux comprendre les interactions entre les différentes composantes du milieu physique, et de dégager les grands traits de son évolution sous contrôle hydro-climatique et/ou anthropique, mais la chronologie reste à préciser davantage.

III.3. Synthèse et essai d'intercorrélation des recherches produites en Tunisie sur la dynamique fluviale

Rappelons que le remblaiement fini-pléistocène supérieur a été observé sur d'autres terrains limitrophes de la Tunisie. Il serait à corréliser avec l'unité sédimentaire Qc4 comprenant une industrie épipaléolithique de A. Oueslati (1993), à la terrasse holocène à industrie ibéromaurusienne de M. Bourgou (1993), aux dépôts de la haute terrasse holocène datée de 9320 ± 770 B.P. par A. Ben Ghazi (2003) et à la terrasse holocène antéhistorique datée de 11.700 Cal. B.P. par K. Zerai (2006). À cela s'ajoute la phase de sédimentation décrite par Steinmann et Bartels (1982) dans le bassin de l'oued Siliana et datée entre 12.500 et 10.500 Cal. B.P. Le dépôt du « Mid-Holocene soil » de Zielhofer *et al.* (2002, 2003) peut correspondre au sol néolithique de Molle (1979) datée entre 6800 et 5500 Cal. B.P., à la couche humique de Scharpenseel et Zakosek (1979) ainsi que de Steinmann et Bartels (1982) calée entre 6000 et 5000 B.P. et enfin au paléosol néolithique de K. Zerai daté de 4200 Cal. B.P. (2006). Le sol antique précité serait à corréliser avec la seconde terrasse holocène de Steinmann et Bartels (1982) datée approximativement vers 2400 Cal. B.P., à l'ambiance humide de M. Bourgou et A. Oueslati (1987), à la pulsation humide de A. Hamza (1987) et à la récurrence humide de A. Oueslati (1993). Par analogie avec ce que l'on sait déjà, il paraît logique de faire de ce dépôt l'équivalent de l'horizon humique de H.W.

Scharpenseel et H. Zakosek (1979) daté de 600 Cal. B.P. D'autres chercheurs ont attiré l'attention sur l'existence d'une récurrence humide au Moyen Âge, responsable du dégagement de la terrasse historique secondaire QC1 (Oueslati, 1993) et de la terrasse historique secondaire de M. Bourgou (1993) et de A. Ben Ghazi (2003).

Conclusion du chapitre III

Au terme de cette synthèse sur les travaux antérieurs, il apparaît que le peuplement dans les plaines moyennes de la Medjerda est ancien et remonte au moins à la civilisation ibéromaurusienne. La région a connu des mutations indéniables au niveau de ses paysages et la dynamique de ces derniers a été importante au cours des temps. Aussi, quatre phases de sédimentation sur cinq et trois épisodes pédologiques sur quatre se sont déroulées au cours de l'Holocène et des temps historiques en particulier. À cela s'ajoute la présence, dans le fond des vallées, de plusieurs remblaiements alluviaux d'âge historique dont deux au moins sont en position de terrasses. La vigueur de la morphogenèse récente s'exprime en particulier dans l'instabilité des lits d'oued et dans l'importance de l'activité d'alluvionnement surtout à l'occasion des fortes crues.

Chapitre IV. Évolution géomorphologique des paysages fluviaux au cours des temps historiques

Le choix de la période historique comme cadre chronologique de cette étude géomorphologique est justifié par au moins deux raisons. Premièrement, étant donné que les fonds de vallée de la Medjerda sont inscrits dans un contexte tectonique subsident, les berges des oueds ne permettent de voir souvent que la partie supérieure des dépôts holocènes. En effet, la place est largement donnée à un territoire de nappes alluviales historiques étendues et pouvant se suivre sur plusieurs kilomètres, le long des principaux drains fluviaux et parfois même jusqu'en bordure des reliefs dominants. Deuxièmement, la richesse du terroir en vestiges d'occupation antique incite, surtout au vu de la rareté des datations absolues utilisées dans ce travail, à en tirer profit pour une meilleure compréhension de l'évolution hydro-morpho-sédimentaire et des rapports qu'entretenaient les sociétés anciennes avec leur environnement. Ce dernier aspect d'ordre géoarchéologique sera traité dans le chapitre 5 (cf. *infra*). Par ailleurs, les héritages morphologiques et stratigraphiques de la moyenne Medjerda ont déjà fait l'objet de quelques recherches dont les principaux résultats sont rappelés dans le chapitre 3 (cf. *supra* ; Zielhofer *et al.*, 2002 et 2003 ; Faust *et al.*, 2004 et 2005 ; Lahmar, 2005 ; Oueslati, 2005 ; Romdhan, 2005 ; Mjejri, 2007). Or, l'analyse systématique du terrain et l'examen des coupes offertes à la faveur de l'incision et/ou le sapement latéral de certains affluents tributaires qui reste inédit, semblent pouvoir apporter des éléments utiles à la connaissance d'ensemble des héritages hydrogéomorphologiques et environnementaux. Les coupes naturelles qu'exposent les berges des oueds sont en réalité peu nombreuses, car la majorité des parois sont masquées par la ripisylve. C'est pourquoi certaines descriptions géomorphologiques sont présentées dans le texte sans coupes de référence. Cependant, celles à valeur litho-chrono-stratigraphique ont été retenues pour un examen direct et des analyses sédimentaires en laboratoire. Les observations *in situ* s'attachent à caractériser la nature des dépôts sédimentaires à partir de nombreux critères parmi lesquels on retiendra : les figures sédimentaires, la fabrique, le faciès, le granoclassement, la structure et la couleur (code Munsell). En ce sens, des levés de coupes de front ou en travers des sections ont été établis en s'aidant de divers outils et accessoires (marteau, GPS, boîtes métalliques, carnet de notes, décimètre, ardoise). Quant au traitement des sédiments au laboratoire, il s'est agi essentiellement d'analyses sédimentologiques

(granulométrie, géochimie, minéralogie) et d'une datation radiocarbone AMS. Les diverses données récoltées (formes d'érosion, ruines découvertes, lieux de déchets) dans le fond de vallée ont donné lieu, via l'outil info-cartographique, à des croquis et cartes géomorphologiques. Ce chapitre présente une série de figures géomorphologiques accompagnées de descriptions et d'illustrations relatives à une sélection de secteurs couvrant, de l'amont vers l'aval, l'ensemble de la moyenne vallée alluviale de la Medjerda.

IV.1. Tronçon I (vallée supérieure)

IV.1.1. Caractéristiques (secteur compris entre Bled Zitoun et Edkhailiya)

Il correspond à une morphologie de plateaux situés à 250 m d'altitude moyenne et dominant par un talus de 20 m de commandement la plaine de l'oued Erraghai, affluent septentrional de direction subparallèle au cours de la Medjerda. Ce sont de vastes surfaces (10 km de long sur 3,5 km de large) légèrement inclinées vers le niveau de base et entaillées, de l'ouest vers l'est, par cinq drains fluviaux (*i.e.*, les oueds Essoufi, El-Hammem, El-Henja et La'achar). Ces derniers entaillent, par des gorges, des piémonts dominés par des reliefs et des impluviums volumineux. Ils sont à l'origine d'un modelé marqué par la présence de cônes torrentiels de 2 km environ de génératrice et dont l'allure est nettement reconnaissable sur la carte topographique par le dessin convexe vers l'aval des isohypses (fig. 29 et 31). Sur le terrain, les entailles qui incisent de telles accumulations aboutissent souvent à créer de petites coupes (de 1 à 4 m de commandement) en raison de la faible inclinaison des talwegs. Le matériel de remblaiement change sensiblement selon la position dans la toposéquence. Dans les cônes accolés au pied des versants, on a généralement affaire à des accumulations colluvio-alluviales et de déjection (*e.g.*, cône proximal de l'oued El-Hammem à 500 m en aval des thermes romains ; fig. 29, photo 1.). Dans les moyennes sections de piémont, les cônes alluviaux dégagés en terrasse sont courants dans le paysage avec une prédominance du faciès grossier (fig. 29, photos 2 et 3). En bas de pente, la partie distale des cônes alluviaux présentent souvent des alluvions de texture plus fine, indicatrice d'une évolution des conditions de dépôt vers un mode « calme » (fig. 29, photo 4).

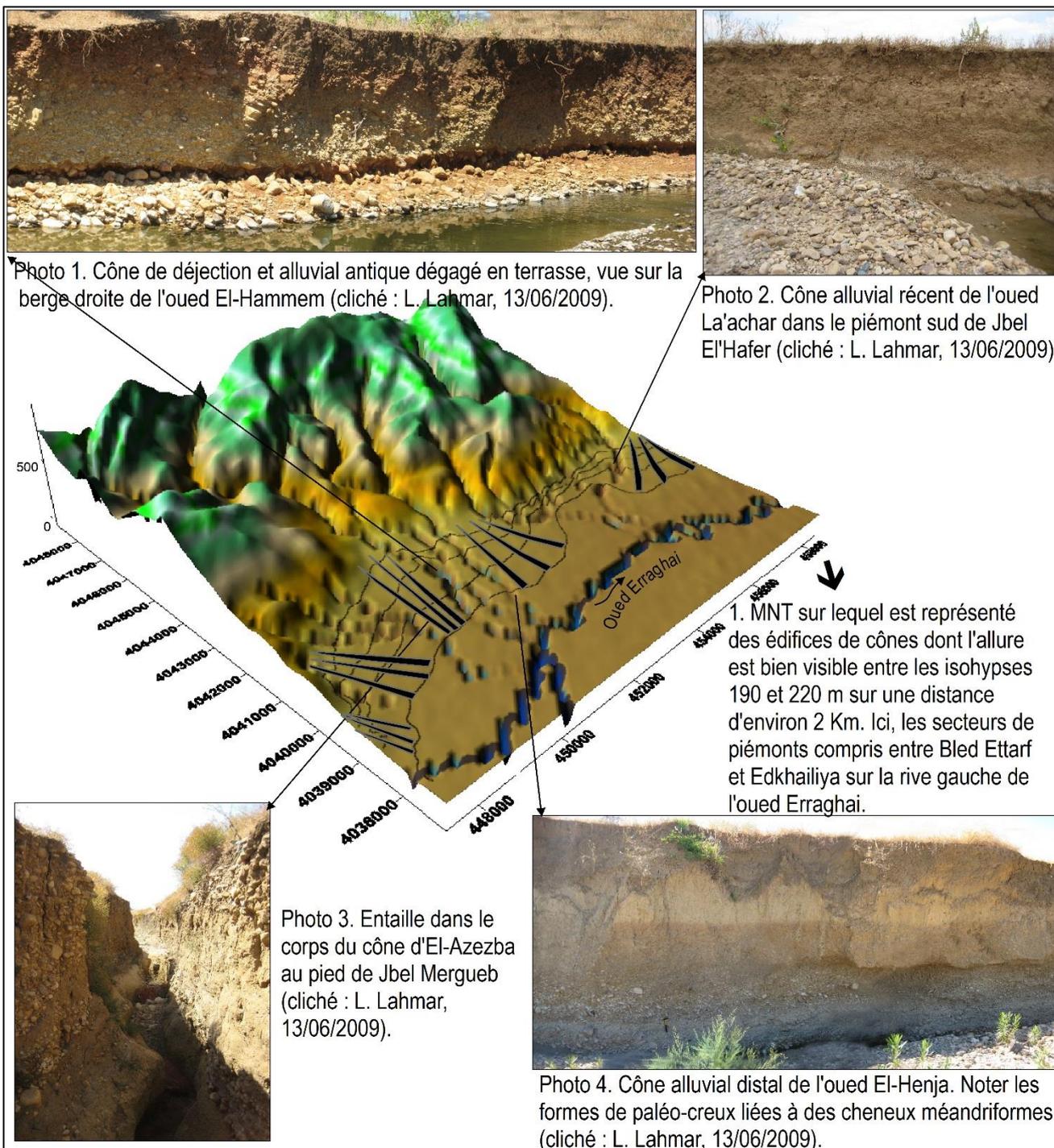


Fig. 29. Modelé caractéristique des cônes alluviaux occupant la bordure septentrionale de l'oued Erraghai.

IV.1.2. Coupe stratigraphique dans le cours moyen de l'oued Essoufi au pied de Jbel Grouine

La coupe se trouve dans le haut piémont de Bled Ettarf à Ghardimaou, situé à 200 m d'altitude et parcouru par le cours de l'oued Essoufi, affluent de l'oued Erraghai (fig. 30). Elle apparaît la plus complète le long du tronçon prospecté entre la gorge et la confluence (photo 5). L'entaille est façonnée dans la berge inscrite dans le méandre concave, large d'environ 50 m. Le matériel sédimentaire qu'elle expose est fait de trois unités colluvio-alluviales (fig. 30). La première à la base (et notée n°2 sur la coupe), est de faciès grossier à blocs et galets sub-anguleux à sub-émoussés et riche en matrice sablo-argileuse jaune-gris lithochrome suivant la lithologie des versants dominants, d'âge pléistocène à holocène. La disposition en vrac des dépôts renseigne plutôt sur des écoulements brutaux et à compétence élevée. Au-dessus, la deuxième unité (notée n°3 sur la coupe) est composée de grains à dominante sableuse avec des passages grossiers (graviers) et renfermant un horizon continu de charbons de bois (photo 6). Une datation radiocarbone AMS réalisée sur ces charbons de bois a livré un âge de 3920 ± 30 ans B.P. place ce dépôt dans la période préromaine. Cela rappelle le dépôt vu dans le secteur de Chemtou, situé à 15 km d'ici vers l'est (Zielhofer *et al.*, 2004). Enfin, la troisième unité (notée n°4 sur la coupe) est à dominante essentiellement fine argilo-sablo-limoneuse, de structure cubique polyédrique et d'âge historique. Ces trois unités forment une série alluviale (*sensu* Macaire, 1990) dégagée en terrasse dont la surface étendue est plantée d'oliviers. On retiendra aussi de ce terrain l'inégal développement des hauteurs de berge de même que les grandes variations latérales de faciès sédimentaires sur de courtes distances, traduisant l'instabilité verticale et latérale du système fluvial ainsi que la forte variabilité spatio-temporelle des conditions hydro-climatiques. En effet, on peut passer d'un dénivelé de 5-6 m comme c'est le cas du front de la berge examinée à quelques décimètres seulement à proximité. Cela veut dire que l'entaille abrupte de la coupe en question correspond à l'ancien chenal de l'oued et que la variation de l'épaisseur de dépôt est liée à la mobilité des chenaux fluviaux. D'une manière générale, la vallée d'Essoufi s'enfonce actuellement dans une seule terrasse en contrebas de laquelle est associé un modelé de petites banquettes ou de bourrelets alluviaux de crues récentes souvent remobilisés à chaque nouvelle crue.

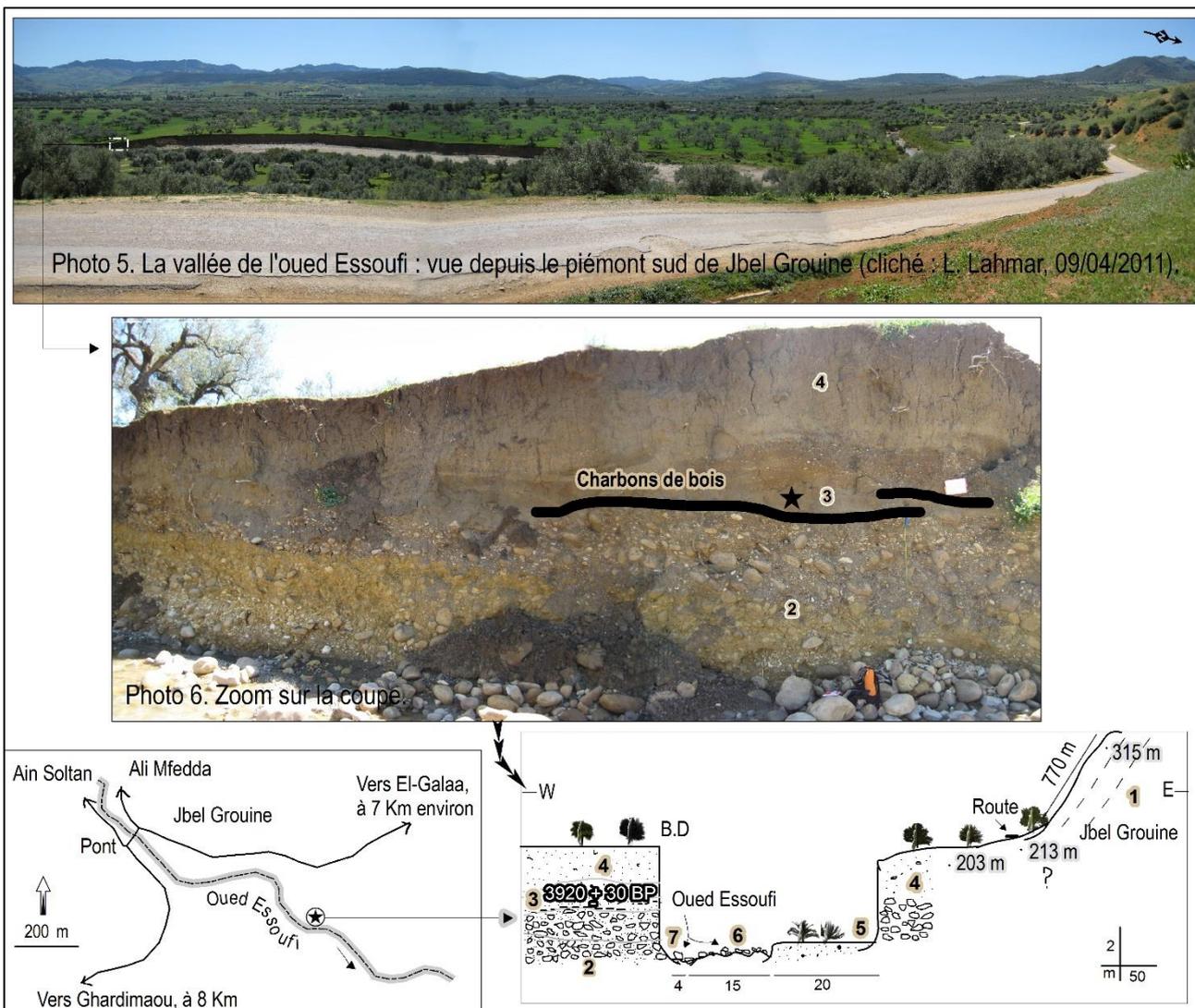


Fig. 30. Coupe stratigraphique le long de l'oued Essoufi, 700 m en aval du pont-route reliant Ghardimaou à El-Galaa.

1. Versant méridional de Jbel Grouine ; 2. Unité colluvio-alluviale à blocs et galets avec un important émoussé pris dans une matrice sablo-limoneuse compacte de couleur variant du beige au brun, d'âge anté-historique ; 3. Unité alluviale essentiellement sableuse (76 %) de teinte gris foncé à brun (10YR 4/2) et de teneur faible en éléments organiques et en calcaire total mais assez riche en fer (92 ppm). Elle est parcourue par des passées constituées de débris de charbons de bois ; une datation radiocarbone a donné un âge de 3920 ± 30 ans B.P., soit l'époque préromaine ; 4. Unité argilo-sablo-limoneuse épaisse à passages grossiers, de structure cubique polyédrique et de teinte variant du gris au brun (2,5YR 5/2) et contenant des débris d'Hélix avec des proportions faibles de matière organique et de CO_3 , d'âge historique ; 5. Dépôt alluvial fin, de rive convexe végétalisée, masquant en partie le front de la terrasse historique supérieure, banquette 6. Charge grossière à galets formant un modelé de gradins striés de chenaux de crues ; 7. Talweg actuel passant au pied de la berge dont le fond est tapissé de gros blocs et galets.

IV.1.3. Croquis géomorphologique dans le secteur d'Erraghai-Wirghech

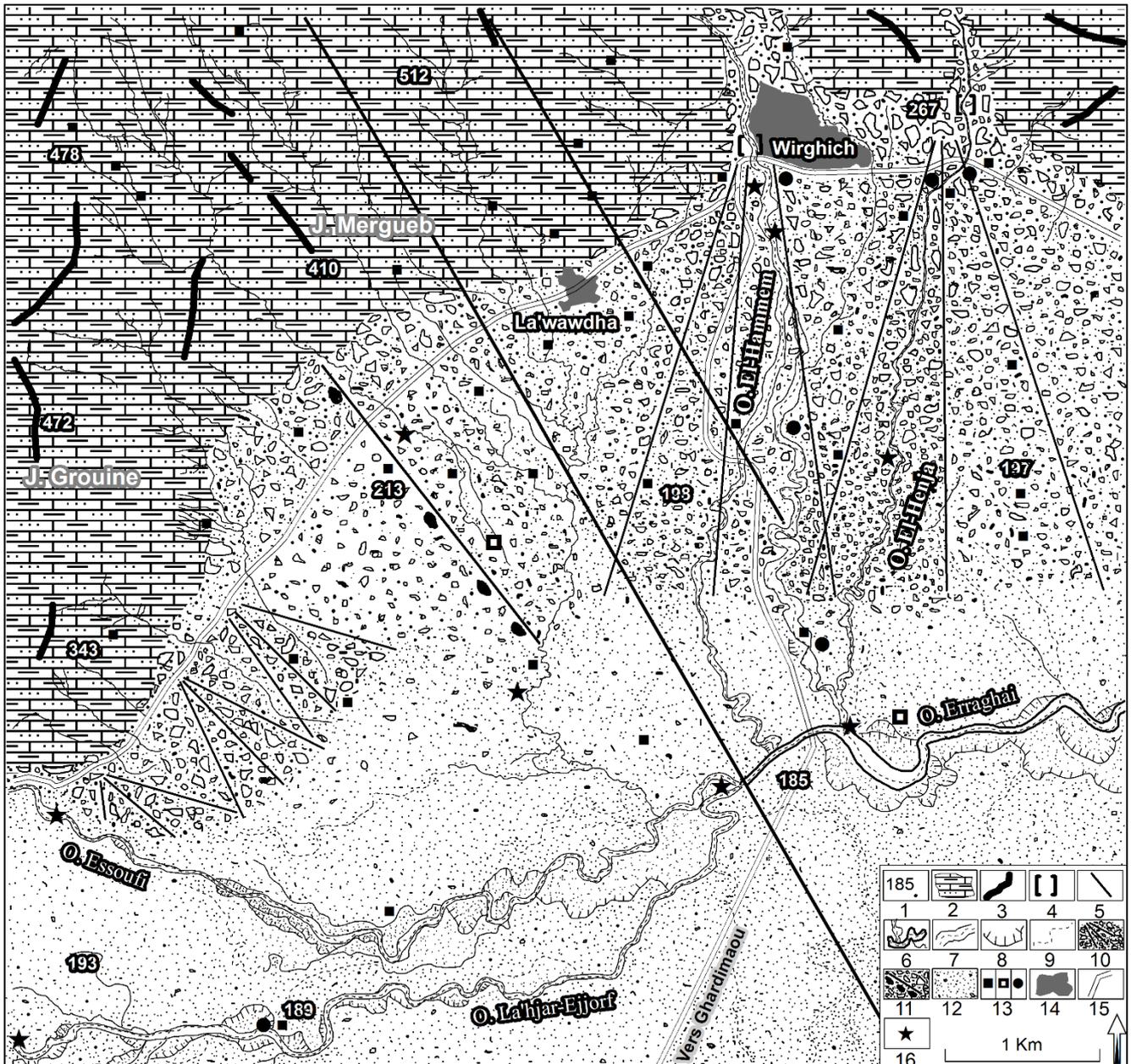


Fig. 31. Croquis morphologique dans le secteur d'Erraghai-Wirghech.

1. Point coté ; 2. Relief accidenté montagneux constitué de formations oligomiocène (argiles, sables, conglomérats et flysch) ; 3. Crête topographique ; 4. Gorge épigénique ; 5. Faille ; 6. Tracé actuel du chevelu hydrographique (calqué sur les photos satellites des archives de Google Earth datant de 2011-2013) ; 7. Chenal des principaux collecteurs et rebord du lit de l'oued ; 8. Talus d'érosion hérité et/ou bras mort ; 9. Paléochenaux et rigoles en partie ou totalement masqués par des travaux agricoles ; 10. Cône de déjection et/ou cône-terrasse, historique ; 11. Coalescence de cônes de déjections, historique, partie visible dans les entailles d'oueds ; 12. Alluvions et colluvions du Quaternaire supérieur avec prédominance des accumulations holocènes et historiques ; 13. Sites de ruines antiques indiqués sur la carte topographique au 1/50000 (carreau plein noir) ou découverts lors de nos travaux de terrain en 2009 (carreau en blanc) et dont certains vestiges sont encore taillés dans les berges des oueds et/ou observés au fond des lits (cercle noir) ; 14. Route ; 15. Déchets ménagers ; 13 et 15, localisation par GPS.

IV.1.4. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued El-Melah au lieu-dit Gueltet El 'Allouch

La coupe est localisée dans la berge gauche du cours moyen de l'oued El-Melah à 1 km de sa confluence avec le fleuve de la Medjerda, au droit du site archéologique de Chemtou. Le toponyme Gueltet (mare) El' Allouch (agneau) signifie point d'eau naturel où les animaux vont boire. Il doit normalement correspondre à une aire de décantation des eaux et des sédiments, d'où l'importance des archives sédimentaires. La coupe a déjà fait l'objet d'un travail d'analyses sédimentologiques et de datation (Zielhofer *et al.*, 2004). On la réexamine ici du point de vue géomorphologique car c'est là que se voit le mieux le dispositif des terrasses alluviales (fig. 32). Visible sur 6 m, la berge expose une série d'unités alluviales dont seule l'unité supérieure (notée n°3 sur la coupe) est d'âge historique (photo 7). Celle-ci est reconnaissable à son dépôt lité à grains majoritairement fins, de couleur beige-gris et de structure cubique polyédrique. Il apparaît que cette accumulation de terrasse historique supérieure est la plus tranchée dans le paysage si bien qu'elle se déploie sur de grandes distances aussi bien dans le sens de la longueur que dans le sens de la largeur. Cependant, la deuxième série alluviale (ou terrasse historique inférieure), emboîtée dans la précédente, est peu étendue et ne dépasse pas 45 m de largeur (photo 8). Elle est composée de deux unités sédimentaires (notée n°5 sur la coupe), l'une basale de texture grossière et l'autre plus fine au sommet. Sa dénivelée est de l'ordre de 3 m mais cette valeur décroît du côté sud jusqu'à quelques décimètres.

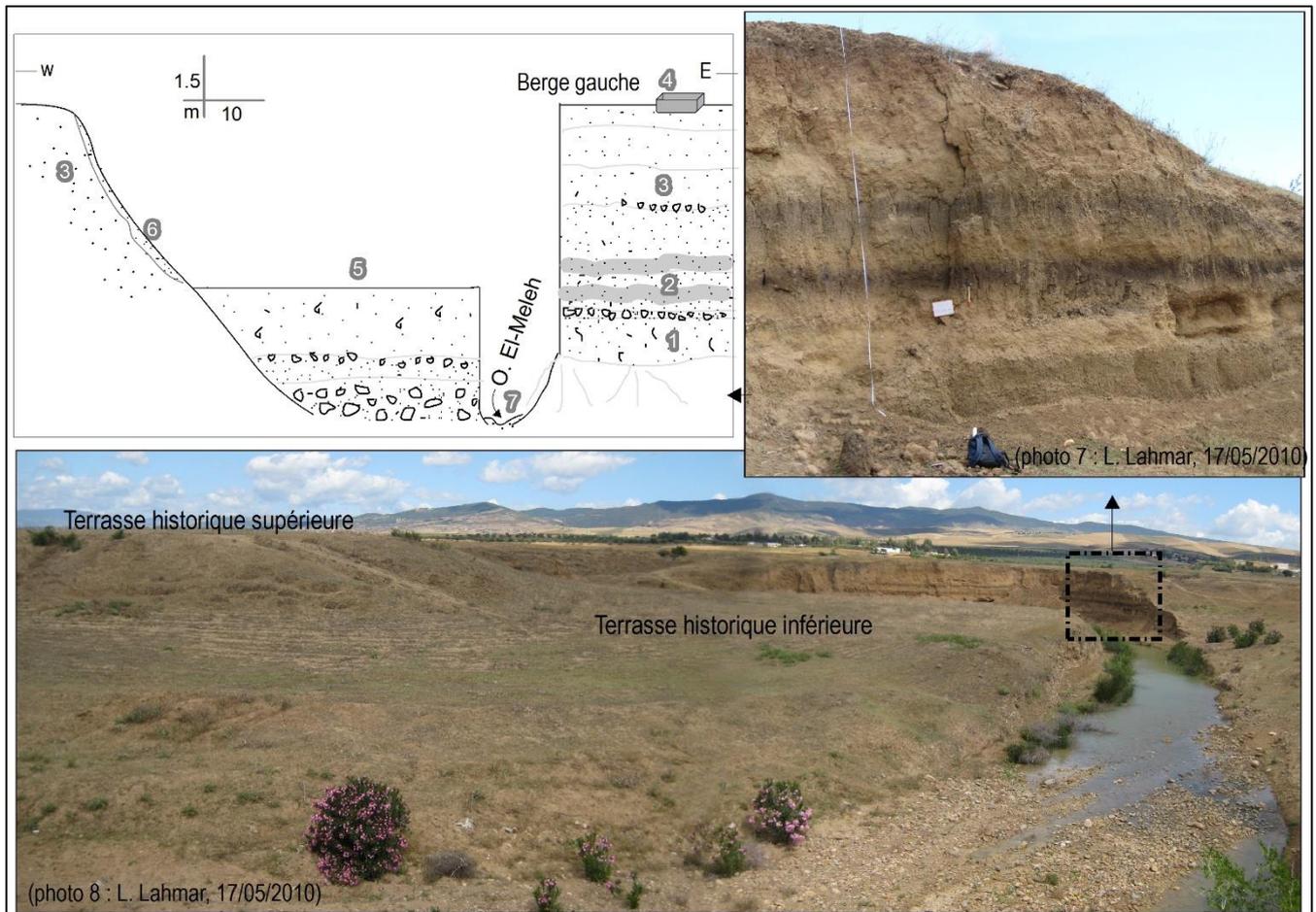


Fig. 32. Coupe à travers l'axe du méandre de l'oued El-Melah au lieu-dit Gueltet El' Allouch, à 350 m en amont du pont-route reliant Jendouba-Wirghech.

1. Unité à dominance sableuse (70 %) de couleur gris-brun et de structure prismatique contenant des valves d'eau douce, Pléistocène supérieur à Holocène inférieur ; 2. Unité à dominante sableuse (73 %) compactée de texture fine parcourue par deux paléosols continus, celui d'en haut est riche en fer (107 ppm), âge holocène ; 3. Unité argilo-limoneuse de teinte beige, rose, gris coiffée par un sol noir épais et contenant un lit grossier de type intraformationnel, terrasse historique supérieure ; 4. Vestiges de ruines anciennes non signalées sur la carte topographique ; 5. Matériel grossier à la base composé de galets et de rares blocs noyés dans une matrice sablo-argileuse, et montrant un faciès fin dès le centre de la coupe, terrasse historique inférieure ; 6. Tablier colluvial et arrachements ; 7. Matériel grossier du fond de l'oued en transit.

IV.1.5. Coupe stratigraphique au niveau du site archéologique de Chemtou

La coupe a été levée à travers la boucle du vaste méandre de l'oued Medjerda à Chemtou, à proximité du pont antique romain (fig. 33). Son intérêt réside dans le fait qu'elle permet de voir l'organisation des dépôts alluviaux. La série alluviale la plus épaisse (notée n°1 sur la coupe) correspond à la terrasse historique supérieure, à la

surface de laquelle est établi le petit village d'El-Abeidiya. En position d'emboîtement, se développe la deuxième série (notée n°2 sur la coupe) relative à la terrasse historique inférieure, exploitée aujourd'hui en champs d'oliviers. Son talus révèle des vestiges probablement de parement d'une voie antique qui était, selon des habitants âgés du village, reconstruite en 1943 par les Alliés pendant la Deuxième Guerre mondiale (fig. 33, photos 9 et 10). Encore plus bas dans la coupe, s'observe un modèle de deux banquettes dont la première végétalisée est bien inscrite dans le corps du méandre.

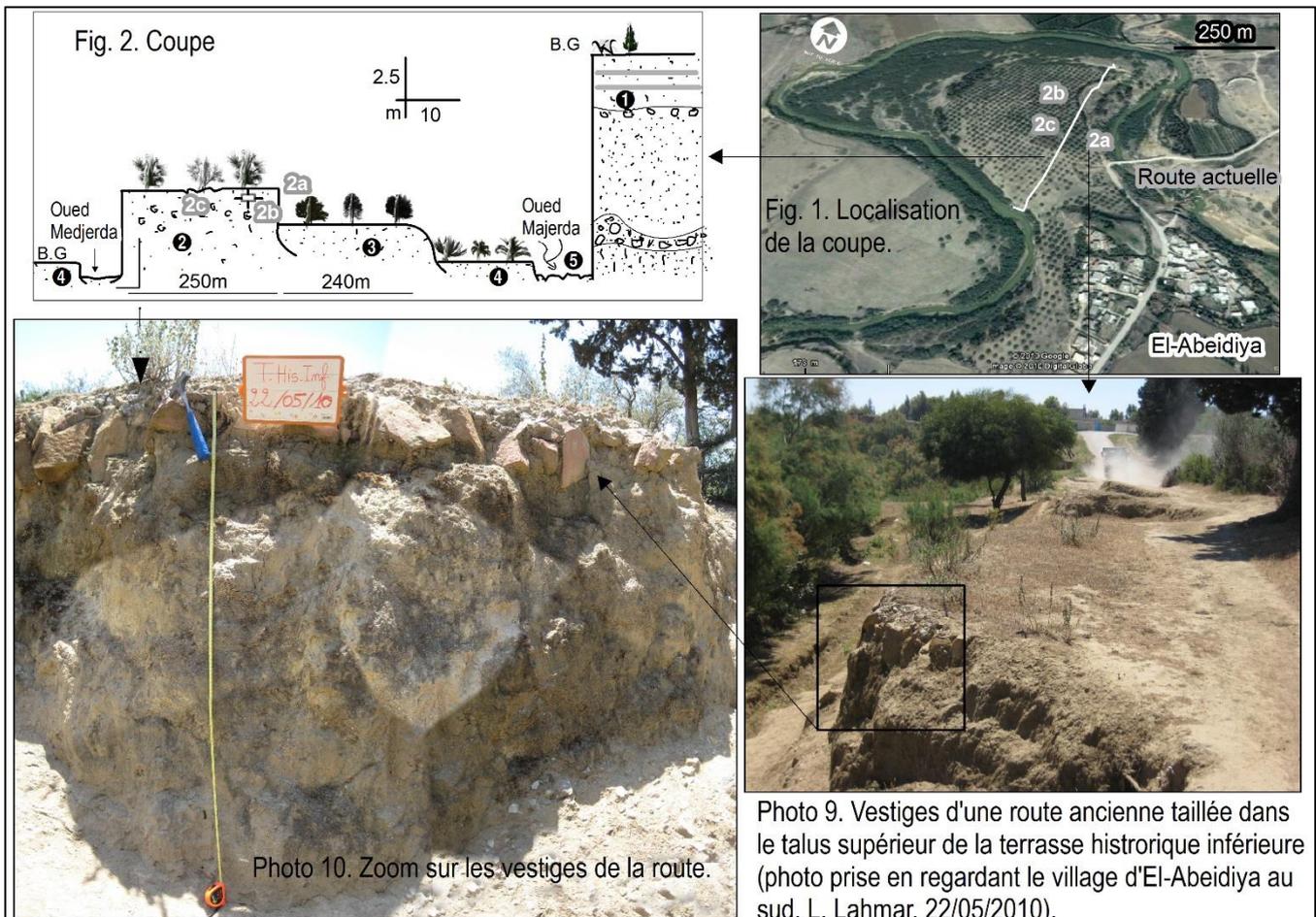


Fig. 33. Coupe stratigraphique dans la boucle du méandre de l'oued Medjerda entre le théâtre romain et le village d'El-Abeidiya.

1. Terrasse historique supérieure; 2. Série sablo-argileuse de couleur beige à gris très riche en débris de gastéropodes et dont le front du talus montre le système racinaire des pieds d'oliviers suite à leur déchaussement par ravinement, terrasse historique inférieure; 2.a. Vestiges d'une route antique réemployée par les Alliés en 1943 ; 2b. Structure en maçonnerie rectangulaire (L : 1,5 m, l : 1 m ; H : 0,40 m) ; 2c. Système de ravinement actif à l'origine d'un paysage de *badlands* localisé permettant de voir le matériel de la série sous-jacente ; 3. Série sablo-argileuse de couleur beige riche en matière organique formant la première banquette, sa surface est colonisée par des *Eucalyptus sp/globulus* et des *Tamarix africana*; 4. Cordon de sable fin riche en débris de coquilles formant la deuxième banquette ; 5. Chenaux fluviaux séparés par des bancs alluviaux végétalisés.

IV.1.6. Coupe stratigraphique au niveau de la confluence des oueds El Melah-El Khouitra

Cette coupe se trouve à environ 200 m vers l'est de la précédente (fig. 34, photos 11 et 12). Elle a déjà été remarquée dans deux travaux antérieurs (Zielhofer *et al.*, 2002 ; Oueslati, 2005). On la reprend ici avec plus de détails car, au-delà de son intérêt pour la cartographie et la connaissance du modelé fluvial, elle recèle de nouveaux éléments de datation relative associés à la terrasse historique inférieure (photo 13). Les dépôts de cette série (notée n°4 sur la coupe) révèlent en effet des objets archéologiques remaniés provenant du site local ou entraînés par les eaux d'écoulement depuis des sites situés plus en amont. La fourchette chronologique s'étend du I^{er} siècle jusqu'au V^e siècle de notre ère (fig. 34). De plus, le front supérieur de ce dépôt expose des vestiges de parement de chaussée ancienne similaires à ceux vus dans la coupe de Chemtou.

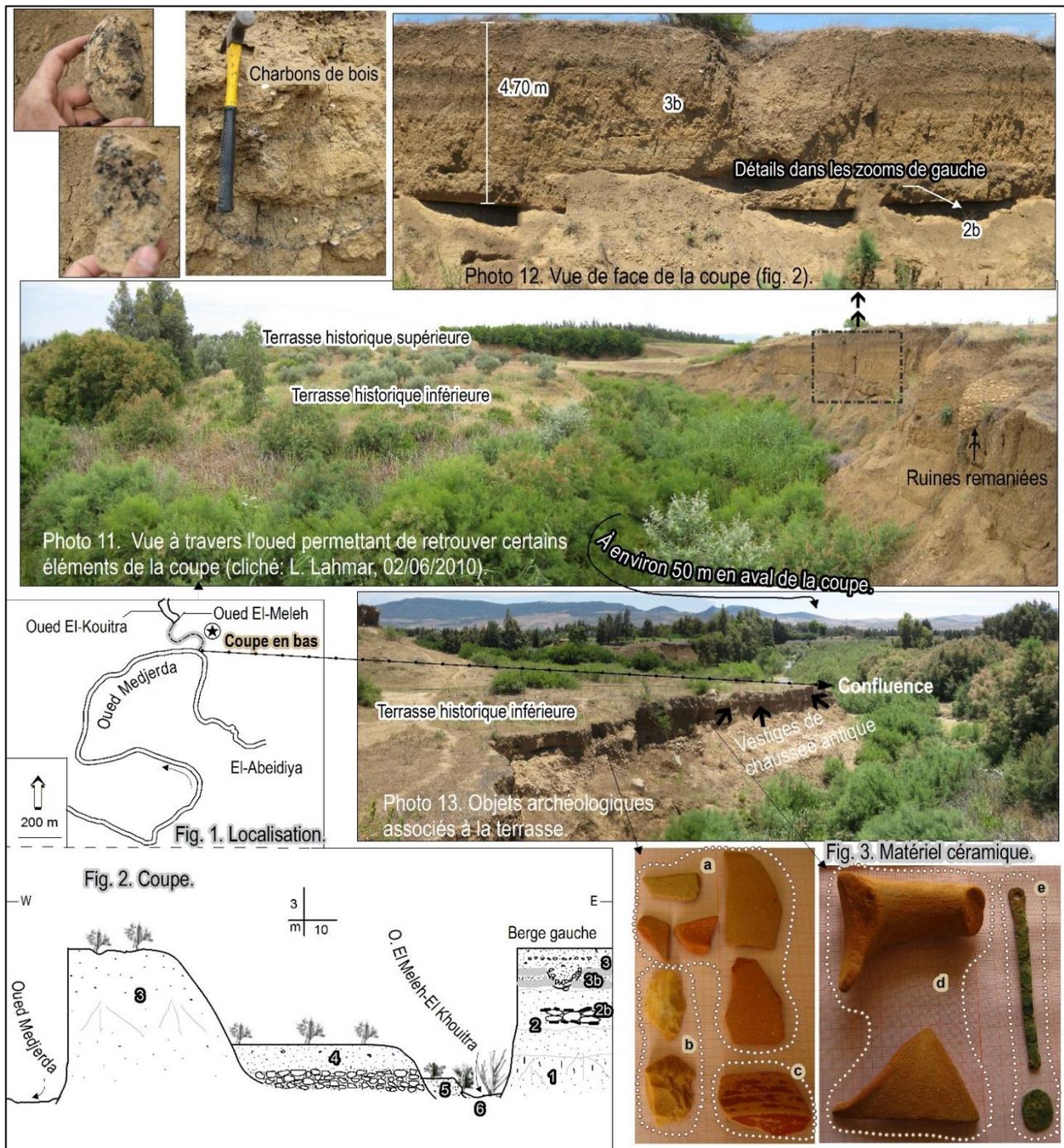


Fig. 34. Coupe stratigraphique à travers le méandre des oueds El-Meleh et El-Khouitra, 60 m en amont de leur confluence avec le drain de la Medjerda.

1. Série alluviale pléistocène masquée par du matériel éboulé ; 2. Série épaisse limono-argileuse compactée de teinte beige à brun d'âge holocène ; 2b. Foyer de charbons de bois, de pierres brûlées et de tessons informes de facture ancienne, vraisemblablement d'âge néolithique ; 3. Série alluviale historique soulignée par un ravinement intraformationnel grossier (3a) contenant de la céramique datée de 1900 cal. B.P. par Faust *et al.* (2002) ; 3b. Au moins deux horizons gris d'hydromorphie associés à des lits grossiers de tracé sinueux indiquant l'emplacement de paléochenaux ; 4. Série alluviale de la terrasse historique inférieure, grossière à la base et fine au sommet. Elle est plantée de jeunes oliviers et sa surface est mise en culture, la berge en face recèle des objets archéologiques remaniés dont cinq fragments en céramique commune (a), des éclats de marbre de faciès de Chemtou (b), un fragment de vase en céramique arétine lisse datant du I^{er} siècle (c), un fragment d'anse et un fragment informe d'amphore datant probablement du IV^e – V^e siècle (d), un fil de fer et une pièce de monnaie datant de l'époque vandale (e) ; 5. Gradin d'accumulation de lobe convexe occupé par une végétation de *Dittrichia graveolens* (*Inula Viscosa*) et de *Populus alba* peu exigeante en eau ; 6. Talweg actuel envahi par *Tamarix africana*, *Phragmites communis* (roselière) et *Fraxinus sp.*, espèces fortement consommatrices en eau.

IV.1.7. Coupe stratigraphique à travers le méandre de l'oued Meliz à environ 800 m au sud du village d'El Mdefa'a

Le cours de l'oued Meliz traverse une plaine large de 5 km environ avant de se jeter dans la Medjerda, sur la rive méridionale de sa vallée. Les prospections pédestres menées tout au long de cet affluent révèlent que les coupes offertes par les berges de l'oued sont nombreuses mais manquent souvent d'éléments de datation. Même les objets antiques trouvés lors de nos missions de terrain sont usés et restent peu informatifs (fig. 36). L'absence (ou presque) d'éléments datables, en relation avec la rareté des vestiges archéologiques, s'explique entre autres par la très faible occupation humaine pendant l'Antiquité. De façon générale, le paysage géomorphologique dans ce secteur est dominé par une terrasse historique supérieure (notée n°3 sur la coupe) dans laquelle s'emboîte la terrasse historique inférieure (notée n°4 sur la coupe) logée dans les boucles des vastes méandres (fig. 35, photos 14, 15, 16 et fig. 37).

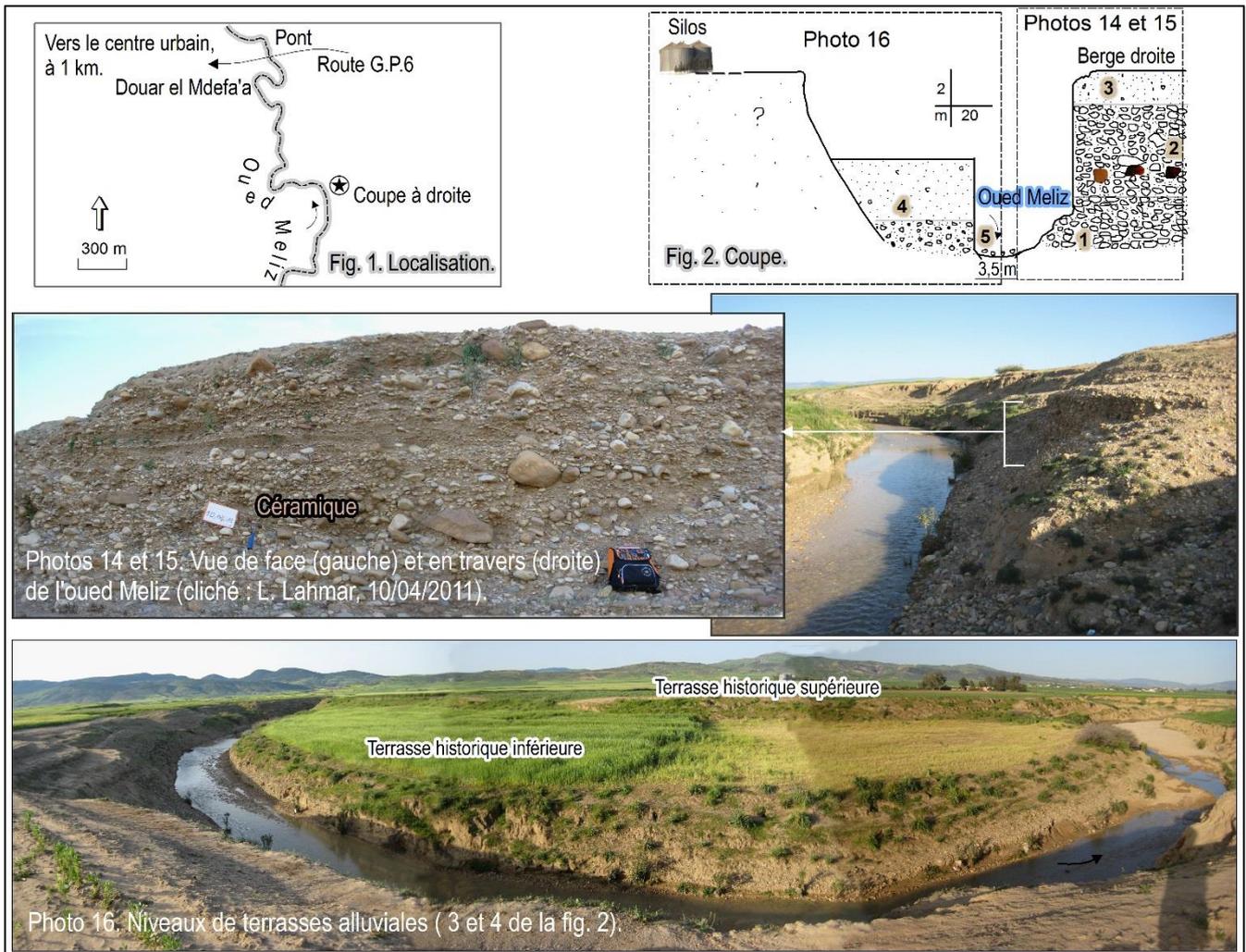
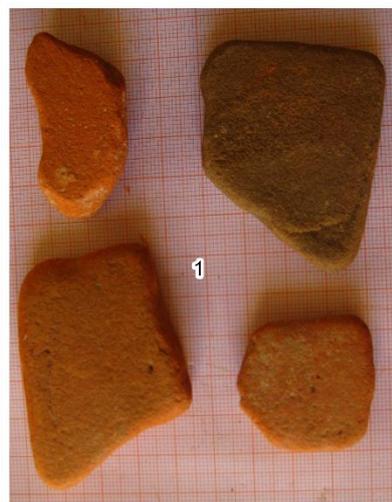
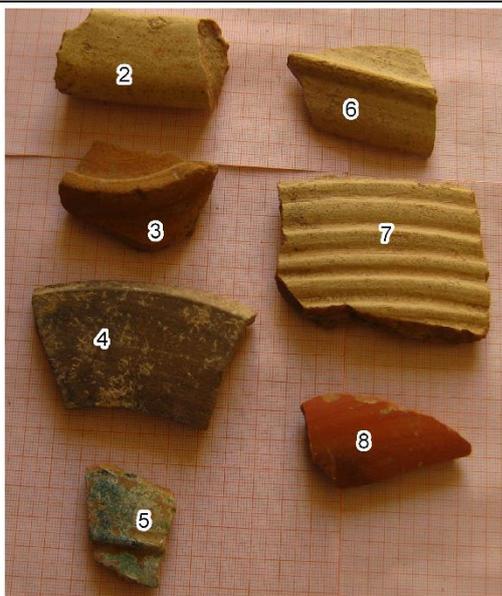


Fig. 35. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued Meliz, à environ 800 m au sud du village d'El Mdefa'a.

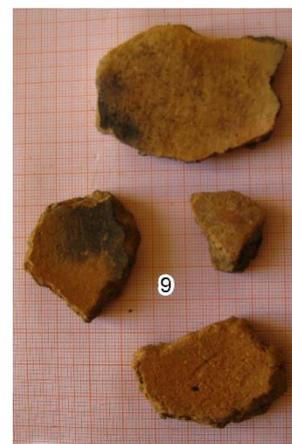
1. Dépôt grossier en vrac à galets et blocs noyés dans une matrice sablo-argileuse avec des formes d'induration, d'âge antéhistorique ;
2. Matériel grossier hétérométrique à galets, cailloux et blocs pris dans une substance sableuse, d'âge historique compte tenu des fragments de poterie qu'il remanie ;
3. Série argilo-limono-sableuse de texture fine coiffant le sommet de la terrasse historique supérieure ;
4. Série alluviale de rive convexe à dominance fine, terrasse historique inférieure ;
5. Matériel grossier actuel du fond de l'oued.



1. Quatre fragments informes, datation incertaine : probablement Ve siècle.



2. Un fragment d'anse ; 3. Un fragment de fond en céramique culinaire ; 4. Un fragment de bord d'un vase à listel ; 5. Un fragment informe en céramique Médiévale glaçurée ; 6. Un fragment de fond ; 7. Un fragment informe en sigillée africaine tardive ; 8. Un fragment informe en céramique commune. Datation VI – Ve siècle, et probablement ziride pour le fragment glaçuré.



9. Quatre fragments informes de céramique modelée, datation incertaine.

Les fragments de céramique récoltés ont été identifiés et datés par M. Moncef Ben Moussa, Professeur d'Archéologie à la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis.

Fig. 36. Matériel céramique recueilli dans l'oued Meliz.

IV.1.8. Croquis géomorphologique du secteur de Chemtou-Edkhailiya

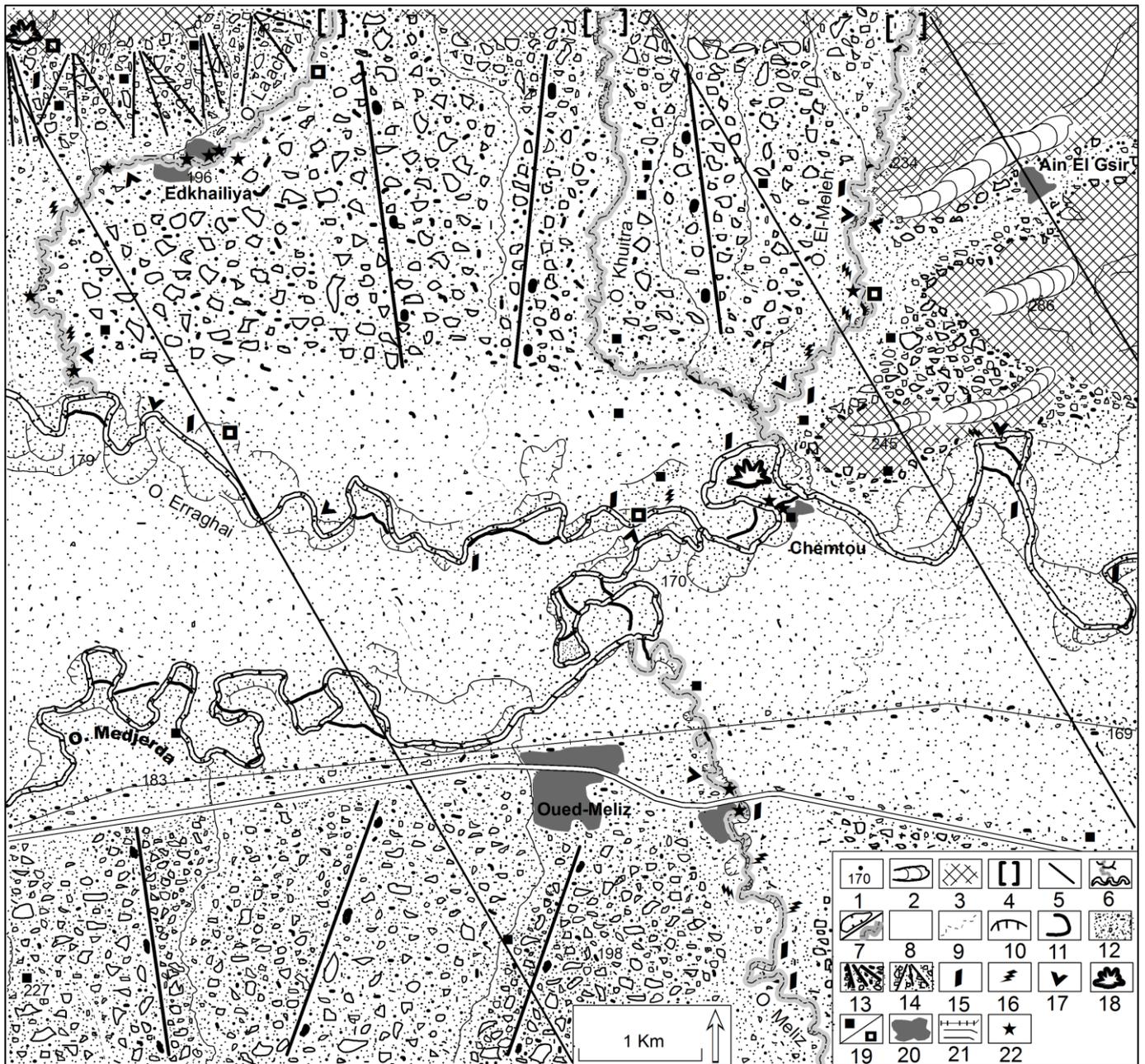


Fig. 37. Croquis morphologique du secteur de Chemtou-Edkhailiya.

1. Point d'altitude ; 2. Crête topographique à sommet convexe ; 3. Relief en roche dure formant système de pentes raides ; 4. Gorge épigénique ; 5. Faille (carte géologique) ; 6. Cours actuel du réseau fluvial de l'oued Medjerda (tracés sur photos de Google Earth 2011-2013) 7. Lit mineur d'oued et rebord de terrasse visible surtout dans la section concave des berges des grands collecteurs, au total superposition de trois générations de dépôts : pléistocène, holocène et historique avec prédominance des dépôts fini-pléistocènes ; 8. Matériel du fond d'oued formant parfois modelé de banquettes et gradins d'accumulation ou d'érosion ; 9. Paléochenaux et rigoles masqués par des travaux agricoles ; 10. Bras mort et talus d'érosion taillé dans les nappes alluviales historiques résultant de la divagation des lits d'oueds ; 11. Traces de chenaux de recoupement de méandre ; 12. Alluvions et colluvions de la plaine d'accumulation ; 13. Coalescence de cônes de déjection ; 14. Cône de déjection de pied de versant ; 15. Berge abrupte ; 16. Berge burinée (niche d'arrachement, fissures verticales, sommet trapézoïdique) ; 17. Sapement ; 18. Ravinement généralisé/ *bad-lands* ; 19. Sites de ruines antiques indiqués sur la carte topographique au 1/50000 (fond noir) ou découverts lors de nos travaux de terrain en 2009 (fond blanc) ; 20. Espace bâti ; 21. Route et chemin de fer ; 22. Déchets domestiques ; 15, 16, 17, 18, 19 et 22, localisation par GPS.

IV.2. Tronçon II (vallée médiane)

IV.2.1. Dispositifs alluviaux dans la région nord de Bou-Selem

Malgré les multiples observations effectuées dans ce secteur, le résultat est resté en deçà de nos attentes. En effet, la plaine n'est drainée que par deux oueds : Bou-Hertma et Kesseb. Ces derniers sont pauvres en coupes stratigraphiques et ne présentent que peu de traces d'occupation antique. Souvent, leurs sections peu incisées sont investies par une dense couverture de végétation riveraine. L'endiguement des cours à l'amont est sans doute parmi les facteurs qui expliquent la morphologie actuelle des vallées. Les observations de surface ont révélé la présence de deux terrasses alluviales historiques dont la terrasse inférieure est beaucoup moins présentée et fait même défaut (photo 17).

IV.2.1.1. Vallée de l'oued Bou-Hertma



Photo 17. Vue sur l'étendue de la nappe alluviale de la terrasse historique supérieure de l'oued Bou-Hertma, à la hauteur de Sidi Mohammed Ben Salah (cliché : L. Lahmar, 26/12/2008).

IV.2.1.2. Vallée de l'oued Kesseb

Elle comprend deux niveaux alluviaux d'inégal développement : une terrasse historique supérieure qui forme la surface de la plaine actuelle et une autre terrasse inférieure peu développée (photo 18).



Photo 18. Le dispositif de terrasses historiques de l'oued Kesseb, à quelque 2,5 km en amont de sa confluence avec l'artère principale de la Medjerda (cliché : L. Lahmar, 22/7/2009).

IV.2.3. Dispositifs alluviaux dans la vallée de l'oued Tessa

Les coupes fluviales informatives sur les archives sédimentaires sont également rares dans la vallée de Tessa. Mais l'attention est frappée par la grande extension des nappes alluviales de la terrasse historique supérieure qui donnent le paysage d'El-Merja. Concernant la construction alluviale de la terrasse historique secondaire, elle est peu développée et se confond parfois avec des accumulations de banquette. La nature des espèces végétales peut constituer un critère de distinction entre les deux modelés. Sur la photo 19, le niveau supérieur porte une végétation de *Ferula communis* alors que le niveau inférieur est formé d'un matorral dense de *Tamarix*.



Photo 19. Le paysage fluvial de la vallée de Tessa au lieu-dit Eryebna (cliché : L. Lahmar, 16/4/2011).

IV.3. Tronçon III (vallée inférieure)

Il correspond au tronçon de la vallée de Testour-Mjez El Beb, situé à l'aval de la digue du barrage de Sidi-Selem (photos 20, 21 et 22). Les croquis géomorphologiques réalisés concernent deux secteurs : le premier appartient à la région de Testour-Slougua (fig. 38), le second intéresse la plaine de Mjez El-Beb et ses abords (fig. 39).

IV.3.1. Secteur de Testour-Slougua



Photos 20, 21 et 22. Les modelés fluviaux dans la région de Testour.

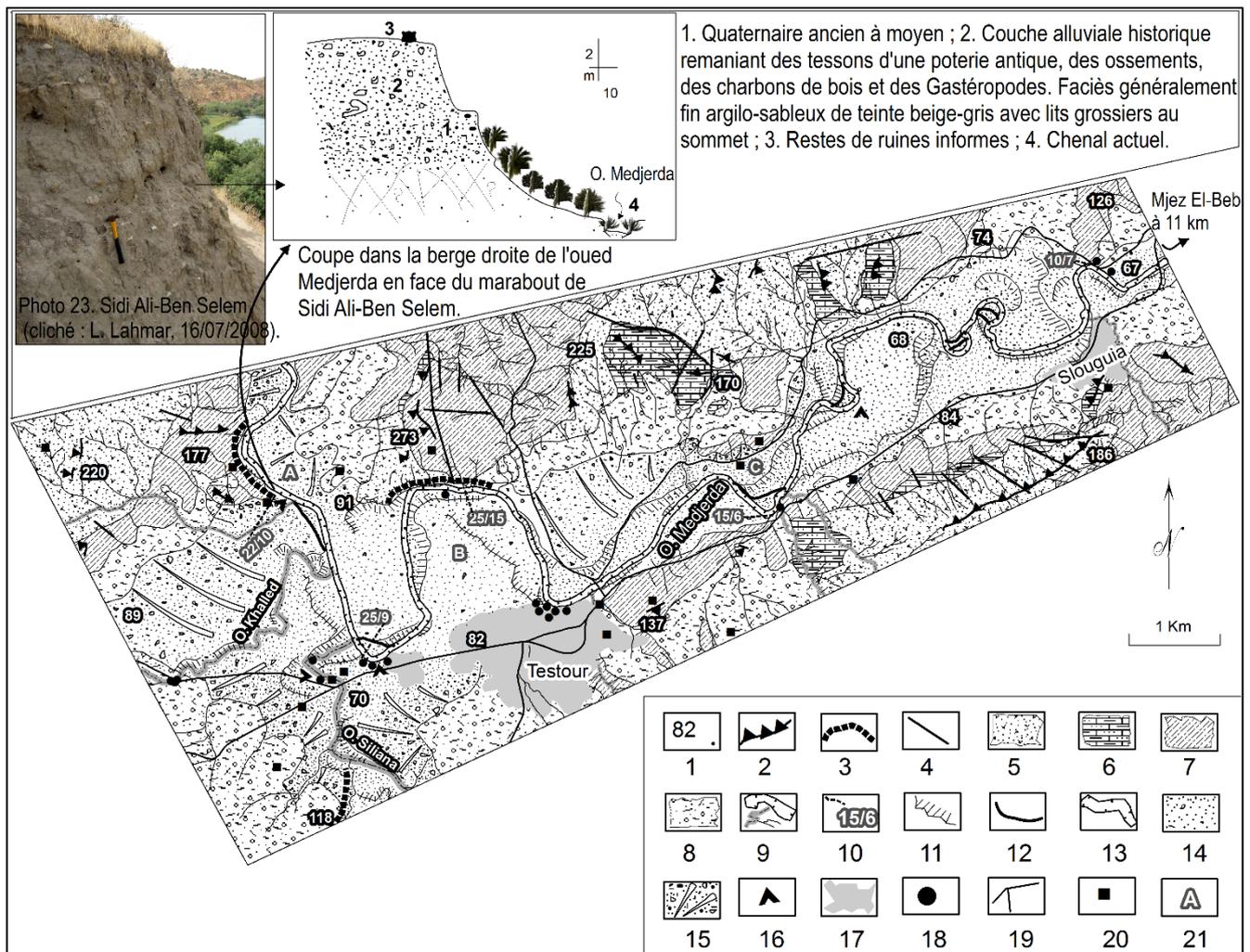


Fig. 38. Croquis morphologique dans le secteur de Testour-Slougua.

1. Cote d'altitude ; 2. Crêt ; 3. Escarpement ; 4. Faille ; 5. Formations triasiques (argiles, grès, dolomies et gypse) ; 6. Couches marno-calcaires du Crétacé inférieur et supérieur ; 7. Affleurements gréseux, marneux, argileux et conglomératiques d'âge tertiaire (Oligocène, Miocène et Pliocène) ; 8. Formations argilo-sableuses, croûte et encroûtement d'âges quaternaires ; 9. Réseau fluvial actuel de l'oued Medjerda ; 10. Largeur du lit mineur et commandement du talus de la berge ; 11. Talus d'érosion ; 12. Chenaux de débordement de méandre illustrant des recoupements ; 13. Rebord de terrasse, le niveau supérieur correspond aux alluvions de la terrasse historique supérieure qui scellent des nappes alluviales du Pléistocène supérieur et de l'Holocène, le niveau inférieur se rapporte aux accumulations de la terrasse historique inférieure ; 14. Surface de la terrasse historique ; 15. Glacis-terrasse ; 16. Sapement actif ; 17. Espace bâti ; 18. Déchets ; 19. Routes ; 20. Ruine antique et marabout ; 21. Paysage photographié ; 10, 16, 18 et 21, localisation par GPS.

IV.3.2. Secteur de Mjez El-Beb et ses environs

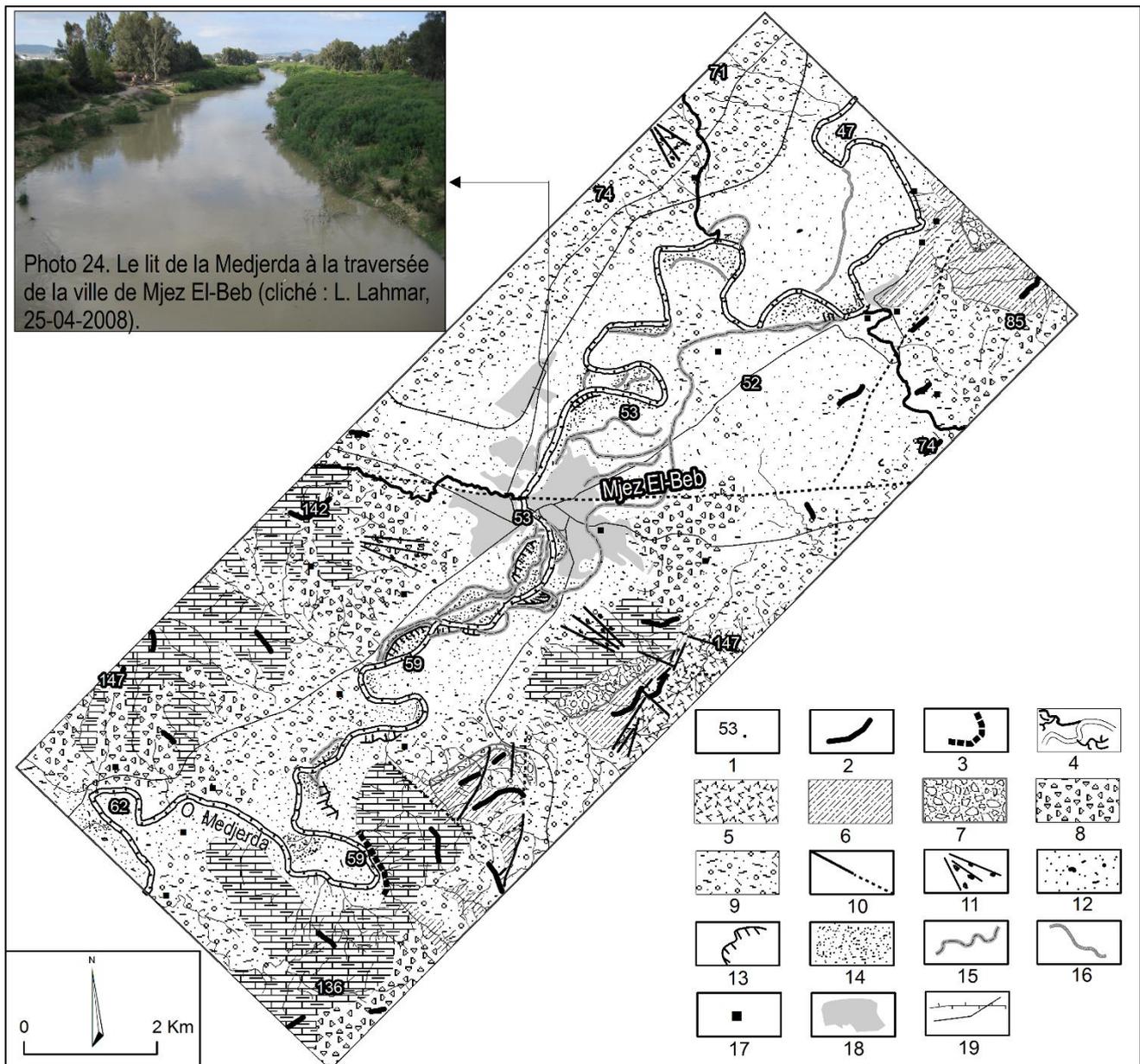


Fig. 39. Croquis géomorphologique et paysage fluvial dans le secteur de Mjez El-Beb.

1. Point coté ; 2. Crête de relief limitrophe ; 3. Escarpement ; 4. Réseau hydrographique ; 5. Argiles, dolomies, et gypses du Trias ; 6. Marnes, calcaires feuilletés et massifs du Crétacé inférieur et supérieur ; 7. Conglomérat, sables et argiles, d'âge tertiaire ; 8. Dépôts grossiers à croûte calcaire feuilletée du Pléistocène moyen ; 9. Formation argilo-sableuse à lits caillouteux : Pléistocène supérieur-Holocène ; 10. Faille sûre/probable ; 11. Cône de déjection (Pléistocène moyen/supérieur) ; 12. Nappe alluviale distale ou terrasse historique supérieure ; 13. Talus d'érosion fluviale, rebord de terrasse ; 14. Dépôt actuel de fond d'oued ; 15. Paléochenaux donnant une idée sur l'espace de divagation historique de la Medjerda ; 16. Chenaux de débordement de méandre offrant par endroits des banquettes ; 17. Site archéologique ; 18. Espace bâti ; 19. Route et chemin de fer.

Conclusion du chapitre IV

Dans les trois tronçons fluviaux étudiés, deux grands types de modèles quaternaires dominent dans la morphologie des piémonts : les dépôts en cône de déjection et les niveaux de glacis. Les plus marqués dans la morphologie sont les modèles de cône, vus surtout dans le cours moyen des oueds El-Hammem, El-Henja et La'achar, au nord de la ville de Ghardimaou. Dégagés souvent en terrasse, ce sont des cônes de déjection et alluvial d'âge historique puisqu'ils renferment dès la base des structures archéologiques en place antiques. Leur matériel est généralement grossier, compacté et de couleur sombre au bas des versants, alors qu'il est assez meuble, frais et de teinte claire à l'approche de la nappe alluviale de la plaine. Dans les fonds de vallée, la Medjerda et ses principaux affluents s'enfoncent actuellement dans un système de terrasses et banquettes d'inégal développement. La terrasse historique supérieure est la plus tranchée dans le paysage tant par son épaisseur que par sa continuité. Elle montre une superposition de dépôts alluviaux appartenant souvent au Pléistocène supérieur, à l'Holocène et à l'époque historique. Les accumulations alluviales historiques sont reconnaissables par leurs faciès tendres, argilo-sablo-limoneux, de couleur beige-gris et de structure polyédrique fine à lits parfois grossiers de type intraformationnel ainsi que par les débris archéologiques antiques incorporés dans les sédiments. La terrasse historique inférieure qui l'emboîte est beaucoup moins bien représentée et subsiste souvent sous forme de lambeaux. Elle se distingue par un dépôt de texture souvent grossière à la base et devenant essentiellement sablo-argileuse de couleur beige et riche en débris de Gastéropodes dans la partie supérieure. Cependant, vu la rareté d'éléments de datation, ce dépôt devrait être par corrélation l'équivalent de celui trouvé par D. Faust *et al.* (2004) à Ghardimaou et daté à la base de 497 ± 32 ans Cal. B.P (fin de l'époque médiévale). Le modèle de banquettes ou de bourrelets alluviaux de crues est également peu développé. Il correspond à des gradins d'accumulation et d'érosion souvent remobilisés à chaque nouvelle crue. Par ailleurs, la morphogenèse ne relève pas seulement de mécanismes naturels mais c'est aussi un fait de civilisation. La société peut apporter des informations parfois précieuses sur les états passés et actuels des paysages fluviaux. Cet aspect fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V. La géoarchéologie fluviale, comme outil de caractérisation de la dynamique fluviale historique et des interactions milieux-sociétés

L'approche géoarchéologique repose sur plusieurs méthodes et outils de différentes disciplines pour l'étude des problématiques paléoenvironnementales dans un contexte archéologique (Berger *et al.*, 2008, p. 8 ; Leveau, 2005, p. 13 ; Fouache, 2010, p. 17 ; Arnaud-Fassetta, 2008 et 2011, p. 2 et p. 25). La géoarchéologie fluviale en particulier s'attache à esquisser l'évolution passée des cours d'eau et des modes de vie des riverains à travers l'examen de leurs traces matérielles. Elle s'appuie principalement sur des marqueurs archéologiques et paléo-environnementaux afin de reconstituer les états anciens du paysage fluvial et de déceler les comportements sociétaux des habitants de l'époque, surtout lors des crises climato-hydrologiques. Cela permet d'alimenter les réflexions sur la dialectique sociétés-climat-dynamique fluviale-risque et de bien documenter la question du risque fluvial qui préoccupe les gestionnaires contemporains (Oueslati, 2005, p. 158 ; Allinne, 2007, p. 81 ; Arnaud-Fassetta, 2008, p. 12 ; Fehri, 2018, p. 53). Le terrain d'étude favori pour l'application de cette approche est la plaine, terroir de forte occupation humaine, de production agricole, et espace de circulation privilégiée. C'est le cas des Grandes Plaines de la moyenne vallée de l'antique *Bagrada*, vantées par les auteurs anciens (Polybe, Salluste, Appien). Si l'on considère les reliefs dominants de la région d'étude, celles-ci comprennent près de 363 sites archéologiques romains, soit un site tous les 6 km². Mais nombreux sont les ruines antiques, surtout en fond de vallée, qui ont été enfouies sous les alluvions ou démolies et réutilisées pour la construction des villes et des ouvrages d'art récents (Berbrugger, 1857, p. 389 ; Tissot, 1888, p. 250 et 251 ; Carton, 1891, p. 1). Dans le cas de la moyenne vallée de la Medjerda, quelques rares vestiges dont certains sont inédits car découverts lors de nos prospections de terrain sont encore visibles au sommet des berges des oueds et dans le fond des chenaux. Elles constituent un apport substantiel dans l'appréciation de l'évolution morpho-sédimentaire et morphodynamique ainsi que des liens sociétés-milieux. Dans l'objectif de tirer profit des traces d'occupation anciennes, cette recherche fait appel à un vaste ensemble de données et de techniques. Le corpus de données est composé de sources écrites et archéologiques, de documents cartographiques et photographiques, et fait appel aux applications SIG et GPS, aux traitements et aux analyses de laboratoire (sédimentologie, datations relatives et radiocarbone AMS)

découlant avant tout d'observations répétées de terrain. Dans ce qui suit, cinq secteurs sont étudiés et présentés de l'amont vers l'aval de la vallée de la Medjerda.

V.1. Le cours moyen de l'oued El-Hammem à Werghich

Situé à 8 km au nord de la ville de Ghardimaou, le collecteur de l'oued El-Hammem doit son nom à la station antique des eaux thermales d'*Ad Aquas* qui appartenait à la cité ancienne de *Thuburnica*. Celle-ci renferme d'abondants vestiges archéologiques dont certains sont associés à l'oued El-Hammem. Sur sa berge de rive droite, à quelques 300 m en aval du pont du village, se trouve une coupe stratigraphique taillée dans les ruines antiques (fig. 40). Elle expose sur 2,5 m de commandement un dépôt de cône de déjection proximal dégagé en terrasse dont l'allure est désordonnée. Il est coiffé par une couverture alluvio-colluviale d'1 m d'épaisseur. L'âge antique du matériel est livré par le mur d'un ancien édifice taillé presque entièrement dans la berge (photos 1 et 2). Il est fourni aussi par des tessons de poterie datant des V^e et VI^e siècles apr. J.-C. Il en découle que l'alluvionnement était déjà avancé sous les Romains. L'exhaussement de la topographie les aurait certainement incités à venir s'installer au voisinage du cours d'eau. L'occupation semble avoir été favorisée par la divagation fluviale, comme l'indique la position du même mur aujourd'hui tronqué par les eaux d'écoulement (photo 3). Par ailleurs, l'enfouissement alluvial des constructions romaines est dû certainement à des événements hydrologiques majeurs violents. Sur le plan géomorphologique, le dispositif comprend deux niveaux de terrasses et des gradins de laisses de crues (fig. 40). Ce dispositif change au gré de la topographie. La terrasse historique supérieure est omniprésente mais son épaisseur et son faciès varient fréquemment. La terrasse historique inférieure est discontinue et s'apparente souvent à des accumulations de banquettes. Mais le plus frappant dans ce secteur est la grande étendue des sections qui s'inscrivent dans un système de méandres. En réalité, le style méandrique est une réponse morphologique de l'oued faiblement alimenté par les sédiments. D'ailleurs, les données topographiques (taille modeste du bassin-versant 25 km², pente faible variant de 2 et 3°) et hydrographiques (réseaux de ravins lâche avec faible rapport de confluence) ne favorisent pas des écoulements concentrés. Disposant d'une énergie nette qu'il doit dissiper, l'oued adopte un tracé sinueux en allongeant son parcours jusqu'à l'équilibre.

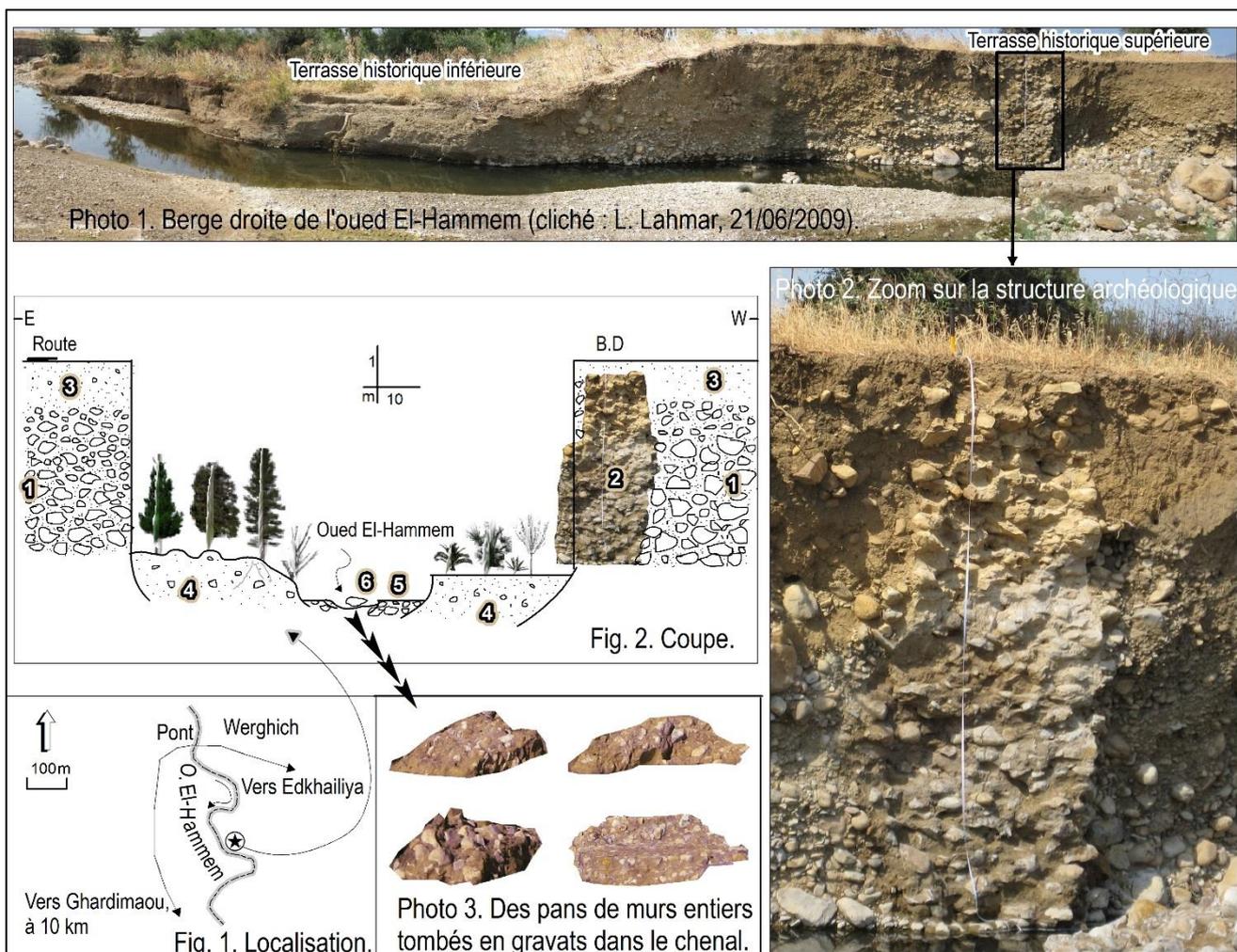


Fig. 40. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued El-Hammem, à quelques 300 m en aval du pont Werghich-Ghardimaou.

1. Matériel hétérométrique grossier composé de blocs et de galets pris dans une matrice compacte essentiellement sableuse (75 %), de couleur gris-brun (2,5YR 5/2), de teneur faible en matière organique (0,57 %) et assez riche en calcaire total (32,72 %) ; son âge est historique puisque il fossilise dès sa base une structure antique et remanie des débris archéologiques d'époque tardive ; 2. Vestiges d'un mur ancien en place ayant été exhumé et défoncé par les eaux courantes, des restes de pans de mur se trouvent dans le chenal de l'oued (6) ; 3. Couche sablo-limono-argileuse de teinte gris-foncé à brun (2.5YR 4/2), riche en matière organique (1,50 %), pauvre en CaCO_3 (23,36 %) et coiffant un sol cultivé, terrasse historique supérieure ; 4. Accumulation fine sablo-limono-argileuse à Hélix, de couleur gris-brun (2.5YR 5/2), riche en carbone (0,86 %) et en éléments organiques (1,48 %), sa surface est occupée par une végétation dominée par *Echinops spinosus*, *Verbascum* et *Ferula sp.*, terrasse historique inférieure ; 5. Matériel grossier composé de galets et de graviers charriés par les crues récentes et formant des gradins d'accumulation dont l'étendue et l'épaisseur sont variables ; 6. Chenal de l'oued encombré par de gros blocs de dimension parfois métrique.

V.2. Le secteur compris entre la ville de Ghardimaou et le marabout de Sidi Emmbarek

La morphologie d'ensemble est celle d'une plaine alluviale de 5 km de largeur moyenne située à des altitudes variant de 202 à 193 m, soit une pente de 0,26 %, et bordée par des reliefs peu élevés (< à 500 m) mais bien tranchés dans le paysage. À quelques 2 km en aval de l'agglomération de Ghardimaou, au lieu-dit douar Guessi, se trouve une coupe stratigraphique taillée dans la berge de rive droite de l'oued Medjerda, ici large de 11 m et profond de 8 m (fig. 41). La coupe, inédite, expose d'importants vestiges archéologiques en place qui affleurent localement sur plus de la moitié du talus de berge et se suivent latéralement sur environ 50 m (photos 4, 5 et 6). Les ruines antiques, inconnues à ce jour, semblent avoir été exhumées suite à la fameuse crue de 1973, comme l'indique la comparaison diachronique des photographies aériennes. La structure interne des dépôts ruisselés montre trois séquences alluviales superposées qui se distinguent par leur couleur et leur texture essentiellement fine (fig. 41). La prépondérance du faciès fin s'explique par la faiblesse des pentes de ce tronçon de vallée évasée et par la nature pétrographique des roches constituant les reliefs dominants. À la base des accumulations se voit, sur environ 2 m d'épaisseur, une couche sablo-argileuse de couleur jaune-brun, riche en fer et en débris d'*Hélix*, probablement d'âge holocène. Sa surface est criblée de trous de suffosion servant d'exutoires aux eaux de sub-surface (Bkhairi, 2012, p. 6). Au-dessus s'observe sur 4 m de hauteur une couche sablo-limono-argileuse à dominance fine de couleur gris-clair, renfermant des éléments grossiers disposés en lits ou en vrac et fossilisant ou remaniant différents objets archéologiques antiques. Parmi les vestiges, des faces de constructions en moellon et des murs en blocage dont des pans entiers sont déjà tombés dans le lit fluvial. Ils remontent sans doute à l'Antiquité tardive comme le prouve le matériel en céramique récolté et soumis à M. Ben Moussa, qui le date des IV^e - V^e siècles (fig. 42). Une datation radiocarbone AMS (Beta-460120) sur des fragments de charbon de bois donne presque le même âge que celui déterminé par le céramologue, soit 1580 ± 30 ans B.P. (IV^e siècle). Enfin, l'ensemble du dépôt est surmonté par une nappe alluviale de 1,5 m d'épaisseur formant la terrasse historique supérieure. Elle est dominée par une matrice argilo-limono-sableuse de teinte gris-brun, de structure cubique polyédrique et contenant différents éléments grossiers. Elle fossilise un mur long de 7 m composé de six assises incomplètes faites de petits moellons noyés dans des lits de mortier. La position de ce mur et des différentes ruines, aujourd'hui façonnées en talus de terrasse, laisse penser au

contexte paléoenvironnemental dans lequel s'est inscrite leur évolution. Est-ce que ces établissements humains étaient éloignés ou non de l'oued Medjerda à la date de leur construction ? Étaient-ils bâtis à un moment où la sédimentation était avancée ou lors des périodes de défluviation et de creusement fluvial. Quel est le degré de perception et d'acceptation du risque fluvial par les riverains à l'époque ?

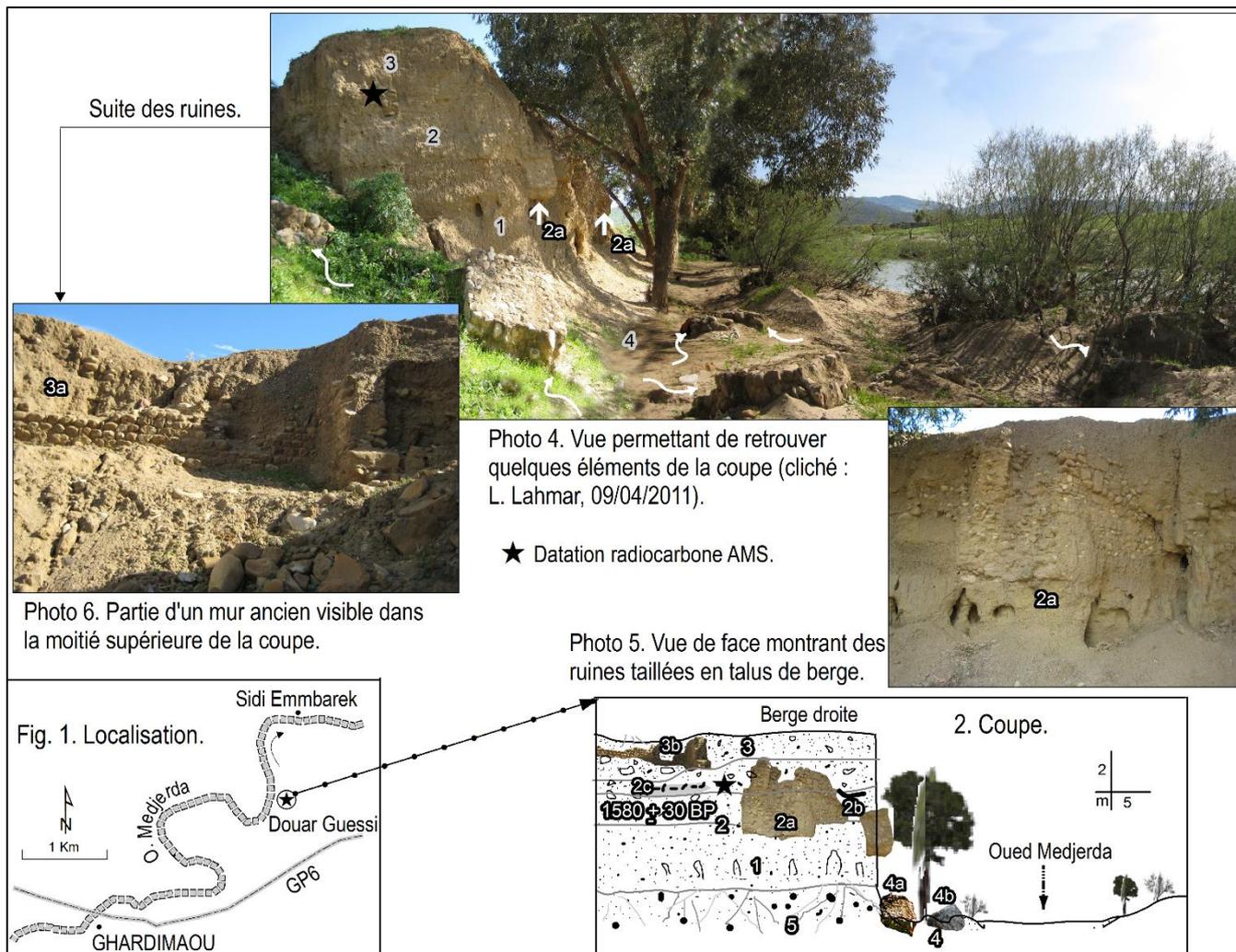


Fig. 41. Coupe dans la berge droite de l'oued Medjerda à douar Guessi près de Ghardimaou.

1. Couche sablo-argileuse de couleur jaune-brun (10YR 5/3) contenant peu de matière organique (0,6 %) et de calcaire total (27,27 %) à taches rouilles et à débris d'*Hélix*, probablement d'âge holocène ; 2. Couche sablo-argileuse de couleur gris-clair (2,5 YR 7/2) à blocs et galets souvent dispersés, riche en matière organique (1,16 %) et pauvre en calcaire total (25,45 %), fossilisant ou remaniant un abondant matériel archéologique (restes de constructions (2a), fragments de poterie (2b) datant du IV^e-V^e siècle, grains de charbon de bois (2c) ayant donné un âge radiocarbone AMS, Beta-460120, de 1580 ± 30 ans B.P.) ; 3. Couche argilo-limono-sableuse de teinte gris-brun (2.5YR 5/2) à nombreux gastéropodes continentaux emballant des éléments grossiers et comportant des restes d'un mur ancien (3b) ; nappe alluviale de la terrasse historique supérieure ; 4. Matériel éboulé et mélangé à des dépôts plus récents de laisses de crue formant un modelé de banquettes ou de bourrelets de sable, sa surface est parsemée par des pans de murs antiques (4a et 4b) ; 5. Dépôt de remaniement qui, masquant la coupe, empêche de bien suivre la succession des niveaux alluviaux en place.

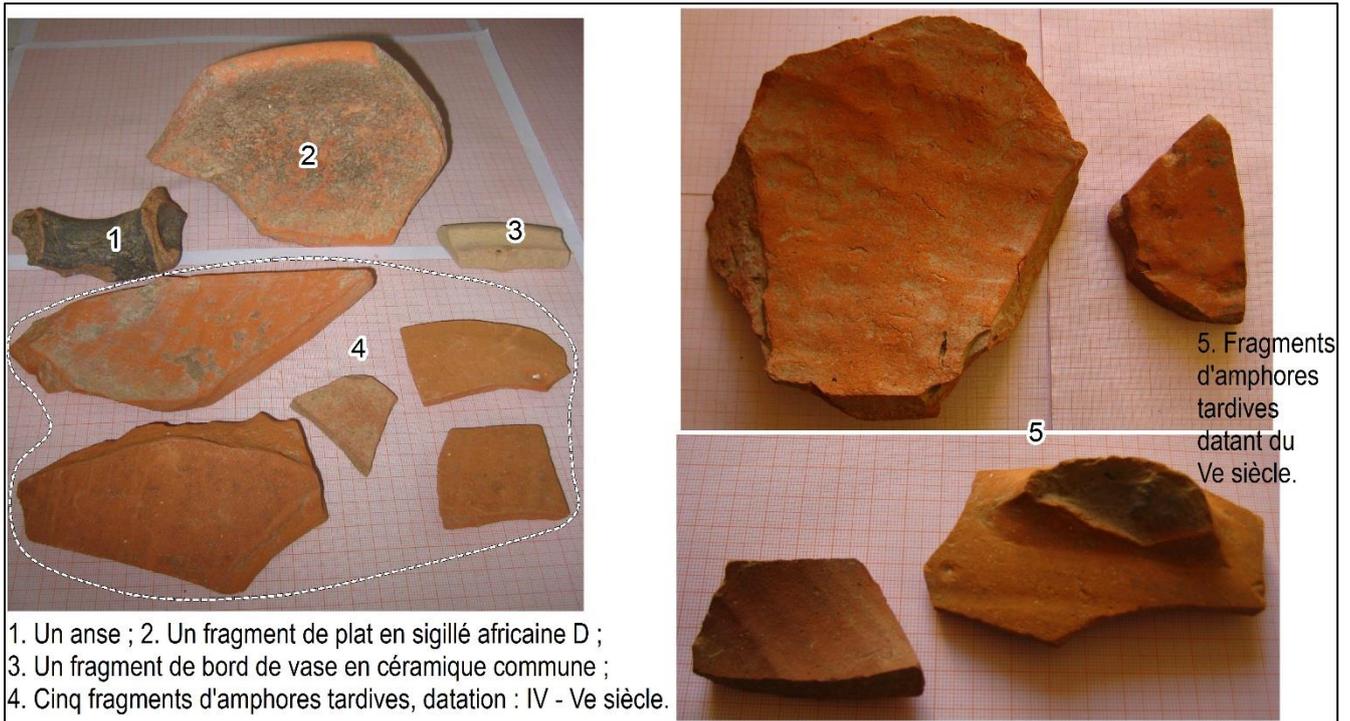


Fig. 42. Matériel céramique récolté, puis identifié et daté par M. Moncef Ben Moussa.

V.3. Le site archéologique de Chemtou

L'antique *Simitthus*, l'une des colonies florissantes de la Proconsulaire dont la fondation remonte à la fin du VI^e siècle av. J.-C. au plus tard (Khanoussi, 2013), est située sur la rive gauche de la vallée de la Medjerda (fig. 43). Celle-ci s'écoule de la frontière tuniso-algérienne aux environs de la ville de Ghardimaou et parcourt une distance de 37 km au milieu d'une plaine alluviale, large de 5 km avec une pente de 1,38 ‰, pour traverser l'actuelle Chemtou où elle reçoit quatre grands affluents (fig. 44). Les vestiges d'occupation humaine sont disséminés au pied du relief dominant, constitué essentiellement d'affleurements de marbre polychrome (d'âge secondaire), largement diffusé à l'époque romaine comme l'attestent les carrières impériales de marbre numidique (Beschaouch *et al.*, 1993 ; Khanoussi, 2008, 2013). Les ruines se voient également au sommet des berges des oueds et au fond des lits là où ont été levées les coupes stratigraphiques (fig. 43). Le site choisi a très tôt retenu l'attention des chercheurs, compte tenu surtout de l'existence des restes d'un pont-barrage monumental sur la Medjerda, reconstruit en l'an 112 sous le règne de Trajan (Tissot, 1881, Caillat, 1882, Tissot, 1888 ; Saladin, 1893 ; Carton, 1912 ; Beschaouch *et al.*, 1993 ; Oueslati, 2005 ; Zielhofer et Faust, 2003). Nous avons pensé qu'il méritait

d'être ré-analysé car de nouveaux éléments de réflexion utiles pour la compréhension de l'évolution du paysage se dégagent à la lumière d'une confrontation des données bibliographiques et de celles archéo-géomorphologiques recueillies *in situ*. Les premières informations obtenues sont offertes par les entailles de l'oued Medjerda et de son paléo-affluent l'oued El-Meleh qui le rejoint immédiatement en aval desdites ruines du pont-barrage romain (fig. 43). Les coupes stratigraphiques, levées transversalement à l'axe d'écoulement des deux cours d'eau, ressemblent en fait à celles présentées dans un travail antérieur (Oueslati, 2005) mais elles ont été dessinées selon nos propres observations et mesures d'autant plus qu'elles renferment des détails archéologiques importants pour l'interprétation. Du côté de la berge de rive gauche de l'oued El-Meleh, large de 5 m, la coupe, développée sur 12 m de hauteur jusqu'au sommet du cimetière actuel, expose des structures antiques en place visibles sur 45 m de longueur (photo 7). Il s'agit des restes d'un mur en moellons dont la base, partiellement masquée par des sédiments, est indiquée par deux rangées de blocs taillés. Ce dernier est probablement en rapport avec un ouvrage de maçonnerie destiné à soutenir les parois contre l'action érosive des eaux courantes. Accolés à lui, des restes d'édifice en place apparaissent recouverts par 3 m de dépôts historiques ce qui donne une idée du niveau du sol sur lequel s'étaient installés les anciens. Ces édifices, de forme quadrilatère et disposés suivant un plan incliné, sont construits en matériaux de marbre polychrome et semblent en rapport avec des bassins de collecte des eaux ou des thermes. À leur extrémité ouest se trouve une structure compacte de forme demi-circulaire et à surface bosselée, interprétée comme des restes d'amorces d'un pont à seule arche construite jadis sur l'oued (Tissot, 1881, 1888, p. 8 et p. 326 ; Saladin, 1893, p. 38 ; Beschaouch *et al.*, in Oueslati, 2005, p. 109). Mais sur le terrain, mis à part le massif en maçonnerie décrit et en l'absence de son équivalent sur la berge d'en face, rien n'indique la présence d'un tel monument à moins qu'il ne soit masqué par les remblaiements sédimentaires.

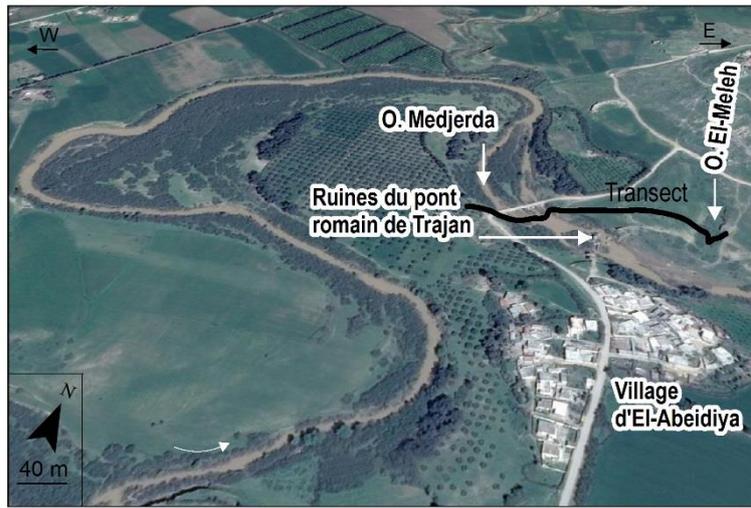


Fig.1. Emplacement des coupes (image de Google Earth, 2016).

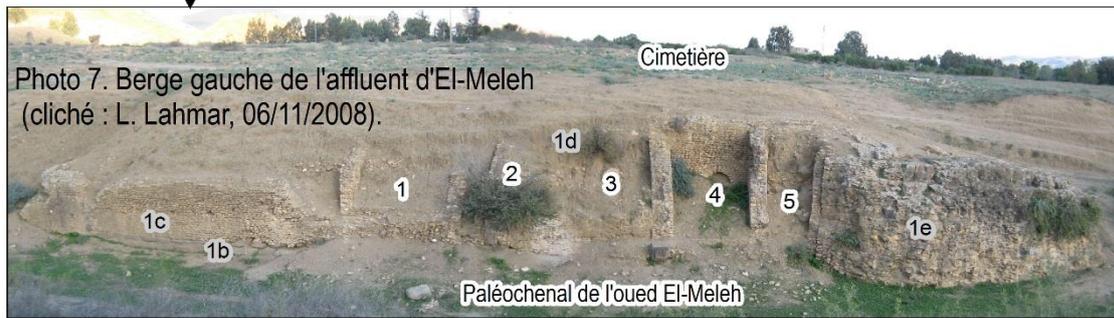
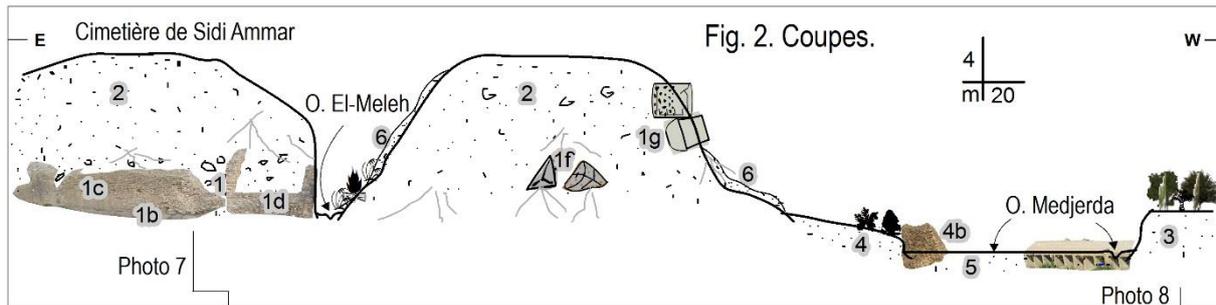


Photo 7. Berge gauche de l'affluent d'El-Meleh (cliché : L. Lahmar, 06/11/2008).



Photo 8. Berge gauche de l'oued Medjerda (cliché : L. Lahmar, 31/03/2013).

Fig. 43. Coupes stratigraphiques perpendiculaires à l'axe d'écoulement des oueds de la Medjerda-El-Meleh et données archéologiques associées.

1. Structures archéologiques datant de l'époque romaine : 1b. Deux rangées de gros blocs taillés visibles sur 10 m de longueur formant le soubassement d'un mur, 2c. Partie d'un mur de soutènement en moellons, haut de 4 m, 2d. Restes de constructions de forme quadrilatère bâtis en petits blocs irréguliers de marbre liés au mortier de chaux et d'argile dont l'ensemble est aujourd'hui enfoui sous 3 m d'alluvions, apparemment en rapport avec environ cinq bassins de collecte des eaux ou des thermes, 1e. Massif en maçonnerie de forme demi-circulaire probablement indicateur de la culée gauche du petit pont établi sur l'oued El-Meleh que les voyageurs européens datait de l'époque romaine (Tissot, 1888 ; Saladin, 1893), 1f. Ruines masquées par des colluvions et des remblais de la nouvelle route reliant Chemtou à Oued Meliz et Ain El Gsir, 1g. Vestiges de citernes antiques en place ; 2. Dépôt fin homométrique de texture argilo-limoneuse et de couleur beige à grise ; terrasse historique supérieure ; 3. Terrasse historique inférieure ; 4. Épaisse banquette subactuelle à actuelle à la surface de laquelle un fragment d'édifice antique (4b), visible sur 2,40 m, est à moitié enfoui sous environ 2 m d'alluvions ; 5. Matériel du fond de l'oued actuel ; 5. Tablier colluvial et limite de visibilité.

La deuxième coupe associée à la première a été levée transversalement à l'axe principal de la Medjerda, là où se trouve l'ancien pont romain aujourd'hui presque complètement en ruine (fig. 43, photo 8). Parmi les vestiges qui en témoignent, des fragments du tablier et des morceaux de socle et de pile de pont qui encombrant le lit actuel. D'autres vestiges sont encore en place comme les deux piliers de la partie sud. Leur base de même que les ruines d'un moulin à eau portent à croire que la topographie du chenal ne semble pas avoir subi de modifications significatives depuis les Romains. Mais le profil transversal de la vallée paraît quatre fois plus large (12 m en moyenne) que celui d'aujourd'hui, où la section est investie par la ripisylve. Cela renvoie à des conditions hydro-climatiques caractérisées par des écoulements violents et des crues puissantes intervenus surtout à l'époque romaine tardive, comme l'atteste le remploi de nombreuses inscriptions datables du II^e et du début du III^e siècle apr. J.-C. dans les travaux de réparation du pont de Trajan, exécutés au moins au cours de la deuxième moitié du III^e siècle ou au début du IV^e siècle apr. J.-C. (Khanoussi, 1988, p. 209). De plus, le tracé fluvial au temps des Romains serait vraisemblablement moins sinueux que celui d'aujourd'hui, marqué par des méandres hypertrophiés. La preuve est donnée par des traces de chenaux de défluviation ainsi que par des talus d'érosion hérités dont le plus expressif se trouve à quelques 150 m de la coupe (fig. 44).

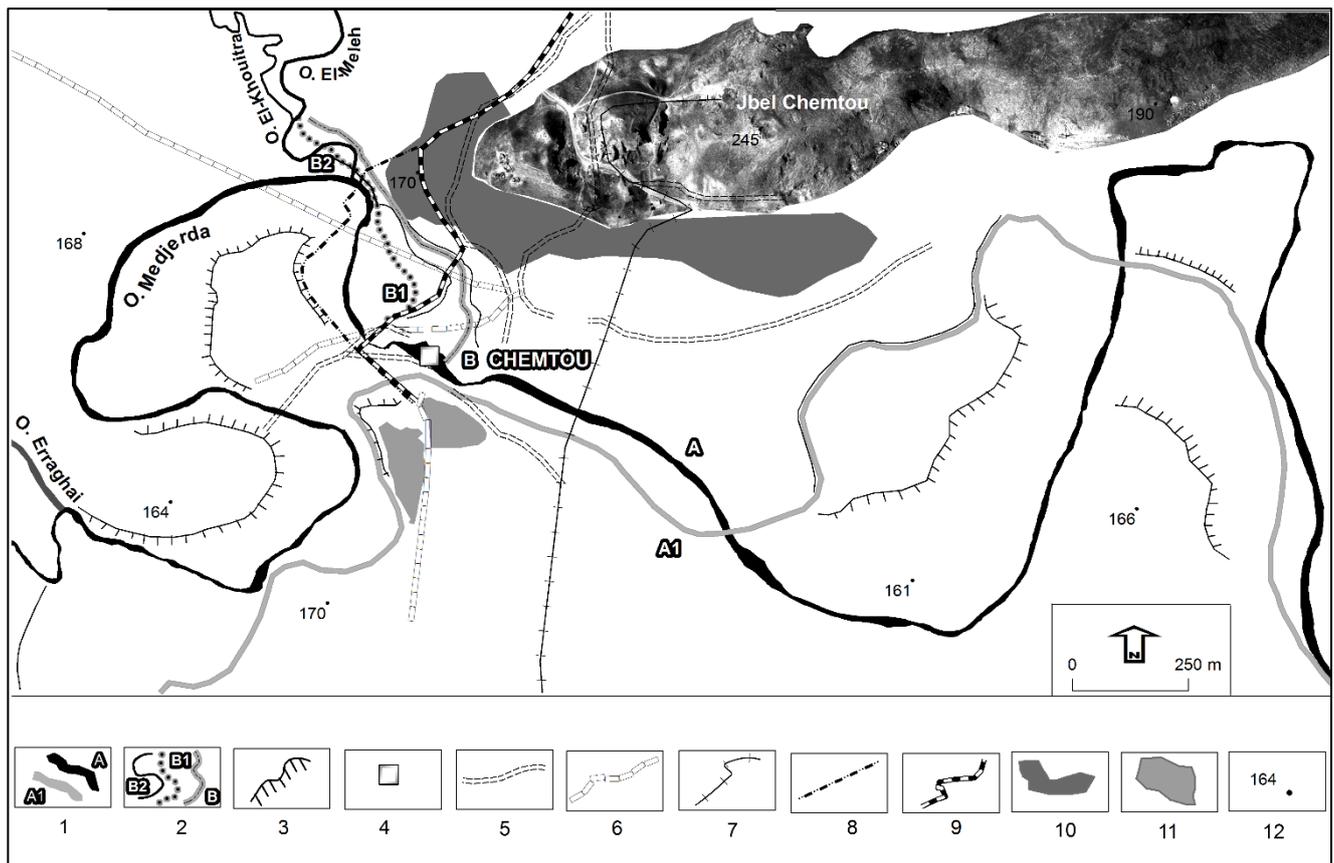


Fig. 44. Reconstitution de l'évolution du paysage fluvial de l'actuelle Chemtou depuis l'Antiquité romaine.

Chenal de l'oued Medjerda : A. Position à l'époque romaine, A1. Position actuelle (tracée sur une image-satellite Sentinel-2 datant du 19-02-2016) ; 2. Chenal tributaire de l'oued El-Meleh : B. Situation au temps des Romains, B1. Situation à la fin du XIX^e siècle (vu pour la première fois par Tissot en 1881 puis par Caillat en 1882), B2. Situation à l'époque actuelle, post-1946-1947 (d'après nos enquêtes de terrain et l'analyse des photos aériennes de 1948) ; 3. Talus d'érosion fluviale ; 4. Vestiges du pont-barrage romain dit de Trajan, construit en 112 apr. J.-C. ; 5. Tracés de voies antiques restituées par Caillat (1882) et repris en entier avec de légers ajouts par Saladin (1893) ; 6. Tracés probables de tronçons de voies antiques proposés à la lumière de nos observations directes et de la photo-interprétation des clichés aériens de 1948, 1973 et 1998 ; 7. Tronçon de voie antique faisant usage jusqu'à 129 apr. J.-C. puis transformée en ligne ferrée à l'époque coloniale vers 1879 avant d'être abandonnée en 1890 ; 8. Route aménagée par les forces des Alliés dans les années quarante et abandonnée suite à son écroulement sous l'effet des eaux de la grande crue de 1973 ; 9. Route actuelle établie au début des années 2000, reliant le village de Chemtou à celui de Oued Meliz et à la ville de Jendouba ; 10. Étendue de la zone d'occupation romaine de l'antique *Simitthus* au début du III^e siècle apr. J.-C. (d'après l'image de restitution faite par Golvin, 2008) ; 11. Espace d'occupation actuel, délimitation réalisée à partir de l'image satellitaire Sentinel-2 de 2016) ; 12. Altitude en mètres.

Formant la surface de la terrasse historique supérieure sur laquelle est bâti le village d'El-Abeidiya, ce talus est orienté quasiment dans la même direction d'orientation

que le mur du quai et l'une des arches du pont antique, localisés tous deux sur la berge de rive droite. Il marque ainsi l'ancienne trajectoire raccourcie de l'oued Medjerda avant sa migration récente et spectaculaire vers le nord. Tout cela prouve aussi, et contrairement à ce qu'à affirmait Oueslati en 2005, que le lit fluvial a bien changé de position depuis l'Antiquité romaine. Le changement s'est produit probablement après le déclin du Monde antique, comme le laisse penser l'emplacement des ruines du moulin à eau datées du VI^e-VII^e siècle (Chaouali, 2008, p. 136) et se trouvant sur le passage actuel du chenal au pied de la berge de rive gauche. La mobilité historique des chenaux caractérise également l'affluent latéral de l'oued El-Meleh qui semble avoir occupé trois positions depuis l'Antiquité (fig. 44). La plus ancienne, située au sud de la première coupe décrite, est attestée par des niveaux archéologiques romains taillés dans la berge gauche (fig. 43). La deuxième position, indiquée par un haut talus d'érosion dont on ignore le début d'incision, est repérée à 100 m à l'amont du pont antique au niveau du pont-radier actuel. Elle a été vue pour la première fois par Tissot (1881) puis par Caillat (1882). La troisième position est localisée à 330 m plus au nord, au sommet de la courbure maximale du méandre que décrit actuellement la Medjerda au droit de sa confluence avec l'oued El-Meleh (fig. 44). Elle est issue d'un recoupement du chenal El-Meleh, créé par les forces des Alliés vers 1946-1947 afin de construire une route fluviale reliant les villages de Oued Meliz et Chemtou à la ville de Jendouba. Cette route, unique, est restée fonctionnelle jusqu'à la grande inondation de 1973 puis a été abandonnée suite à la chute du pont enjambant la Medjerda sous l'effet des eaux de crue. N'ayant pas été observés par nos prédécesseurs, les vestiges qui en subsistent sont visibles sur le front de la terrasse historique inférieure et à la hauteur de la confluence des deux cours d'eau. Aujourd'hui, la route franchit la vallée via un pont-radier, construit au début des années 2000, et emprunte le talweg du second paléochenal de l'oued El-Meleh (fig. 44). En fait, les difficultés de desserte routière rencontrées par les générations actuelles devaient être les mêmes que celles rencontrées par nos ancêtres. Par ailleurs, la cité de *Simitthus* se trouvait jadis au croisement de grands axes de communication, vu la richesse de ses carrières en marbre somptueux tant prisé par les anciens (Carton, 1912, p. 24-26 ; Salama, 1949 ; Khanoussi, 1991). La situation de son pont monumental romain, qui appartenait aux grandes voies antiques reliant Carthage à *Theveste* et Carthage à *Hippo Regius*, est très éloquente à cet égard. Il a été endommagé au moins à trois reprises suite à des inondations catastrophiques, puis réparé, voire reconstruit depuis les fondations en l'an 112 comme l'atteste une inscription aujourd'hui conservée dans le musée du site

archéologique (Tissot, 1881, p. 11-12 ; Khanoussi, 2008, p. 109). D'autres situations délicates auraient dû se produire aux environs du pont, eu égard à la dynamique fluviale active reconstituée précédemment, d'une part, et à la configuration des tronçons des voies antiques telles que décrites par les auteurs anciens, d'autre part. Ainsi, l'analyse combinée des données au sein d'un SIG révèle que les routes anciennes se dirigeant vers *Thibursicum Bure* (Téboursouk) et vers *Hippo Regius* (Annaba en Algérie) ne pourraient pas avoir échappé aux méfaits des eaux de crue et de l'alluvionnement. Les tracés des routes restitués par Caillat (1882) et par Saladin (1893) nous paraissent, par endroits, peu conforme à la réalité du paysage. À titre d'exemple, celui indiquant la direction vers *Thibursicum Bure* devrait logiquement suivre l'actuelle route menant au village d'oued Meliz ayant la même orientation que celle du pont romain, plutôt que de longer la rive droite de la Medjerda. La figure 44 présente, en outre, deux autres exemples de restitution de tracés de voies antiques que nous proposons à la lumière d'une observation directe du terrain et de l'analyse des clichés aériens, dans l'espoir de trouver des vestiges matériels pour le confirmer.

V.4. Le tronçon moyen de l'oued Tibar

Situé à 500 m en amont de la digue du barrage collinaire, ce tronçon comprend une coupe stratigraphique appartenant au vaste champ de ruines (13 ha) de l'antique *Thibari* ou Henchir *El Hammamet* (fig. 45). L'oued Tibar est encadré par des reliefs de taille modeste (alt. max. comprise entre 863 et 594 m) mais de dénivelé notable (542 m). Il est alimenté par des apports hydriques et détritiques provenant essentiellement des versants de Jbel Gorraa situé en rive gauche. Les remblaiements sédimentaires sont importants si bien qu'une grande partie du site archéologique est presque entièrement enfouie sous les alluvions (fig. 46). Dans la berge de rive gauche, l'attention est retenue par l'existence d'une structure ancienne (probablement en rapport avec un aménagement hydraulique) dans la coupe stratigraphique (photos 9 et 10). Elle apparaît en place et reposant sur le substrat calcaire. Elle n'a pas été basculée depuis l'amont car les ruines se trouvent loin du sommet de la berge. De plus, la faible énergie des eaux d'écoulement en relation avec un bassin d'alimentation réduit ne serait pas en mesure d'arracher la structure antique. Cela pousse à supposer que son déplacement serait dû à des actions de spoliation. Quoi qu'il en soit, le niveau de la topographie contemporaine de la structure était plus bas d'environ 6 m. Cela renvoie alors à la question du risque fluvial plus fort

pendant l'Antiquité et au comportement des anciens vis-vis des contraintes hydrologiques plus fortes également.

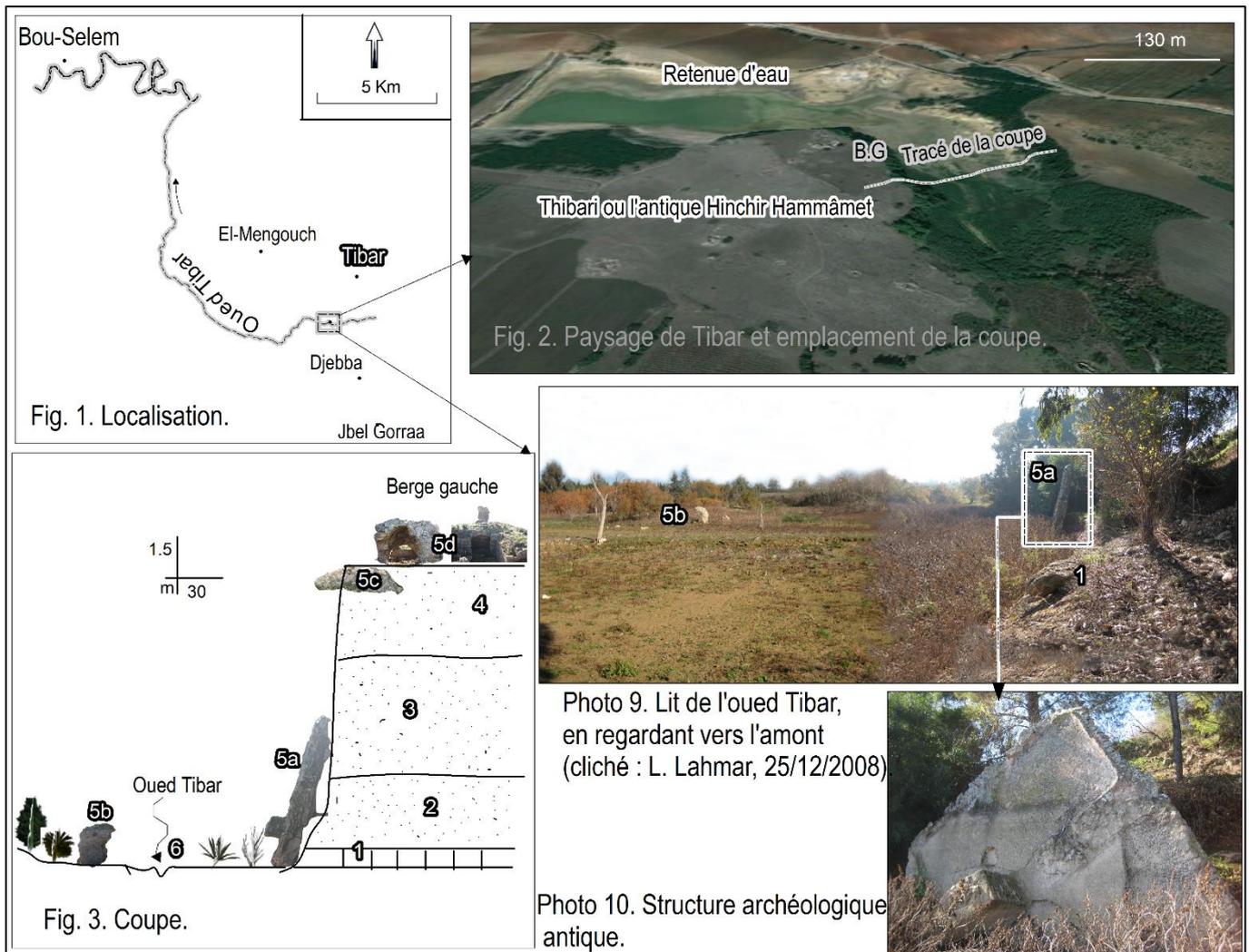


Fig. 45. Coupe transversale de la vallée de l'oued Tibar, 500 m en amont de la digue du barrage collinaire.

1. Substrat géologique calcaire ; 2. Formation sablo-limono-argileuse de couleur gris foncé à brun (2.5YR 4/2) riche en carbone (1,12 %), en matière organique (1,93 %) et CaCO_3 (41,81 %) ; 3. Couche sablo-limono-argileuse de teinte gris-brun (2.5YR 5/2) riche en carbones (1,5 %), en matière organique (2,6 %) et en CaCO_3 (41,81 %) ; 4. Couche sablo-limoneuse de teinte jaune pâle (2.5YR 7/4) contenant une proportion importante de calcaire total (65,45 %) et montrant des signes d'évolution vers l'encroûtement ; 5. Bassin antique de forme rectangulaire (L : 6 m , l : 4m) construit en galets et pavé en *Opus figlinum* en rapport avec un aménagement hydraulique ; 5b. Ruines en grande partie brisées, dont un mur vertical, occupant le passage actuel de l'oued, vestiges probables d'une installation hydraulique ; 5c. Fragment de mur ancien recouvert à moitié par les alluvions, visible dans la partie supérieure de la berge ; 5d. Terre archéologique de la ville ancienne de Tibar dont l'emplacement actuel est à quelques 2 km vers l'est ; 6. Section de l'oued large de 150 m et colonisée par une végétation d'*Acacia cyanophylla*, de *Cyclops sp.*, de *Tamarix* et surtout d'un fourré de *Xanthium strumarium*.

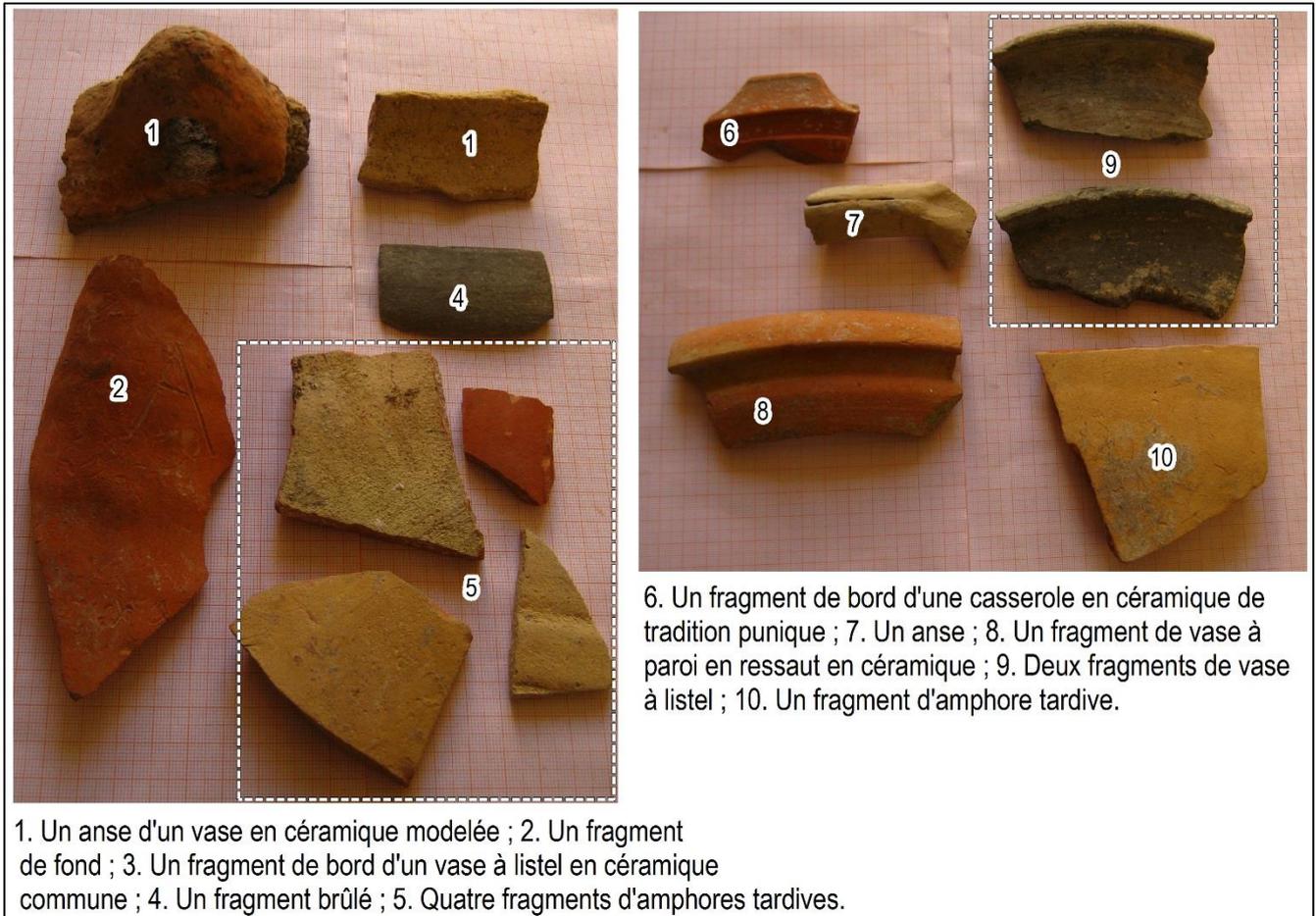


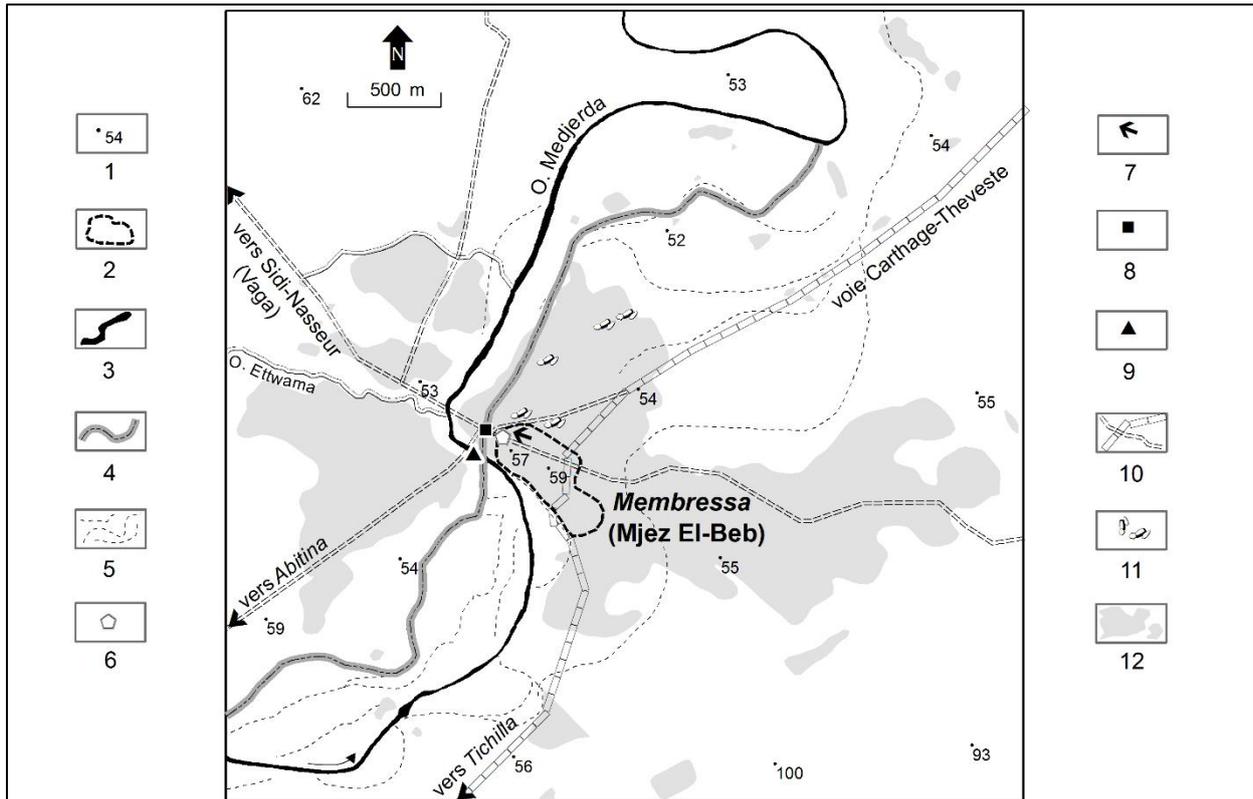
Fig. 46. Matériel céramique récolté, puis identifié et daté par M. Moncef Ben Moussa.

V.5. La cité de Membressa, l'actuelle Mjez El-Beb

Située à 25 km en aval du barrage-réservoir de Sidi-Selem et étendue aujourd'hui de part et d'autre des rives de la Medjerda, la ville de Mjez El-Beb est installée dans une plaine alluviale à faible pente (1,16 ‰) de 3 km de largeur moyenne, encadrée par de petits reliefs remarquables. L'antique *Membressa* tient son ancienne réputation à ses terres fertiles céréalières et à sa position stratégique d'interface entre la capitale et les colonies romaines de l'intérieur. Elle se trouva sur le passage de la grande voie impériale Carthage-*Theveste* sur laquelle s'articula un réseau de routes secondaires (Tissot, 1888, p. 327 ; Slim *et al.*, 2010, p. 207). Au Moyen Âge ifrîqiyen, après la conquête arabe préhilalienne, la cité, en état de décadence relative, fut connue seulement comme étant un centre d'enseignement religieux (Hamrouni, 1997, p. 148 ; Djaït *et al.*, 2008, p. 56). Vers la moitié du XI^e siècle, elle reçut massivement des tribus hilaliennes venues du sud de l'Égypte, qui laissèrent leurs empreintes sur la vie agricole et culturelle (Trabelsi, 2008, p. 57-58 ; Riahi, 2018, p. 140). À l'Époque

moderne, entre 1615 et 1620, de nombreux immigrants andalous, chassés d'Espagne par Philippe III, sont venus s'établir dans la cité qui a retrouvé une grande prospérité (Trabelsi, 2008, p. 48 ; Guellouz *et al.*, 2010, p. 129). Pendant la période du Protectorat, la région a été le centre d'intérêt des autorités coloniales, concrétisé par le développement de grands domaines coloniaux à caractère capitaliste (Riahi, 2018, p. 141). Après l'Indépendance, elle a été intégrée dans la politique agricole de l'État, axée sur l'agriculture irriguée et la mise en place, dès les années 1970, d'un système hydraulique moderne (Cherif et Kassah, 1991, p. 294). La continuité de l'occupation de Mjez El-Beb est perceptible depuis l'Antiquité romaine et attestée sur le terrain par quelques vestiges archéologiques en place. Or, en tenant compte de la dangerosité de la vallée de la Medjerda, de nombreuses questions restent posées quant au risque fluvial et aux rapports qu'entretenaient les anciens avec leur environnement. Ce sujet est très peu abordé par les chercheurs qui se sont souvent contentés de reprendre les informations fournies par les auteurs anciens (Abid, 1998, p. 20 ; Dridi, 2008, p. 157-158 ; Trabelsi, 2008, p. 57-59 ; Grira, 2016, p. 108 ; Abid, 2018, p. 116). Cependant, l'essai le plus ambitieux est celui du géomorphologue, Fehri (2018), qui propose, via une approche géomorphologique sous SIG, une lecture de l'évolution du lit fluvial au cours des deux derniers millénaires. Certains points présentés par l'auteur nous paraissent cependant contestables et appellent parfois à des précisions. Notre contribution va tenter d'offrir une nouvelle lecture de l'évolution de quelques éléments du paysage qu'ont connu les anciens en rapport avec la dynamique fluviale depuis les Romains. Outre une connaissance directe du terrain, elle repose sur le dépouillement de différentes sources documentaires et sur l'exploitation des performances de l'outil SIG en matière de croisement des données textuelles, iconographiques et archéologiques. Concernant les données archéologiques, mises à part quelques traces d'occupation antiques ayant échappé à l'enfouissement alluvial et/ou à la destruction, il ne subsiste plus qu'une partie d'une structure voûtée visible à 100 m à l'est de la municipalité (fig. 47 et 48). Elle correspond sans doute à une porte monumentale déjà vue intacte par des voyageurs européens aux XVII^e et XVIII^e siècles avant sa disparition, selon nos recoupements, entre 1862 et 1876 (Shaw, 1743, p. 214 ; Peyssonnel, 1838, p. 142 ; Berbrugger, 1857, p. 389 ; Guérin, 1862, p. 172). Cette porte monumentale, à laquelle la ville de Mjez El-Beb (passage de la porte) doit son nom (photo 11), aurait été construite sur l'une des voies antiques disparues et dont on propose une restitution (fig. 47) fondée sur des documents cartographiques et des éléments topographiques et archéologiques (Tissot, 1888, p. 327 ; Salama, 1947). La porte se trouvait aussi en face d'un pont romain également

disparu mais reconnu par certains vestiges trouvés par des voyageurs (Berbrugger, 1857, p. 389 ; Guérin, 1862, p. 173 ; Tissot, 1888, p. 330 ; Cagnat et Saladin, 1894, p. 340). En réalité, l'emplacement de ce pont antique est encore méconnu contrairement à ce que croient Grira (2015, p. 108) et Fehri (2018, p. 72), qui considèrent injustement les vestiges de ladite porte comme étant les restes du pont en question. Or, les descriptions faites par les auteurs anciens, et sur lesquelles se sont appuyés ces chercheurs contemporains, sont claires et ne prêtent pas à confusion. Elles indiquent que le pont romain était décalé par rapport à celui du bey mouradite moderne, orienté NE-SE, et qu'il devait se trouver dans l'axe même de la porte monumentale, orientée NW-SE et non loin d'elle. Cela incite pour le moment à placer le monument derrière l'actuelle Direction de l'Hydraulique Urbaine (DHU) où devait aussi passer le chenal ancien de la Medjerda sur lequel il était établi (fig. 47 et fig. 48). Le paléotracé du lit fluvial, actuellement masqué en partie par le bâti urbain, a été restitué grâce surtout à la photo-interprétation des clichés aériens de la grande crue de 1973 (fig. 47). Il est reconnu en plusieurs endroits par son trop-plein et son gabarit assez comparable au lit actuel, situé à une distance moyenne de 388 m plus au nord, et semble marqué par un tracé moins sinueux que celui d'aujourd'hui. Ceci reflète des variations du régime fluvial et laisse penser à des moments de crise que sont les crues vécues jadis par les riverains.



1. Altitude en mètres ; 2. Contour d'éminence topographique à ossature argilo-sableuse pléistocène, site de la première occupation humaine par les Romains ; 3. Lit actuel de la Medjerda (état en 2016) ; 4. Tracé supposé du chenal de la Medjerda au temps des Romains ; 5. Paléochenaux abandonnés ; 6. Position sûre de l'arc romain marquant l'entrée de la ville ; 7. Orientation de l'arc ancien ; 8. Position supposée du pont romain disparu ; 9. Emplacement du pont moderne mouradite encore fonctionnel ; 10. Tracés supposés des voies antiques ; 11. Vestiges d'occupation antique ; 12. Tissu urbain en 2016.

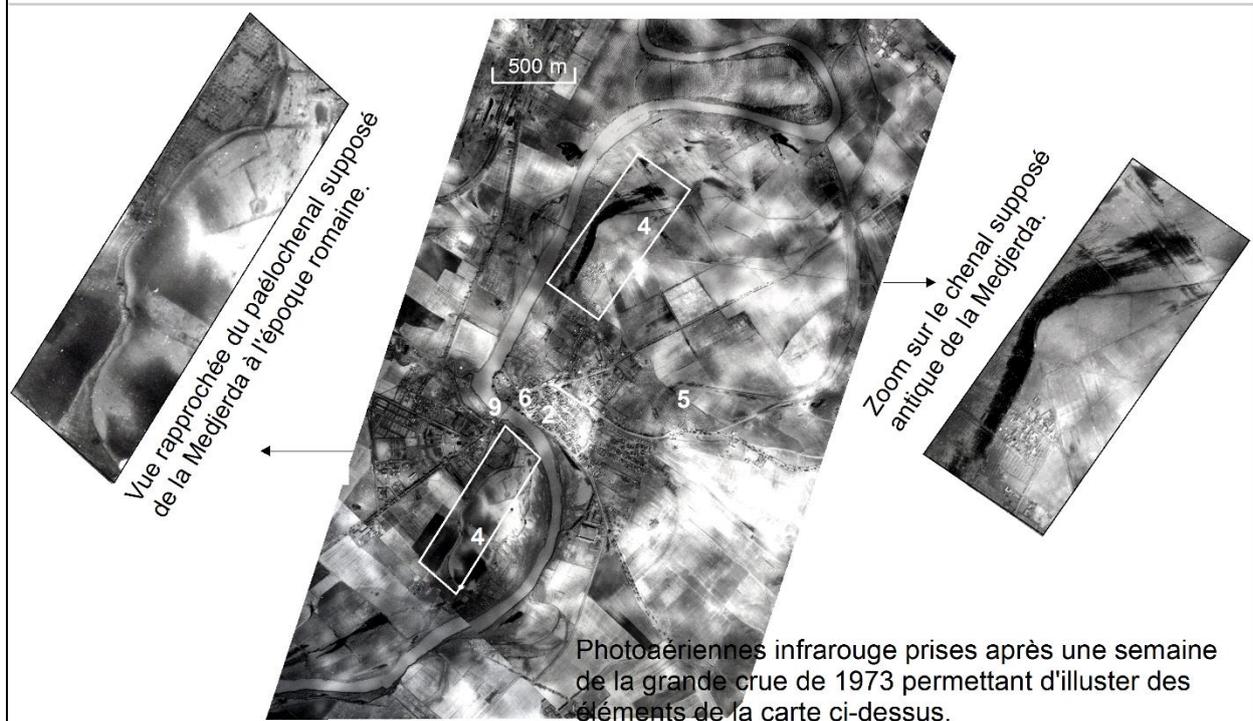


Fig. 47. Essai de restitution de l'état du paysage fluvial de l'ancienne *Membressa* depuis l'Antiquité romaine.

Sur le plan chronologique, les dates de construction et de chute du pont antique de même que celles de changement du tracé fluvial sont encore ignorées. Les traces archéologiques pouvant servir de datation manquent fortement, hormis une inscription gravée en l'honneur de Gratien, Valentinien II et Théodose vue par Peyssonnel et Shaw, entre 1720 et 1732, sur la frise de la porte monumentale (fig. 48). Elle ne mentionne aucune date mais, par analogie avec d'autres inscriptions comme celle du pont d'*Aelius* sur le fleuve de Tibre à Rome (Lamoine et Cébeillac-Gervasoni, 2007, p. 26), elle aurait été rédigée sous le règne conjoint des trois empereurs, entre 379 et 383 apr. J.-C. À cette époque, que commémore-t-elle au juste : des travaux de restauration et d'entretien sur le pont monumental ou bien sur la voie impériale en travers de laquelle se dressait la porte ? La première hypothèse paraît plus plausible car ces opérations publiques étaient en vogue à Rome et dans ses provinces pendant le Bas-Empire et l'Antiquité tardive. Elles étaient exécutées surtout dans le souci de maintenir le ravitaillement annonaire de la capitale de l'empire d'une part, et de montrer la puissance et la générosité impériales d'autre part (Lamoine et Cébeillac-Gervasoni, 2007, p. 23, 26 et 28). Le pont de *Membressa* aurait vraisemblablement subi des actions de réparation comme ce fut aussi le cas de celui de Chemtou au cours de la même période, probablement à la suite d'inondations catastrophiques. Il semble donc qu'il était fonctionnel tout au long du IV^e siècle si l'on tient compte encore d'un autre indice épigraphique portant sur la localisation d'*Abitina*, aujourd'hui Hinchir El-B'harine, situé à 4 km au sud-ouest de la ville de Mjez El-Beb. Du fait de son statut de colonie acquis en 304, de son grand site d'occupation et de sa position sur la voie romaine de Carthage à *Theveste* (Beschaouch, 1976, p. 266), la cité des célèbres martyrs africains aurait été normalement en communication avec la capitale provinciale via *Membressa* ; ce qui pousse à croire à l'existence du pont au début du IV^e siècle. Combien de temps est-il resté en service ? Quand a-t-il cédé ? La réponse à ces questions n'est pas si simple en raison du silence des textes à partir du V^e siècle. Seulement deux renseignements, d'inégale précision il est vrai, ont été trouvés dans les sources historiques remontant respectivement au VI^e et IX^e siècles. La première information est fournie par Procope de Césarée (500-565 ?), témoin de la bataille engagée entre le général Bélisaire, chef des armées byzantines, et son adversaire Stotzas, chef des rebelles, en 536. D'après l'historien, les deux troupes, constituées de 10 000 soldats environ, se sont affrontées au voisinage de la cité de *Membressa*, qui était évitée « car elle se trouvait dépourvue de remparts » (Procope, 1990, p. 169). Ce comportement d'évitement laisse deviner que la cité, à l'époque, était devenue moins attirante et probablement qu'elle n'était

pas équipée de son pont-route dont le rôle est certain en cas de guerre. L'hypothèse de la destruction de ce dernier semble confortée par ce qui s'est passé à Chemtou, vu précédemment, avec la ruine du pont de Trajan et surtout l'installation du moulin à eau au VI^e-VII^e siècle. La deuxième information se trouve dans le recueil de notices biographiques des « Classes des savants de l'Ifriqiya et de Tunisie », écrit en arabe par Abū-l-'Arab (864-873/944). Elle concerne le personnage de 'Abd al-Melik ibn Abi Karīma qui a vécu avant l'auteur d'environ cinquante ans (... ?/819-820). Dans la notice qui lui a été réservée, il y a un passage intéressant pour notre propos et déjà utilisé par d'autres chercheurs au sujet de l'enquête toponymique notamment (Beschaouch, 1986, p. 536 ; Dridi, 2008, p. 157 ; Trabelsi, 2008, p. 57 ; Fehri, 2018, p. 78 et 80). En voici la traduction : « Nos maîtres à Membressa nous ont appris que 'Abd al-Melik ibn Abi Karīma arrivait à dos de mule jusqu'à l'oued Bağrada. S'il ne voyait personne, il l'engageait dans une eau profonde, à l'écart du gué. Et s'il voyait les gens, il traversait l'oued en empruntant le gué » (Abū-l-'Arab, 1985, p. 216). Il faut préciser que ce discours appartient au genre de la littérature hagiographique (manaqib), et que le personnage cité revêt un caractère sacré « Walī Ṣāliḥ » dont le don des miracles qu'il possède est censé être caché, ce qui explique de telles actions étranges. Quoi qu'il en soit, ce témoignage est très précieux car il révèle l'existence d'un passage à gué « *al-Majāz* » dans le lit, entre la deuxième moitié du XIII^e siècle et le début du IX^e siècle. Il autorise donc à penser que le monument romain avait déjà disparu à cette époque, comme l'indique aussi le non emploi des mots *Djisser* ou *Ḳanṭara* c'est-à-dire pont. Dans son essai d'interprétation du même témoignage, Fehri (2018) admet « *qu'au début du IX^e siècle au plus tard, le pont antique était déjà ruiné et réduit à un simple gué qui ne serait autre que ses vestiges* ». Mais cette vision de cause à effet nous paraît peu convaincante car nombreux sont les passages à gué sur la Medjerda où l'eau était, dans l'Antiquité comme de nos jours (surtout avant l'endiguement des principaux cours d'eau), assez basse et le fond assez ferme. De plus, une mule voire un cheval n'auraient jamais été capables de surmonter les gros fragments de l'édifice écroulé couchés dans le lit fluvial. Une étude fine appuyée sur des travaux de prospection géophysique et de sondage archéologique pourrait aider à trancher certaines des questions qui viennent d'être posées.



1. Emplacement sûr de l'ancienne porte monumentale
2. Emplacement supposé du pont romain
3. Direction de l'Hydraulique Urbaine (D.H.U)
4. Siège de la Municipalité
5. Pont mouradite moderne en service
6. Cicatrice de l'ancien chenal de la Medjerda
7. Lit actuel de la Medjerda



Fig. 48. Localisation de quelques éléments du paysage fluvial de *Membressa*, l'actuelle Mjez El- Beb.

Conclusion du chapitre V

Depuis l'Antiquité romaine, le travail des eaux fluviales a souvent conduit à la formation de deux terrasses alluviales dont celle supérieure, dégagée en nappe épaisse et étendue, est omniprésente. Les dépôts fluviaux sont majoritairement fins surtout dans l'axe principal de la Medjerda, compte tenu de l'étendue du bassin-versant, de la faiblesse des pentes et de la friabilité des roches sédimentaires. Outre la caractérisation géomorphologique des formations alluviales, ce travail permet de déduire que le niveau topographique sur lequel se sont installés les anciens était de 2 à 6 m plus bas que l'actuel. La section des vallées était plus large que celle d'aujourd'hui alors que le tracé fluvial était moins sinueux. Une importante phase d'alluvionnement semble avoir été déclenchée à l'Antiquité tardive au point d'enfouir des constructions humaines qui se retrouvent aujourd'hui dans les entailles des berges le long des oueds. Cela renvoie à la variabilité de la dynamique fluviale et ses relations avec le risque fluvial à l'époque de nos ancêtres.

Troisième partie

Morphodynamique actuelle et risque fluvial : approche géomatique et de terrain

**Chapitre VI. Des modifications parfois importantes dans le dessin des
tracés fluviaux**

**Chapitre VII. Dynamiques érosives et sédimentaires actuelle et
vulnérabilité des vestiges archéologiques face aux aléas
naturels et humains**

Introduction

La dynamique fluviale se manifeste par divers phénomènes tels que les changements de tracé des chenaux, les recoupements de méandre, les incisions de talweg, les atterrissements et les élargissements ou les contractions de bande active. Ces phénomènes fluviaux font partie du fonctionnement « normal » d'un cours d'eau (Amoros et Bravard, 1985, p. 354). Mais leur intensité est commandée par des forçages environnementaux et anthropiques (Arnaud-Fassetta et Fort, 2004, p. 145 ; Lespez, 2007, p. 49 ; Carcaud, 2016, p. 211). Les facteurs humains, plus ressentis ces derniers-temps, sont associés à de nouveaux modes d'occupation et d'utilisation du sol liés au développement des activités des sociétés actuelles. L'accentuation de l'emprise humaine sur le milieu fluvial s'est amorcée dès la Révolution industrielle, précisément à partir des années 1800 (Steffen *et al.*, 2011, p. 842). Au cours de cette période qui est désignée par le concept d'anthropocène, l'hydrosystème fluvial est plutôt perçu comme un anthroposystème (Crutzen, 2002, p. 1 ; Levêque *et al.*, 2003 ; Steffen *et al.*, 2011, p. 843 ; Carcaud, 2016, p. 211). Ce dernier correspond à un système interactif qui intègre, au sein de l'espace fluvial, les dimensions sociales et environnementales (Levêque *et al.*, 2003, p. 112 ; Burnouf *et al.*, 2009, p. 77). Une interdépendance unit donc ces deux dimensions qui s'imposent dans l'étude des risques fluviaux concernant de nombreuses sociétés riveraines à travers le monde. Dans le contexte tunisien, l'essentiel de la dynamique récente des cours d'eau se produit à l'occasion d'événements hydrologiques majeurs (Poncet, 1970, p. 3 ; Bourgou et Oueslati, 1984, p. 161 ; Paskoff, 1985, p. 112 ; Ben Ouezdou *et al.*, 1990, p. 1381 ; Hamza *et al.*, 1991, p. 28 ; Boujarra et Ktita, 2009, p. 197-198 ; Oueslati, 1999, p. 78-79 ; Zerai, 2006, p. 270 ; Mehdouani, 2014, p. 129). C'est le cas aussi de la moyenne vallée de la Medjerda comme nous allons le voir dans ce chapitre qui tente d'apporter de nouveaux éléments aux travaux déjà publiés (Naoui, 1995, p. 170 à 191 ; Oueslati, 2005, p. 149-150 ; Zielhofer *et al.*, 2003, p. 205-206 ; Lahmar, 2005, p. 45-95 ; Romdhan, 2005, p. 49-75 ; Mjejri, 2006, p. 83-91 ; Fehri, 2018, p. 82-90). Le présent essai précise la nature et l'intensité de l'activité géodynamique fluviale actuelle et récente tout autant qu'il cherche à comprendre la part des facteurs naturels et anthropiques dans les mécanismes fluviaux. L'objectif final est de donner une vision diachronique et imagée de l'évolution du paysage fluvial de la Medjerda au cours des trois derniers siècles (fin du XIX^e - début du XXI^e siècle). Le recours aux technologies géomatiques étayées par des observations de terrain s'avère alors un moyen pertinent à privilégier pour la cartographie d'une telle évolution.

Chapitre VI. Des modifications parfois importantes dans le dessin des tracés fluviaux

VI.1. Changements de tracé des cours d'eau

Le changement fluvial se traduit par des traces d'anciens chenaux et méandres abandonnés dans le lit principal et ses abords. Il constitue un indice de première importance pour l'appréciation de l'intensité de l'activité géodynamique. Deux processus sont à l'origine de la mobilité fluviale : la divagation et la défluviation (*avulsion*).

VI.1.1. Divagations

Le processus de divagation consiste en un « *déplacement répété du chenal d'un cours d'eau dû au travail même de ses eaux* » (George et Verger, 2004, p.131). Il se produit aussi bien au fond du lit moyen ou bande active (divagation interne) que dans le lit majeur ou plaine alluviale (divagation externe ; Pardé, 1954, p. 33 ; George, 1970 ; p. 147). Dans la première situation, les courants de crue donnent naissance à un réseau de bras et filets d'eau permettant au chenal principal de changer sa position. Dans la deuxième situation, lorsque la cote de débordement est dépassée, l'eau envahit les pentes environnantes où les marques de submersion temporaire sont aujourd'hui indiquées par des talus d'érosion. En pratique, ce fait d'instabilité fluviale, souvent remarquable sur le terrain, peut être encore mieux révélé par une approche diachronique informatisée. Celle proposée pour le cas de l'oued Medjerda s'appuie sur une comparaison des tracés des talwegs étalée sur 88 ans en moyenne. Elle concerne les deux tronçons fluviaux situés en amont et à l'aval de la retenue du barrage de Sidi-Selem, qui occupe le tronçon médian (50 km) naturellement non pris en compte. Parmi les principales tâches techniques réalisées, on mentionne la digitalisation des axes des chenaux, dans *ArcGis*, sur la base des documents cartographiques et satellitaires géoréférencés. Ceux employés pour le linéaire fluvial de l'amont, long de 164 km, sont formés de quatre cartes topographiques au 1/50.000 datant de 1934 environ, et d'une image spatiale Sentinel-2 de 10 m de résolution prise en 2016. Ceux utilisés pour le linéaire de l'aval, long de 90 km, sont constitués de trois fonds topographiques (1/50.000) datant de 1922 et de la même scène satellitaire. La deuxième étape consiste en la création d'un fichier vecteur de

couples de points placés manuellement le long des deux tracés digitalisés pour chaque intervalle de temps afin de déduire les écarts de déplacement. Cette méthode subjective, bien que très consommatrice en temps, nous paraît devoir être retenue parce qu'elle tient compte des particularités du tracé fluvial. Les calculs des distances séparant les points ont été établis par la fonction « *Analysis Tools/Proximity/Near* » du logiciel *ArcGis*. Dans un souci de spatialisation de la mobilité fluviale, les mesures obtenues ont été d'abord discrétisées avec la méthode statistique de *Jenks*, convenable aux données. Cela a permis non seulement de définir les classes de valeurs de déplacement latéral du chenal fluvial mais également de calculer la vitesse de migration annuelle et de présenter l'échelle d'intensité relative. Cette dernière a fait l'objet d'une représentation cartographique avec un buffer de 1 km pour des exigences de lisibilité et visibilité (fig. 49 et 50). Dans le premier secteur étudié (fig. 49), l'analyse diachronique révèle que 80 % des migrations latérales, entre 1934 et 2016, n'excèdent pas 71 m, soit un taux de mobilité latérale inférieur à 0,86 m/an et une intensité relative faible à moyenne. En revanche, 20 % des déplacements sont compris entre 71 m et 719 m ce qui donne un taux de mobilité latérale variant de 0,86 à 8,76 m/an avec une activité fluviale classée forte à très forte. L'instabilité des lits est plus importante dans les zones de confluence d'oueds, comme celles de Chemtou à l'aval de Ghardimaou, ou de Jendouba et de Bou-Selem. Elle atteint des valeurs extrêmes, supérieures à 250 m, au droit des méandres hypertrophiés à traces de recouplement.

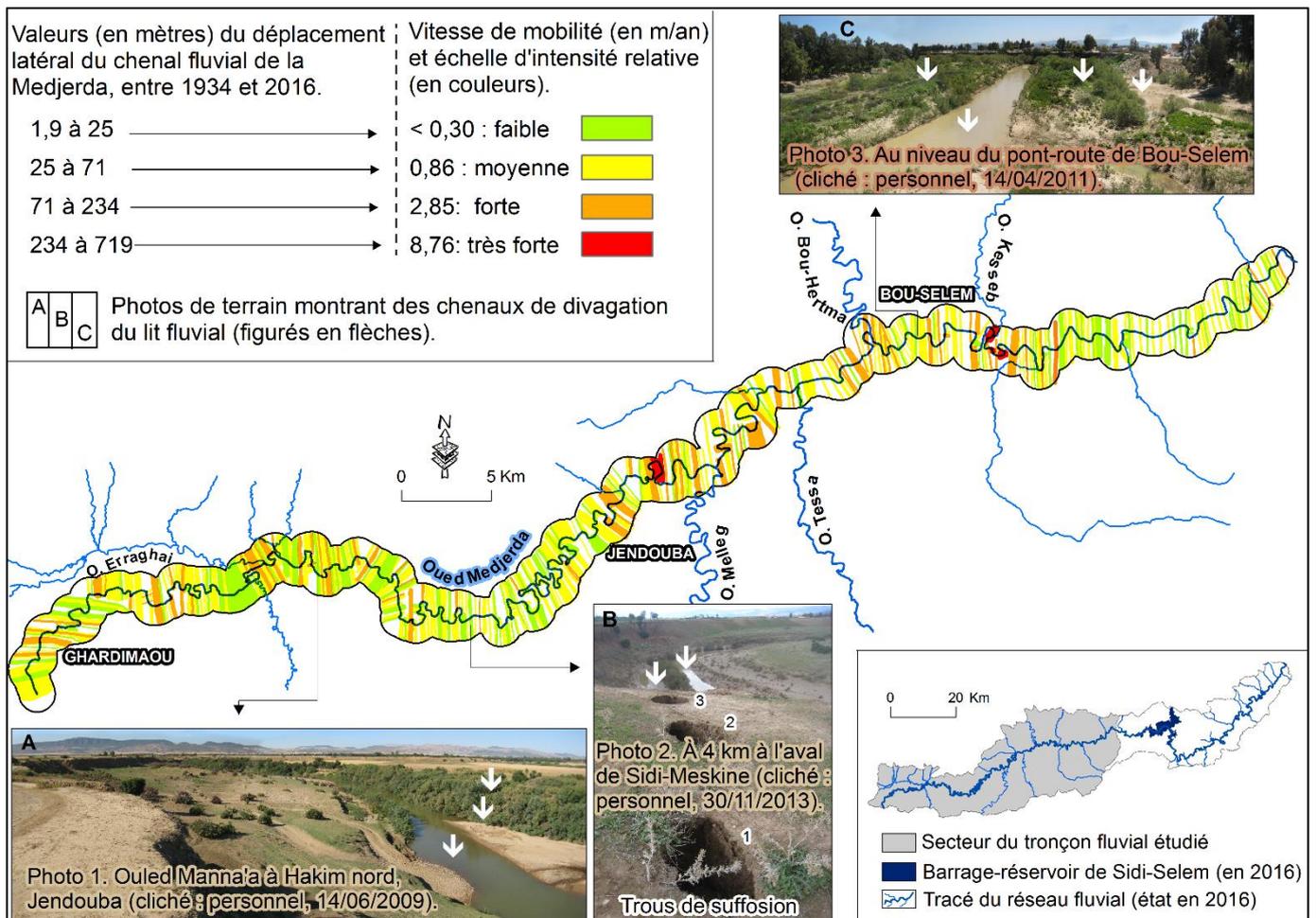


Fig. 49. Spatialisation de la mobilité latérale de l'axe fluvial de l'oued Medjerda à l'amont du barrage-réservoir de Sidi-Selem (entre environ 1934-2016), et appréciation de son intensité.

Dans le deuxième secteur étudié (fig. 50), 74,5 % des distances de migration latérale, entre 1922 et 2016, ne dépassent pas 71 m. L'intensité de l'activité géodynamique est faible à moyenne si bien que le taux de mobilité latérale est inférieur à 0,75 m/an. Celui-ci s'élève à des valeurs fortes à très fortes de l'ordre de 2,48, voire 6,58 m/an au niveau des linéaires fluviaux, marqués par une bande d'errance comprise entre 71 et 619 m et qui ne représentent que 25,5 % du total.

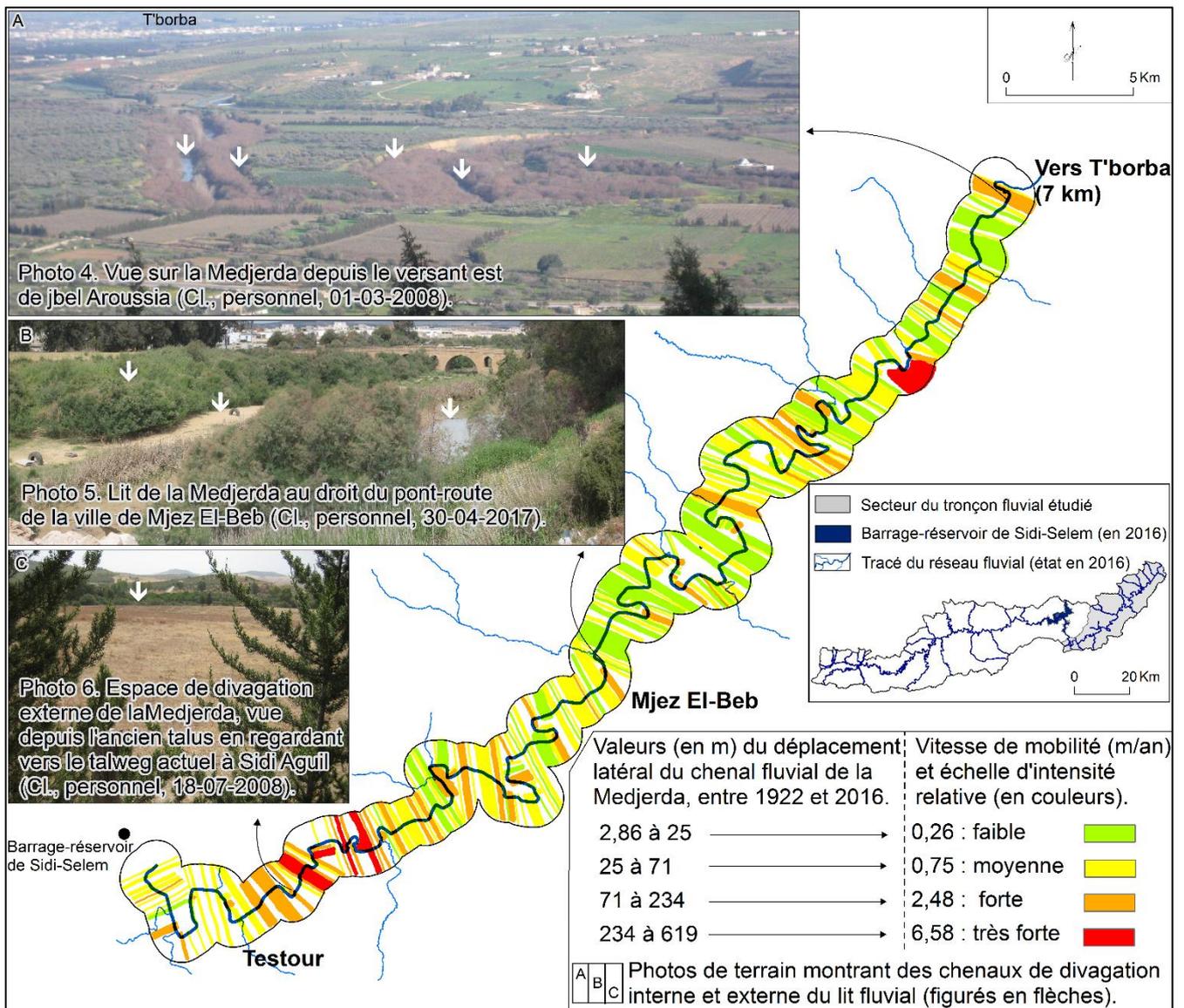


Fig. 50. Spatialisation de la mobilité latérale de l'axe fluvial de l'oued Medjerda à l'aval du barrage-réservoir de Sidi-Selem, entre 1922 et 2016, et appréciation de son intensité.

VI.1.2. Défluviations (*avulsions*)

Le phénomène de défluviations correspond à un changement important, et souvent brutal, de tout ou d'une partie du chenal d'écoulement en faveur d'un nouveau tracé fluvial (Allen, 1965, p.1 ; Jones et Schumm, 1999, p. 171-172 ; Arnaud-Fassetta, 2013, p. 8). Il est caractéristique des cours d'eau en tresses et des torrents mais il peut aussi se produire dans les cours d'eau à méandres surtout au niveau des confluences et des deltas (Fort *et al.*, 2001, p. 49 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 103). Dans ce dernier cas, il est souvent dû à un relèvement du profil du lit fluvial formidablement gonflé par des eaux très chargées en matériaux lors des grandes

crues. L'eau monte au niveau du plein bord, franchit la levée de berge à travers des brèches ouvertes dans les points bas et s'étale dans la plaine d'inondation. Les flux de débordement s'enfoncent progressivement dans les sédiments déposés et tendent à abandonner le lit primitif. L'oued emprunte alors un nouveau chenal sur des distances de quelques kilomètres (défluviation locale) à plusieurs dizaines de kilomètres (défluviation régionale ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 103). Dans le bassin fluvial moyen de la Medjerda, il y a trois exemples expressifs de défluviations locales qui ont eu lieu en milieu urbain et périurbain (figures 51, 53 et 54).

VI.1.2.1. La défluviation de Mellègue à Jendouba-El Melga

Les traces de cette défluviation sont bien visibles à la surface de la plaine alluviale de Jendouba à l'amont de la confluence des oueds de Medjerda et Mellègue ainsi que sur les différents documents topographiques et photographiques dont le plus ancien date de 1904. La plaine est traversée par un paléochenal abandonné, localement souligné par la ripisylve, qui se maintient grâce à une alimentation minérale fournie par la circulation de l'eau lors des crues (Tricart, 1977, p. 36). Ce paléochenal a une longueur de 13 km et il est distant d'environ 1,5 km du lit primitif (fig. 51). Son point de divergence est situé au sud, à la hauteur de la section en tresses de Mellègue près de la localité d'El-Khdhairiya ; son point de convergence est localisé au nord, au droit de sa paléoconfluence avec le drain principal. Dans ce secteur, les deux principaux organismes fluviaux sont dotés d'un tracé à larges méandres très contournés et à nombreuses traces de recoupement accompagnées d'anciens bras. Ceci témoigne d'une forte activité des eaux courantes et d'une mobilisation importante de la charge de fond, qui se sont produites à l'occasion d'événements exceptionnels dont on ignore lesquels sont responsables de la défluviation de l'ancien oued de Mellègue. Celui-ci se réactive pendant les grandes pluies et devient un vecteur d'inondation dans un espace marqué par un fort étalement périurbain (fig. 51). Le bâti se développe aujourd'hui aux dépens des sections de l'oued où certains tronçons sont masqués par les constructions et ne sont reconnaissables qu'en période d'inondation. Les eaux de débordement boueuses envahissent les habitations et demeurent par endroits étalées durant plusieurs dizaines de jours, rompant ainsi l'ordre social (fig. 52). Elles mettent parfois en danger la vie de la population comme ce fut le cas en octobre 1947 avec la mort de 15 personnes (*La Dépêche Tunisienne*, 12-10-1947).

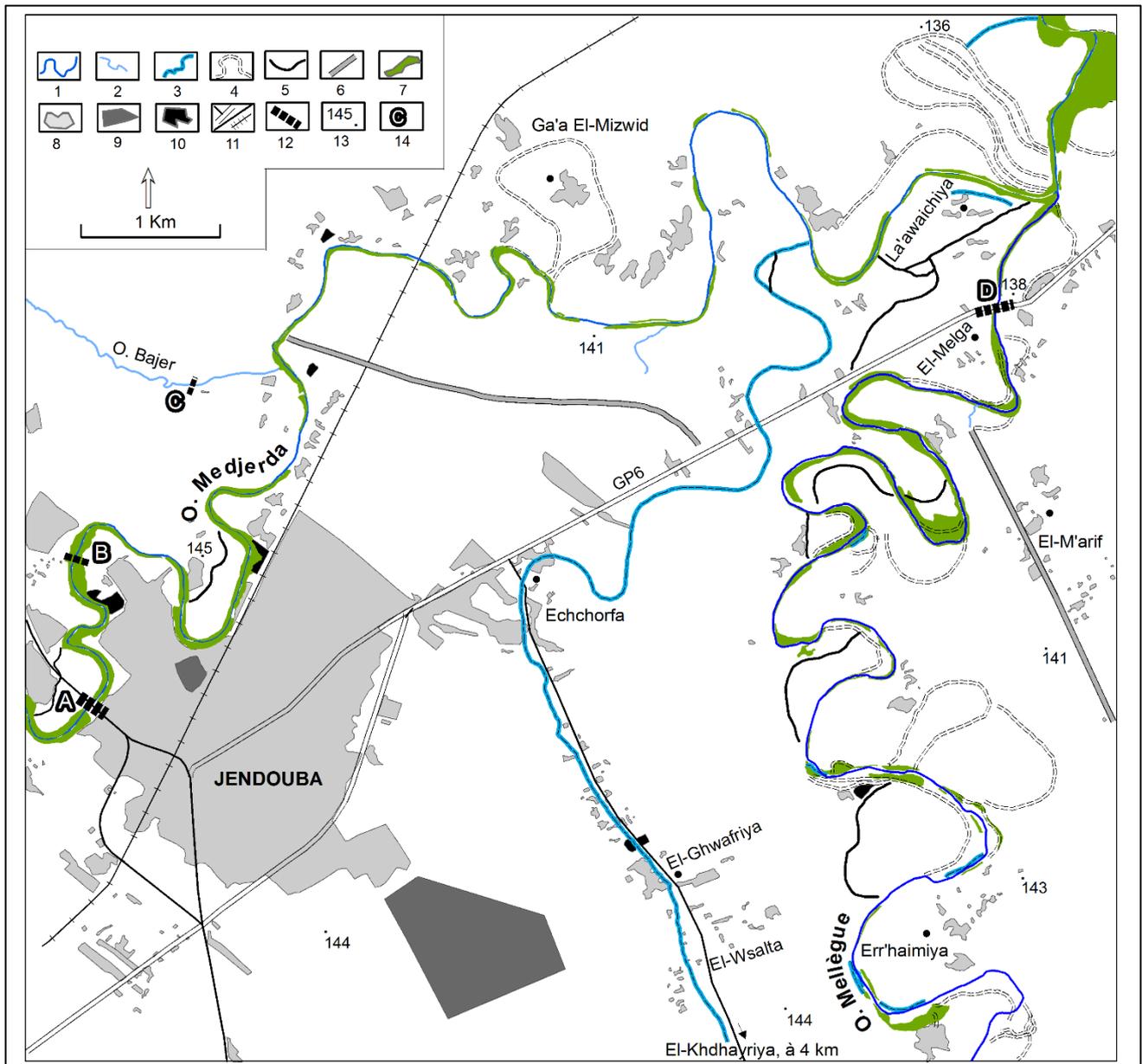


Fig. 51. Carte morphodynamique du secteur de Jendouba-El Melga et exemple de défluviation.

1. Cours actuel de l'oued Medjerda et de l'oued Mellègue (tracés réalisés à partir des photos satellites de Google Earth, 2011-2013) 2. Affluent ; 3. Paléochenal ; 4. Paléoméandre et sinuosité ; 5. Bras récent de chute de méandre ; 6. Voie d'eau aménagée (celle au nord de la route GP6 est établie en 2011 pour l'évacuation des eaux d'inondation ; 7. Corridor fluvial en 2016 ; 8. Espace bâti ; 9. Ancien aéroport occupé par une caserne ; 10. Cimetière ; 11. Route et chemin de fer ; 12. Pont-route et radier ; 13. Cote d'altitude ; 14. Photo d'illustration.



Photo 7. L'oued Medjerda, de 11 m de profondeur, à son comble au droit du pont-route de Jendouba (Cl., personnel, 23/02/2012).



Photo 8. Le pont d'El-Gantra El-Ka'hla à Zghaddiya hors service lors des crues (Cl., personnel, 14/04/2009).



Photo 9. Route barrée au niveau de l'oued Bajer (Cl., personnel, 01/03/2015).



Photo 10. La route GP6 coupée à El Melga-El M'arif (Cl., personnel, 23/02/2015).

Fig. 52. Des formes de perturbation sociétales : isolement des groupes sociaux et suspension des activités quotidiennes.

VI.1.2.2. La défluviation de la Medjerda à Bou-Selem

Le paléotracé résultant de la défluviation de l'oued Medjerda à Bou-Selem figure sur la plupart des cartes topographiques à moyenne échelle depuis 1905. Il ressort encore mieux sur le modèle numérique de terrain à haute résolution, établi à l'aide d'un

semis de points d'altitudes positionnés par GPS (fig. 53). Ce paléochenal abandonné prend naissance à la confluence de l'oued Medjerda avec l'oued Bou-Hertma, et parcourt 6 km selon un tracé méandrique avant de rejoindre le collecteur principal au lieu-dit El-Berdaa. Il se trouve éloigné de 984 m en moyenne de ce dernier, l'écart s'élève à 1150 m dans la partie supérieure ou aire de divergence exploitée aujourd'hui comme bassin d'écrêtement des eaux d'une superficie de 15 ha. À 1 km en aval de cet ouvrage, la section de l'ancien chenal est transformée en canal bétonné à ciel ouvert et laissée en terre battue près de la zone de convergence (fig. 53. A). Pendant les crues, elle se remplit d'eau et devient une menace sérieuse pour les riverains installés sur les bords et aux dépens du fond du lit (fig. 53. B). Par ailleurs, la date de défluviation est encore inconnue mais elle serait peut-être produite à l'Antiquité tardive, compte tenu des changements importants des lits fluviaux à cette époque comme ce fut le cas de Chemtou et de Mjez El-Beb.

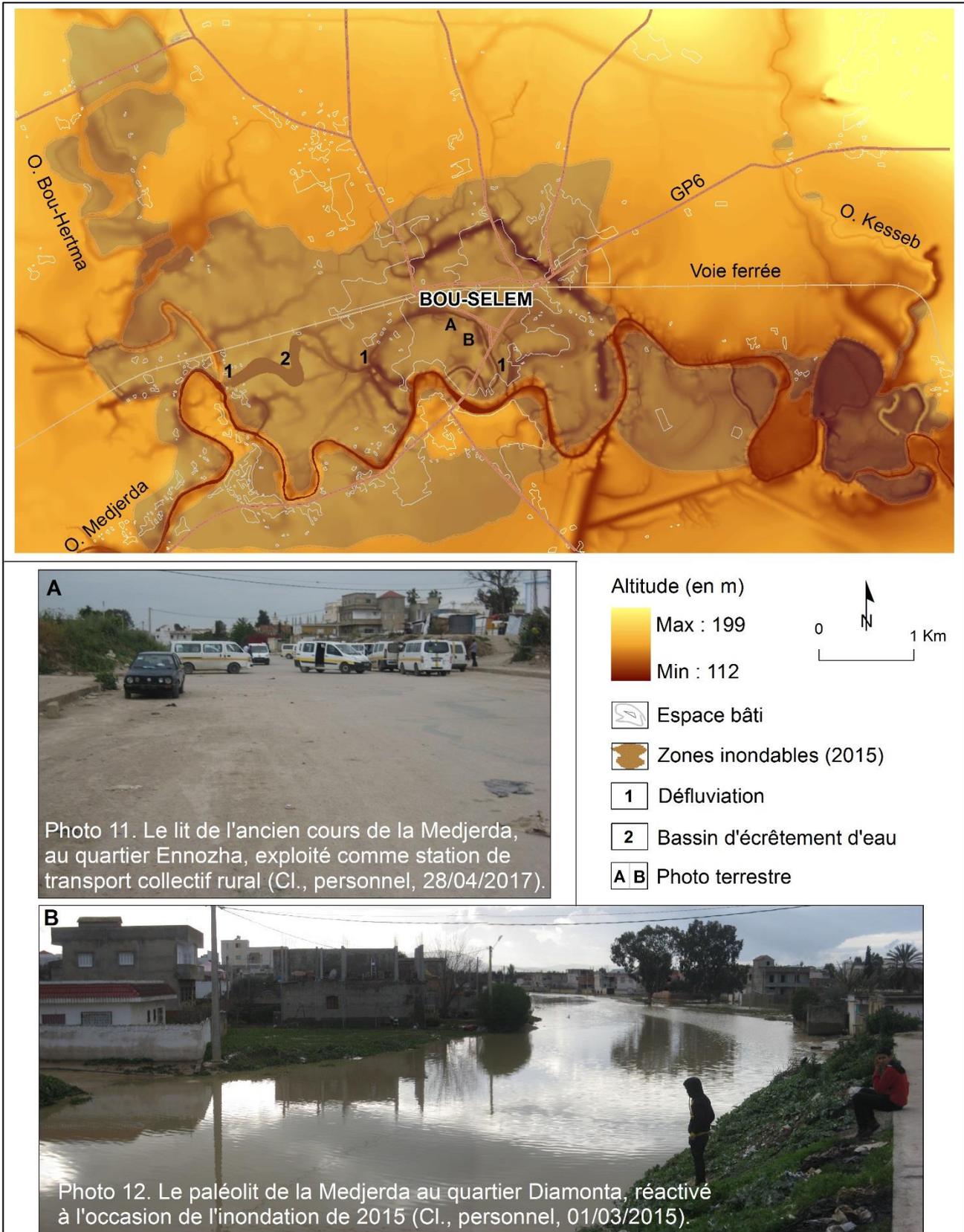


Fig. 53. Emprise de l'inondation de 2015 dans l'espace de divagation de l'oued Medjerda, à la ville fortement urbanisée de Bou-Selem.

VI.1.2.3. La défluviation de la Medjerda à Mjez El-Beb

C'est la défluviation la plus importante de l'oued Medjerda à Mjez-El Beb, qui décrit ici un paysage de méandres très contournés parfois de type composé. Elle appartient à un espace fluvial de forte mobilité attestée par de nombreux restes de paléochenaux. La bande d'errance mesure en moyenne 1,2 km pour un linéaire fluvial de 27 km de longueur. Le processus d'avulsion s'est traduit par l'abandon d'un tronçon fluvial, de 8 km de long, à l'extrémité sud de l'agglomération. Le chenal abandonné n'est pas représenté sur les différentes éditions de cartes et plans topographiques. Il n'est pas non plus signalé dans les travaux précédents, pourtant il est bien apparent sur les photographiques aériennes depuis 1948. Son point de divergence est situé à quelques 500 m de la cité d'El-B'harine alors que son point de convergence est placé en face de la boucle de méandre du village de Grich El-Wed. Aujourd'hui, à la traversée de la ville, la section du paléochenal est totalement engloutie sous le béton (fig. 54). À l'occasion des inondations, des situations délicates se produisent provoquant des atteintes aux biens des personnes et aux terres agricoles (fig. 55, photos 13, 14 et 15).

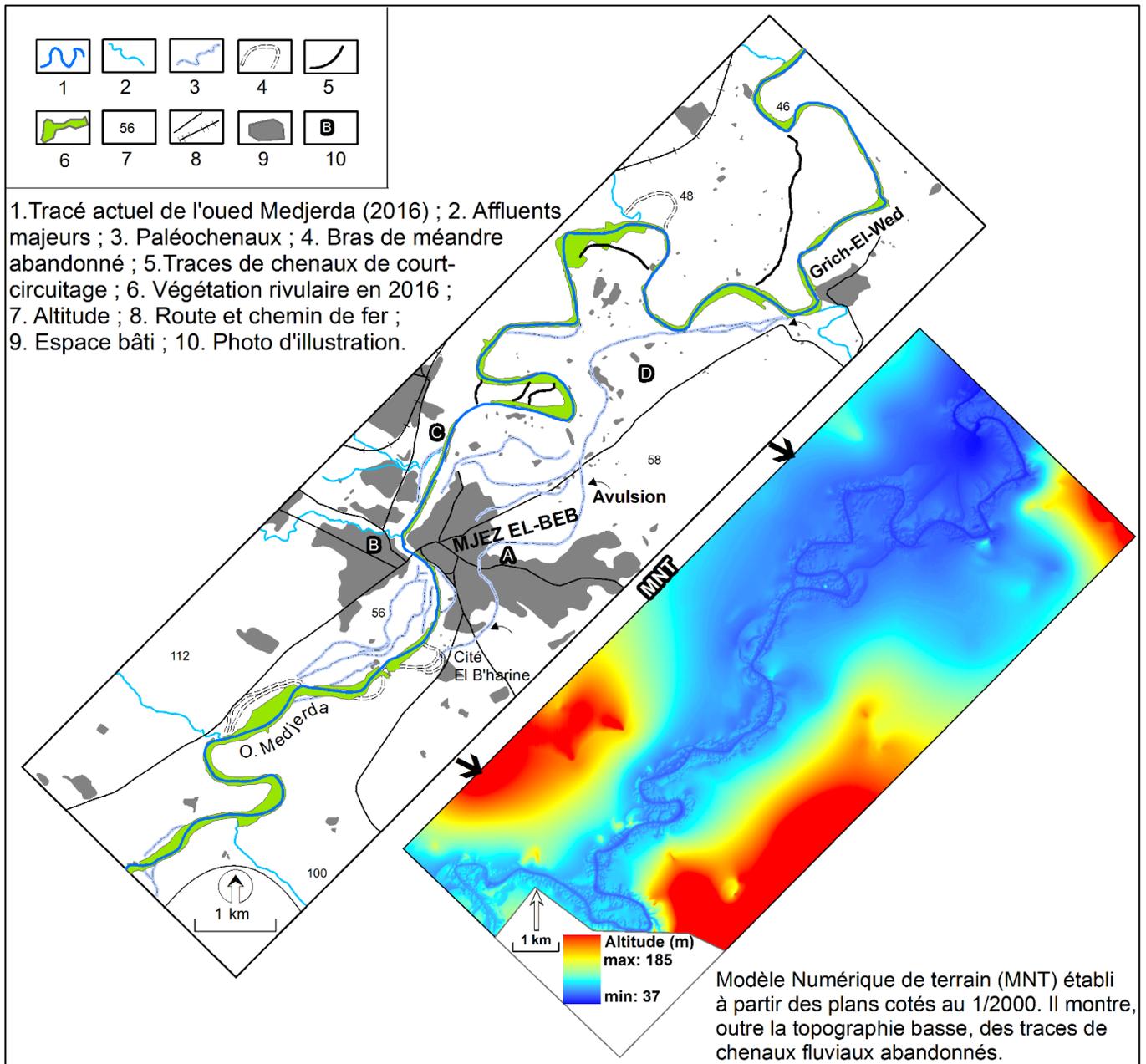


Fig. 54. Carte hydromorphodynamique de la région de Mjez El-Beb, et exemple de défluviation.



Fig. 55. Illustrations montrant l'état de l'espace fluvial de l'agglomération de Mjez El-Beb lors des crues.

VI.2. Recoupements de méandre

Le phénomène de recoupement est considéré comme une réponse à une sinuosité excessive qui ne permet plus une mobilisation suffisante de la charge de fond. L'exagération du méandre, qui augmente la longueur du chenal, diminue la pente donc la puissance fluviale. Le recoupement permet ainsi d'accroître la pente du lit et sa capacité à transporter et à évacuer les matériaux. Il se produit très souvent de

deux manières : par tangence et par débordement (fig. 56). Dans le cas de l'oued Medjerda, tous les exemples de recouplement des sinuosités étudiés sont produites par le deuxième mécanisme.

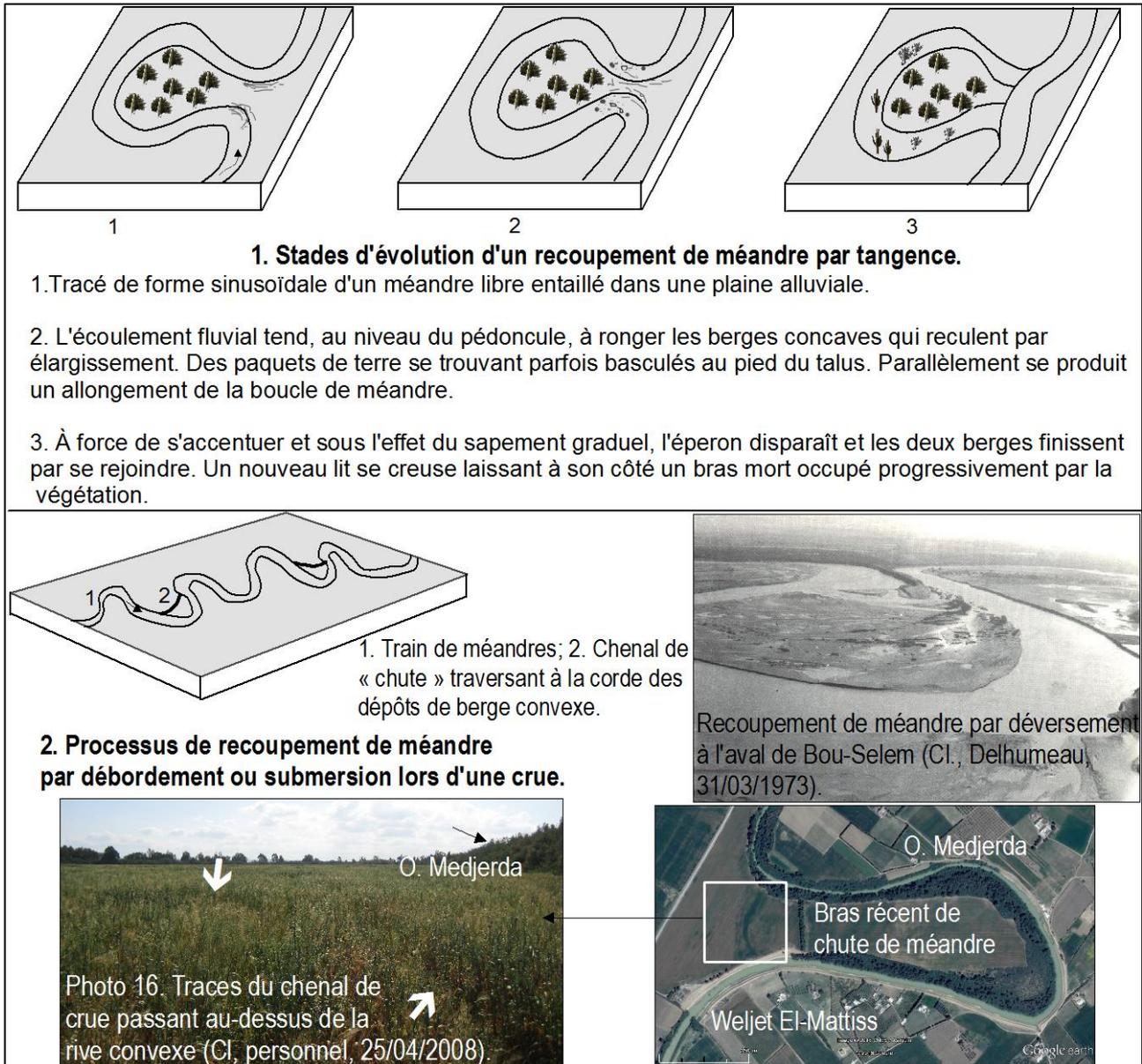


Fig. 56. Schémas et photos montrant les processus de recouplement de méandre dans la moyenne vallée de la Medjerda.

L'étude diachronique des recouplements de méandre s'appuie sur l'observation directe du terrain et l'analyse des paramètres morphométriques. Dans un souci de précision, le calcul de ces paramètres est établi à l'aide du programme *Data logger* de la boîte à outils du logiciel *Arctview* développé dans le cadre du projet NCHRP 24-16 (www.trb.org/Publications/Blurbs/155223.aspx). Ce programme, que nous avons

acheté de l'organisation de *Transportation Research Board of the National Academies* à Washington, sert à calculer certaines variables comme : le rayon de courbure, la longueur d'onde, l'amplitude et la largeur de lit fluvial (fig. 57).

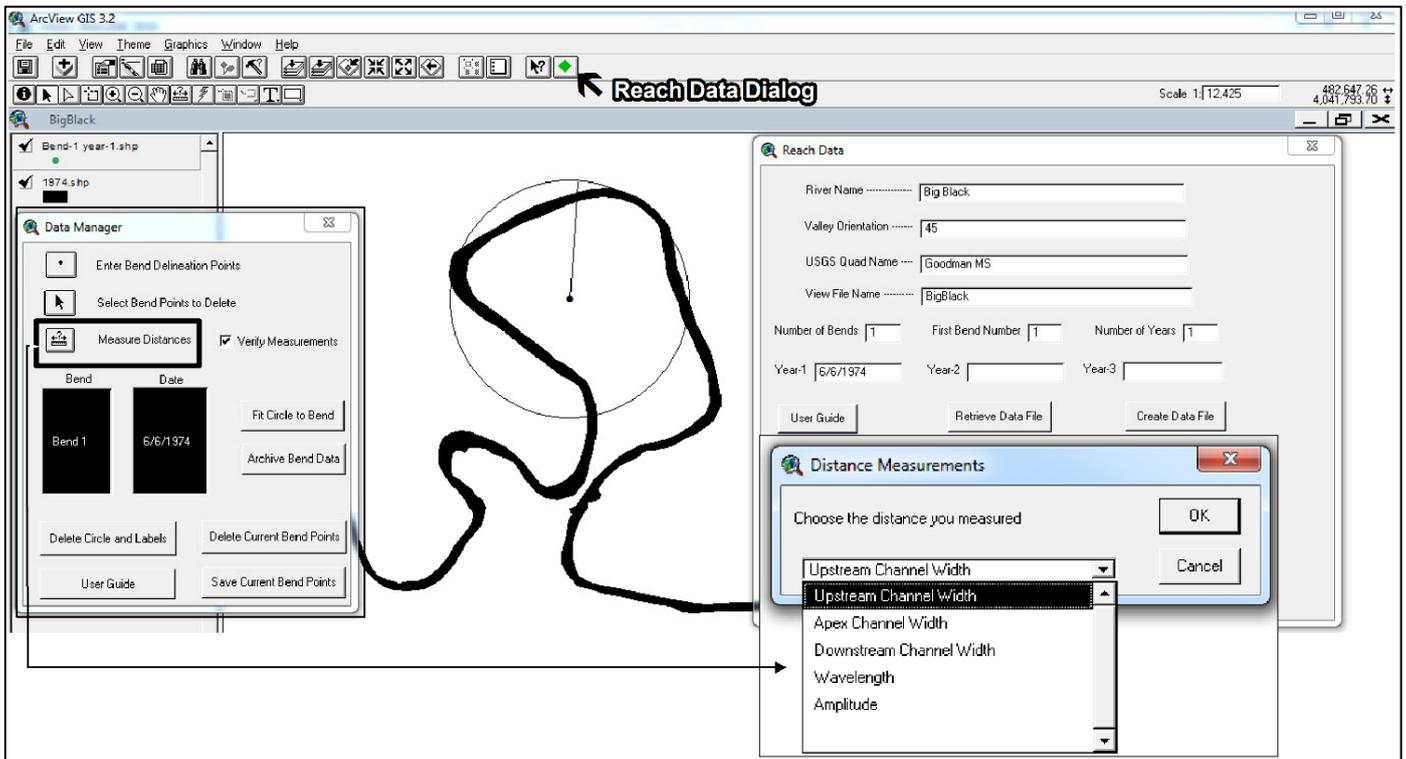


Fig. 57. Interfaces du logiciel ArcView-3.2 et du programme *Reach Data Dialog* utilisés pour l'étude morphométrique des méandres.

VI.2.1. Recoupements par chenal de chute

Il se produit à la fois par resserrement du pédoncule suite à une dynamique érosive des berges concaves et par individualisation d'un bras de raccordement. Voici quatre exemples de recoupement avec des précisions chronologiques sur leur évolution.

VI.2.1.1. Le recoupement du méandre de l'oued Medjerda à Hinchir Eschât ou Ga'a El-Mizoued (Jendouba)

Le méandre recoupé de la Medjerda se trouve à mi-chemin entre la ville de Jendouba et la confluence de cet oued avec celui de Mellègue au lieu-dit Ga'a El Mizoued, qui signifie le fond d'une cornemuse pour faire allusion à un état d'isolement. Le dessin en plan de ce double méandre, précisément, présente un tracé très contourné dont la forme évoque celle d'un oméga (fig. 58). Le coefficient de sinuosité calculé est fort

voire très fort si bien qu'il atteint 1,78 et 3,90 respectivement pour le petit et le grand méandre court-circuité (tab. 8). Le recouplement de ce dernier s'est fait d'abord par resserrement du pédoncule suite à une dynamique d'érosion et de dépôt sur les berges conduisant à l'exagération des courbures. La largeur moyenne est passée de 61 m en 1904 à 21 m en 1948 et à 17 m en 1974, soit un amincissement de 1,11 m/an et de 0,15 m/an pendant la première et la deuxième période. Cette lente migration latérale (0,63 m/an) est aussi indiquée par le rapport du rayon de courbure sur la largeur à pleins bords (R_c/W) qui exprime la dynamique probable d'érosion (Bagnold, 1960, p. 135 ; Leopold *et al.*, 1960, p. 118 ; Hickin et Nanson, 1984, p. 1562 ; Thorne, 1997, p. 192). Dans la littérature scientifique, le taux d'érosion maximum est souvent enregistré lorsque R_c/W est compris entre 2 et 3 ce qui se traduit par une translation vers l'aval de la sinuosité (Hickin, 1974, p. 425 ; Thorne, 1991, p. 309 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 71). Dans le cas d'étude, la valeur R_c/W atteint 10,8 ce qui renseigne sur un lit à méandre mature et hypertrophié caractérisé par une faible action fluviale. Ainsi, les deux berges en cours d'érosion ne finissent pas par se rejoindre même quand le recouplement s'est déjà accompli entre septembre 1984 et 1986, probablement sous l'effet de la crue de décembre 1984. Le court-circuitage s'est alors produit suite à l'individualisation d'un chenal de recouplement non pas au niveau de la partie la plus rétrécie du pédoncule mais plutôt à environ 80 m plus bas avec un bras de raccordement long de 125 m. Le chenal abandonné, très incurvé, se réactive lors des grandes crues provoquant l'isolement des habitants comme ce fut le cas par exemple en 2012 (*cf. infra*. Partie 4, Chapitre, 10).

Tab. 8. Calculs des paramètres morphométriques du méandre de la Medjerda à Hinchir Eschât à Jendouba.

Variables	Longueur d'onde (λ)	Longueur du talweg (L)	Coefficient de sinuosité (SI)	Rayon de courbure (R_c)	Largeur à pleins bords (W)	Amplitude (A)	Rapport R_c/W
Grand méandre (1)	1265,6	4939,8	3,90	387,8	36	1382,1	10,8
Petit méandre (2)	577,3	1027,7	1,78	90,4	31	385,6	2,9



Fig. 58. États successifs du recouplement de méandre de Ga'a El-Mizoued à Jendouba.

VI.2.1.2. Le recouplement du méandre de l'oued Tessa à El-Merja

Le méandre court-circuité est observé dans le cours aval de l'oued Tessa à 2 km en amont de sa confluence avec l'oued Medjerda, près de la localité de La'raybiya. Il décrit une boucle remarquable et symétrique par rapport à la direction de l'axe principal d'écoulement (fig. 59). Le calcul de l'indice de sinuosité de même que le rapport du rayon de courbure sur la largeur (R_c/W) donne des valeurs fortes, respectivement 1,89 et 1,88, et révèle une importante activité géodynamique

potentielle (tab. 9). Le travail fluvial se manifeste par le fort allongement de la boucle de méandre et par le recouplement de ce dernier entre 1934 et 1962. Il s'agit d'un recouplement par chute selon le mode g de Brice (Brice, 1978, p. 80) mais dont le chenal de rupture passe encore plus bas, exactement à travers les extrémités du pédoncule. L'apparition de ce chenal est probablement liée aux effets de l'un des événements hydrologiques majeurs survenus entre-temps (crues de 1936, 1940, 1947, 1957, 1959). Aujourd'hui, il se voit isolé par des bouchons alluviaux de son bras de méandre devenu un réceptacle des eaux de débordement (fig. 59).

Tab. 9. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Tessa à Jendouba-Bou Selem.

Variables	Longueur d'onde (λ)	Longueur du talweg (L)	Coefficient de sinuosité (SI)	Rayon de courbure (Rc)	Largeur à pleins bords (W)	Amplitude (A)	Rapport Rc/W
Méandre	995,5	1883,2	1,89	68	36	650,2	1,88

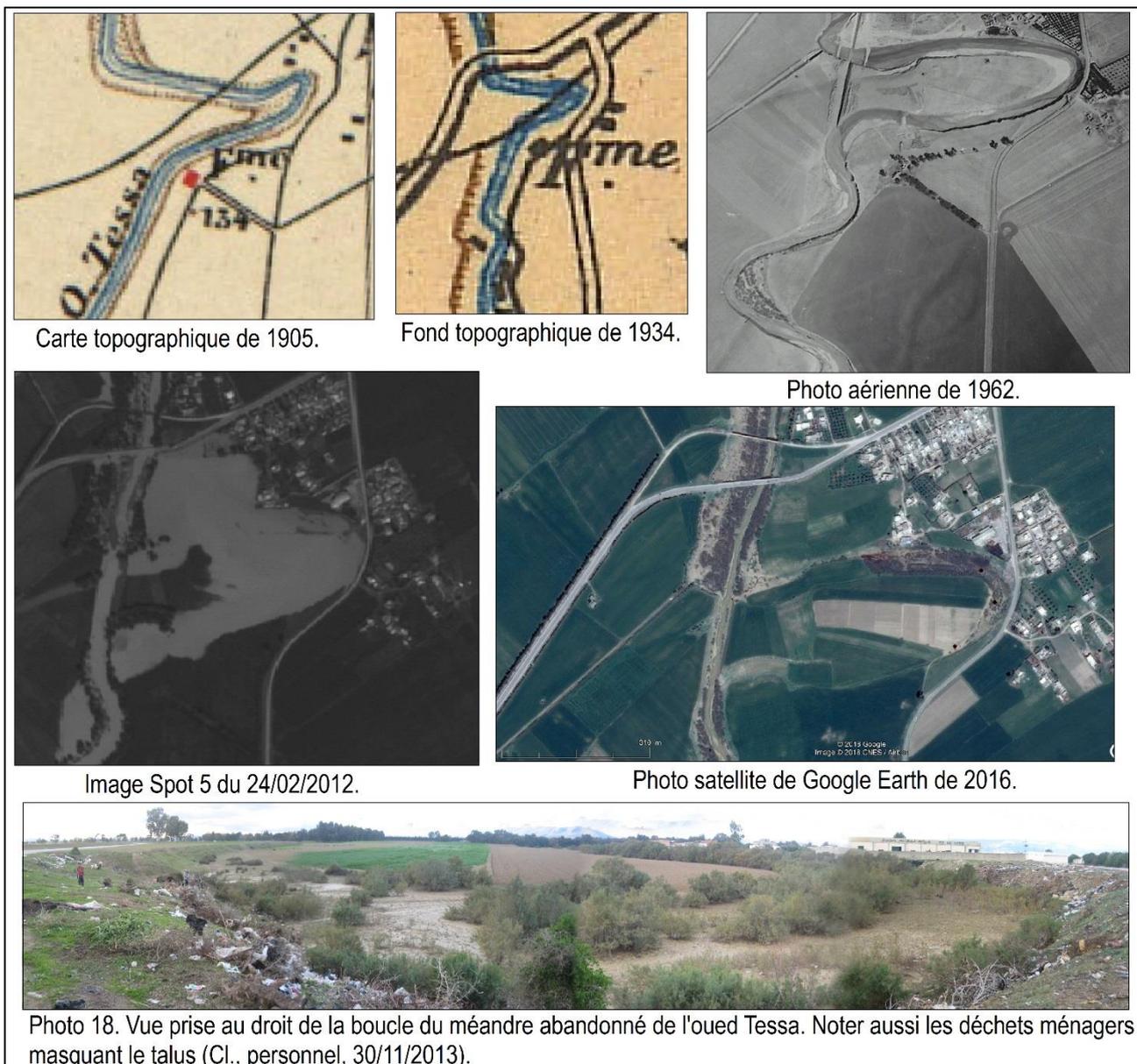


Fig. 59. Recouplement par chute du méandre de l'oued Tessa à Echwalbiya.

VI.2.1.3. Le recouplement du méandre de l'oued Medjerda à Sidi-Ali Jbini

Le méandre recoupé de l'oued Medjerda se situe à la confluence de cet oued avec celui de Kesseb, à environ 4 km à l'aval de l'agglomération de Bou-Selem. Il montre, à la veille du recouplement, une boucle hypertrophiée à forte amplitude (1453 m) avec un lobe plus au moins étranglé à sa base (fig. 60 et tab. 10). L'étude morphométrique de son tracé révèle un très fort coefficient de sinuosité qui est égale à 4,22, dépassant ainsi les valeurs 3 et 4 considérées par certains auteurs comme seuils limites de la

sinuosité naturelle (Brice, 1978, p. 78 ; Schumm, 1985, p. 7 ; Lagasse *et al.*, 2004, p. 8). De même, le rapport du rayon de courbure sur la largeur à pleins bords (R_c/W) est de l'ordre de 3,28 ce qui le place dans l'intervalle entre 2 et 4 où l'activité géodynamique est envisagée comme importante (Thorne, 1991, p. 309). Celle qui concerne le présent cas d'étude est caractérisée par un changement de position du lit, surtout dans la partie amont du lobe de méandre, attesté par la superposition des tracés fluviaux digitalisés sous SIG à partir des documents cartographiques et photographiques de différentes époques. En fait, l'évolution en plan du méandre est placée principalement sous le double mécanisme d'expansion et de translation, lequel provoque la migration vers l'aval des sinuosités (Brice, 1978, p. 80 ; Lagasse *et al.*, 2004, p. 11 et 12 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 80). Mais cette migration n'est pas toujours progressive, à l'exception des dates de 1948, de 1962 et de 1973 (fig. 60). En tout cas, elle n'a pas dépassé la position primitive du chenal tel qu'il est représenté en 1905. L'intensité de la mobilité fluviale varie selon les conditions de la dynamique hydro-sédimentaire du cours d'eau et les processus d'ajustement du profil en long. Elle paraît changée entre 1988 et 1995, période de recoupement du méandre et a conduit au raccourcissement du chenal de près 2 km qui se trouve aujourd'hui loin de 890 m vers le sud du méandre primitif. Le chenal recoupé est ainsi incurvé et isolé par des bouchons alluviaux aux extrémités. Le reste de méandre recoupé est colonisé par une forêt dense de 35 ha de superficie. La persistance du couvert végétal s'explique par le fait que l'ancien chenal continue à recevoir de l'eau minéralement riche lors des crues.

Tab. 10. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Medjerda à Bou-Selem.

Variabes	Longueur d'onde (λ)	Longueur du talweg (L)	Coefficient de sinuosité (SI)	Rayon de courbure (R_c)	Largeur à pleins bords (W)	Amplitude (A)	Rapport R_c/W
Méandre	1195	3923,4	4,22	314,4	72,5	1453	3,28

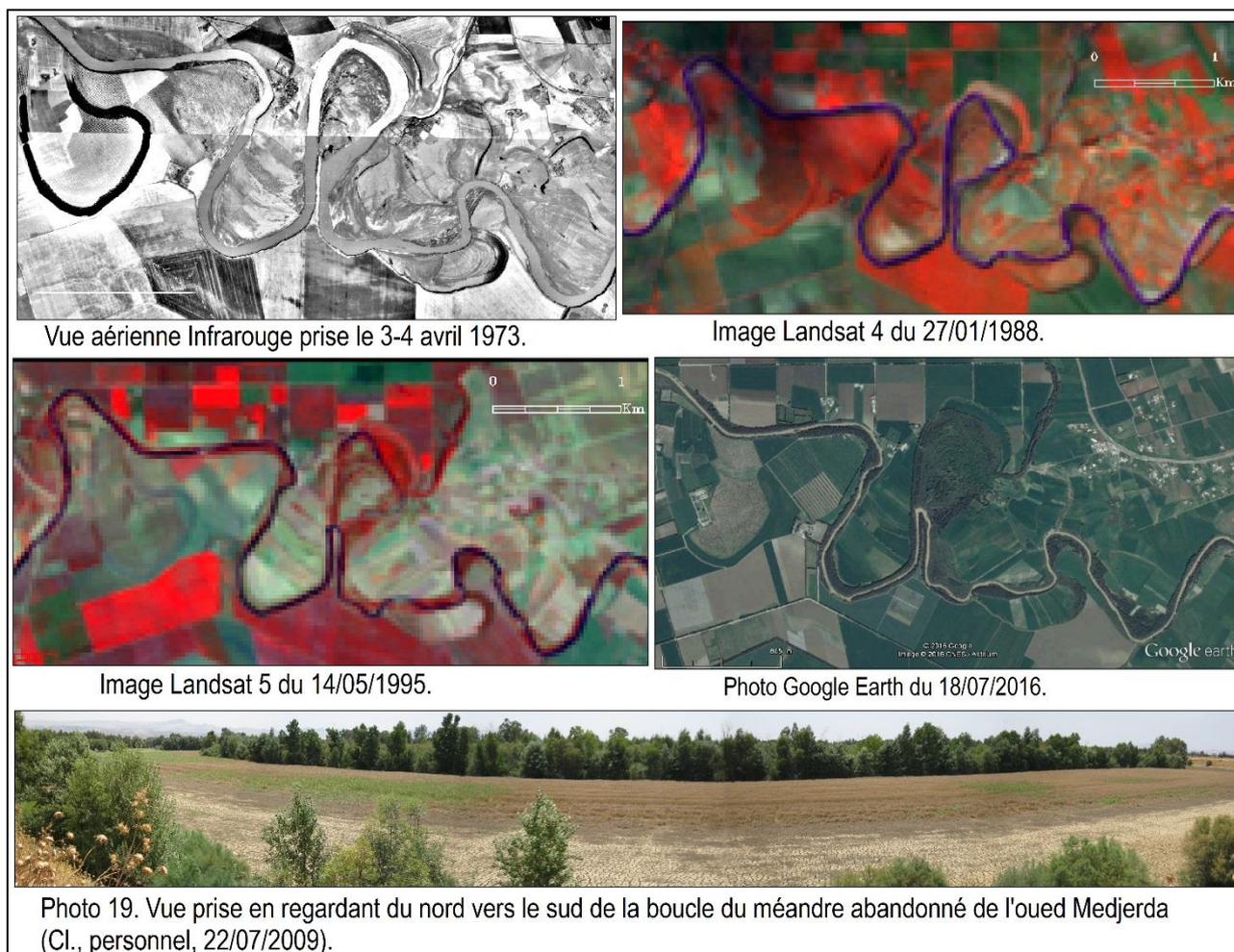


Fig. 60. Vision diachronique de l'évolution du recouplement de méandre à la confluence des oueds Medjerda- Kesseb.

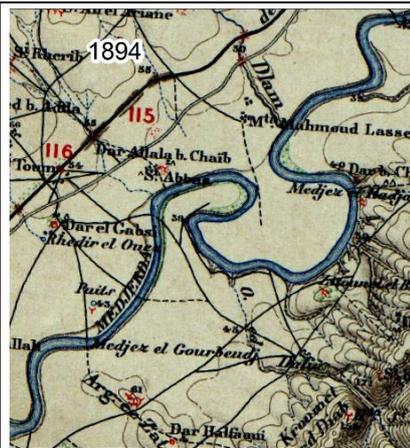
VI.2.1.4. Le recouplement du méandre de l'oued Medjerda à Mjez La'hjar

Localisé à quelques 17 km à l'aval de l'agglomération de Mjez El-Beb, le méandre recoupé de la Medjerda est situé précisément à 2 km à l'est du village de Borj-Ettoumi, au-lieu-dit Mjez La'hjar (fig. 61). Il correspond à un double méandre dont le plus ample à grand rayon de courbure (491,7 m) est largement taillé dans le piémont de jbel Bou Aoukez. Le coefficient de sinuosité calculé pour chacun des deux méandres est très fort, soit respectivement 5,20 et 3,59 (tab. 11). Le rapport du rayon de courbure sur la largeur à pleins bords (R_c/W) est également élevé, soit 6,5 et 3,1, ce qui indique un taux d'érosion faible pour la première sinuosité ($R_c/W > 5$) et fort

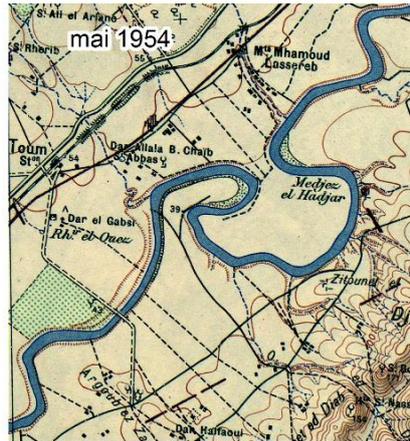
pour la seconde (R_c/W entre 2 et 5) qui montre une allure aigue (Thorne, 1991, p. 309). Le recouplement du méandre principal s'est produit entre le 11 août 1972 et le 7 février 1973, autrement dit avant l'inondation catastrophique de mars 1973. Il semble lié à une modification des conditions de l'écoulement fluvial renforcée par une intervention humaine. Car la comparaison des cartes topographiques de 1894 et de 1954 révèle une multiplication des sentiers de différentes directions passant au sommet des berges. Il paraît que le chemin aménagé au travers les pédoncules du méandre s'est transformé en chenal de chute formant progressivement un méandre de raccourci. L'abandon du bras s'est fait presque selon le mode g proposé par Brice (Brice 1978, p. 80) mais le mécanisme de recouplement semble original. Or, le reste du méandre court-circuité qui s'étend sur 106 ha est aujourd'hui exploité par des agriculteurs. La réactivation de son lit s'opère seulement lors des fortes crues par l'intermédiaire du chenal actif et par des petits bras de défluviation.

Tab. 11. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Medjerda à Mjez La'hjar.

Variabes	Longueur d'onde (λ)	Longueur du talweg (L)	Coefficient de sinuosité (SI)	Rayon de courbure (R_c)	Largeur à pleins bords (W)	Amplitude (A)	Rapport R_c/W
Grand méandre (1)	862,6	4646,1	5,20	491,7	75,6	1254,2	6,5
Petit méandre (2)	858,8	3083,4	3,59	209,4	68	923,4	3,1



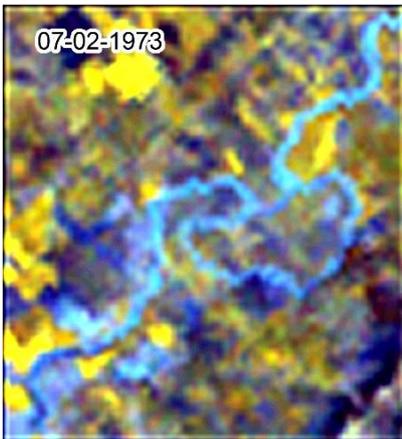
Extrait de la carte archéologique au 1/50 000 de T'borba. Noter la piste passant au sommet de la berge.



Extrait de la carte cadastrale au 1/50 000 de T'borba. Noter la multiplication des pistes sur les berges.



Zoom de Landsat MSS. Le méandre de la Medjerda à la veille du recouplement.



Zoom de Landsat MSS. Le méandre de la Medjerda au lendemain du recouplement.



Extrait de la carte topographique au 1/25 000 de T'borba. Reste du méandre recoupé, de forme d'anse.

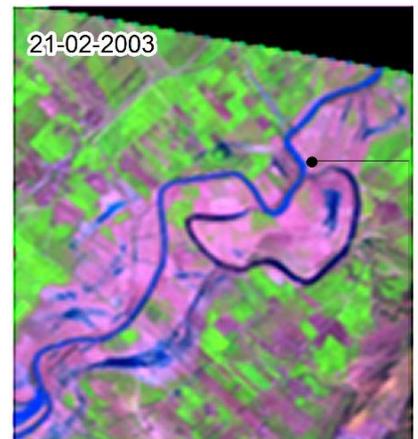


Image Landsat 7. Reste du méandre mis en eau lors des crues de 2003.



Image Sentinel-2 A. Etat actuel du secteur du recouplement de méandre.



Photo 20. Vue prise à la hauteur du lieu de recouplement est du méandre de la Medjerda à Mjez La'Hjar (Cl., personnel, 26/04/2008).

Fig. 61. Stades d'évolution divers du recouplement du méandre de l'oued Medjerda à l'aval de l'agglomération de Mjez El-Beb.

VI.2.2. Recouvrements par débordement ou submersion

Lorsque l'eau déborde sur la plaine alluviale, l'écoulement tend à ignorer les méandres et à suivre l'axe de la vallée. Ainsi, l'eau raccourcit son trajet et passe au-dessus des accumulations de rive convexe. Ce phénomène est très fréquent dans le bassin fluvial de l'oued Medjerda et se produit à chaque grande crue (fig. 62).

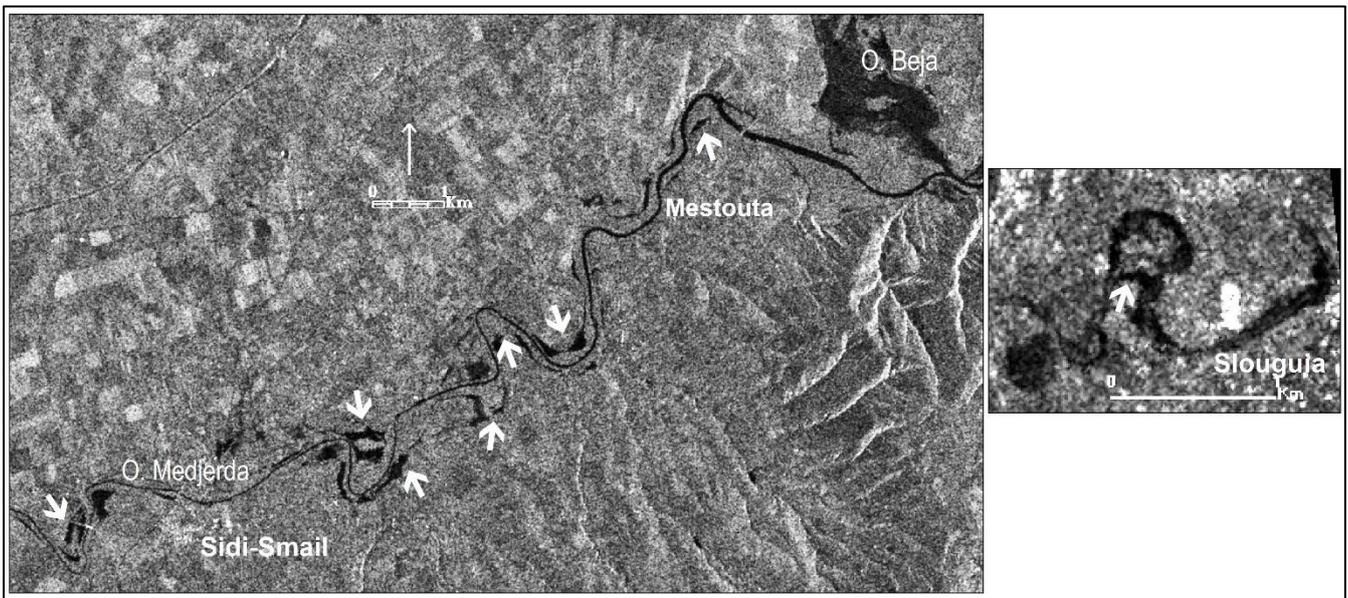


Fig. 62. Image Radar Sentinel 1A, acquise le 26-02-2015, montrant des situations de recouvrement par débordement de l'oued Medjerda à Sidi-Smail, Mestouta et Slouguia).

Conclusion du chapitre VI

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence les divers phénomènes et processus associés qui participent au façonnement de l'environnement fluvial dans le bassin moyen de la Medjerda. Il paraît que l'activité géodynamique est globalement modeste si bien que les cours d'eau ont peu changé leur position à l'époque actuelle et récente. Mais cela n'empêche de noter des divagations et des défluviations considérables dans certains espaces urbains et périurbains. L'analyse comparative et multi-temporelle sous SIG révèle que 77 % en moyenne des migrations latérales survenues entre 1922 et 2016 ne dépassent pas 71 m, soit un taux de déplacement inférieur à 0,86 m/an et une intensité relative classée faible à moyenne. La dynamique d'instabilité est plus remarquable dans les secteurs de confluence d'oueds

et au droit des méandres matures. Elle se caractérise par des taux de mobilité forts à très forts compris entre 2,48 et 8,76 m/an et par des amplitudes d'errance situées en moyenne entre 234 et 669 m. Les chenaux de divagation et de défluviation sont souvent négligés par les riverains qui continuent à exploiter les terres des anciens lits pour de nouvelles constructions. Leur menace n'est reconnaissable qu'au cours des inondations puisqu'ils se transforment en vecteurs de débordement. Le phénomène de recouplement de méandre est une composante principale de la dynamique fluviale de la Medjerda et ses branches. Pour les quatre cas de court-circuitage étudiés, et à l'exception de celui de l'oued Tessa pour lequel les données sont peu serrées, les recouplements sont survenus entre 1972 et 1995 ce qui correspond à la phase post-barrages. La durée de recouplement est courte et va de 6 mois à 7 ans. La vitesse rapide de recouplement des sinuosités ne reflète pas en réalité une activité érosive importante mais plutôt un changement brutal des caractéristiques de l'écoulement lié aux effets de l'endiguement des organismes fluviaux, amorcé dès le milieu des années cinquante.

Chapitre VII. Dynamique érosive et sédimentaire actuelle et vulnérabilité des vestiges archéologiques face aux aléas naturels et humains

Dans la moyenne vallée de la Medjerda, de nombreux tronçons fluviaux sont affectés par des processus érosifs variés et vigoureux lors des crues. Les processus de remblaiement récent sont également importants aussi bien au fond des lits d'oued que dans les plaines d'inondation. Les structures archéologiques qui leur sont associées sont confrontées à ces changements hydrosédimentaires. L'objectif de ce travail est d'examiner, d'abord, le fonctionnement géodynamique de l'hydrosystème fluvial en liaison avec les crues morphogènes et les formes d'utilisation du sol. Il vise à apporter des données chiffrées et précises sur la dynamique érosive et sédimentaire actuelle, à partir d'indicateurs morphométriques et d'éléments de mesure de l'évolution de la géométrie en plan de la plaine alluviale. Il se base sur des observations de terrain, toujours indispensables, ainsi que sur des données multicritères analysées dans un SIG et des documents photographiques anciens et récents étalés sur cent sept ans (1910-2017).

Au-delà de son apport géomorphologique, le travail va révéler l'état des ruines archéologiques affectées par l'incision et l'accumulation fluviale. Il cherche en même temps à retracer leur évolution à travers les âges en se servant des documents textuels et archéologiques anciens et récents obtenus.

VII.1. Processus et manifestations de l'érosion hydrique

L'érosion fluviale ou plus précisément la corrasion fluviale s'exerce à la fois sur le fond, par incision linéaire, et sur les berges par creusement latéral (Baulig, 1970, p. 37). Les manifestations érosives de ce phénomène, dans le bassin fluvial moyen de la Medjerda, sont multiples et parfois préoccupantes. Elles se voient le mieux dans l'axe des principaux organismes hydrographiques. Leur intensité dépend de différentes dynamiques naturelles et interventions humaines et augmente à l'occasion des événements pluvio-hydrologiques majeurs.

VII.1.1. Prédominance des formes d'érosion liées à l'attaque latérale

Ce thème est considéré dans une perspective synchronique et diachronique.

VII.1.1.1. Le sapement latéral des berges : analyse synchronique

L'approche de terrain tient une place centrale dans ce travail axé sur l'examen des lits fluviaux notablement affectés par l'érosion régressive. Elle est susceptible d'aider à mieux comprendre ses mécanismes actifs et de déterminer le poids de ses facteurs. L'action de sapement s'exerce essentiellement sur la berge concave par érosion basale, mise en porte à faux, puis effondrement de pans entiers de la paroi. Sur les sites étudiés, elle se manifeste sous la forme de paquets de sédiments appartenant souvent aux couches supérieures en voie de détachement ou par des fentes parallèles à la surface du sol d'extension métrique à pluri-décamétrique formant des plans de rupture potentielle attendue prochainement. Les illustrations les plus expressives se trouvent sur l'artère principale de la Medjerda traversant les localités de Sidi-Meskine et de Testour ainsi que sur les affluents de l'oued El-Meleh à Chemtou et de l'oued Mellègue à Jendouba (fig. 63 et 64). Elle est révélée ensuite par l'état de certains vestiges d'occupation antique qui apparaissent dans les entailles des oueds tronqués par les eaux courantes alors qu'au départ ils devaient s'en trouver à l'abri, puis par la position critique de multiples rangées d'oliviers surplombant les talwegs ainsi que par le déchaussement de plantations riveraines, enfin par la situation de quelques ouvrages anti-érosifs qui se trouvent au sein du chenal alors qu'ils devaient être collés ou disposés à proximité des berges pour les protéger (fig. 63). De tels indices ne signifient pas pour autant que le phénomène de retrait des berges est très répandu dans la région d'étude mais qu'il est bien marqué localement. Quant à son intensité actuelle, elle paraît globalement modérée. Elle est fonction de deux variables de

contrôle majeures, à savoir le degré de cohésion des berges et le taux du couvert végétal riverain (Brice *et al.*, 1978, p. 67 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 59).



Photo 1. Situation de la première rangée du champ d'oliviers jouxtant la rive droite de l'oued Essoufi à El-Mrassen, devenue presque collée au sommet de la berge (Cl., personnel, 09/04/2011).



Photo 2. Déchaussement des plantations riveraines sous l'effet du retrait de la berge droite du cours aval d'El-Hammem à Werghich (Cl., personnel, 13/06/2009).



Photo 3. Ruines antiques défoncées par les eaux de l'oued Bou-Sbi'a, affluent du cours aval de l'oued Meliz (Cl., personnel, 08/11/2008).



Photo 4. Trois gabions en grillages et pierres sèches hors de service suite à l'élargissement du lit de l'oued Siliana, localisé à 600 m en amont de sa confluence avec l'oued Medjerda (Cl., personnel, 12/01/2014).

Fig. 63. Illustrations des mécanismes d'érosion ravinaire.



Photo 5. Portion de la paroi sur le point de s'effondrer et chaos de matériaux d'anciennes chutes. Vue sur la Medjerda à douar Ouled Ammar, 3.5 km en aval de Ghardimaou (Cl., personnel, 11/08/2008).



Photo 6. Paquet terreux affecté par une fente béante sur la berge droite de l'oued El-Melah, 500 m environ de sa confluence avec l'oued El-Khouitra à Chemtou (Cl., personnel, 31/03/2013).



Photo 7. Fragment de terre en voie de détachement, et fente de retrait en cours de formation. Vue sur la berge droite de la Medjerda à 2 km en aval de Sidi Meskine (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 8. Fentes longitudinales pratiquées au bord du lit de la Medjerda à Ejrijf, 8 km en amont de la ville de Jendouba (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 9. Rupture d'une masse terreuse le long de la berge droite de l'oued Mellègue à El-Melga, 7 km en aval de Jendouba (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 10. Fentes de cisaillement visibles sur la berge droite de l'oued Medjerda, 1,7 km en amont de la ville de Testour (Cl., personnel, 13/01/2014).

Fig. 64. Illustrations des processus actifs de l'érosion ravinaire.

La résistance des berges dépend de la nature pétrographique des sédiments (argiles, limons, sables) qui les composent. Plus les matériaux sont cohérents, plus le recul des parois est moins important (Bravard, 1982, p. 43 ; Thorne, 1997, p. 195). Ceci est attesté dans notre cas par les résultats d'analyses sédimentologiques effectuées sur 45 échantillons de sédiments fluviaux prélevés au droit des boucles de méandre concave. L'étude granulométrique révèle la présence d'un dépôt fin à texture argilo-sableuse à sablo-argileuse (54 % d'argiles, 46 % de sables) de cohésion forte à moyenne. Les courbes cumulatives présentent un faciès hyperbolique caractéristique d'une dynamique de sédimentation calme. Les courbes de fréquences simples sont presque totalement unimodales avec des pics peu marqués (< à 10 %), ce qui renseigne sur un sédiment de bonne maturité et d'un bon classement. Les coefficients d'uniformité de Hazen déduites des courbes granulométriques ($Cu = d_{60}/d_{10}$) sont compris entre 0,57 et 1,65, ce qui indique une granulométrie uniforme. D'un point de vue minéralogique, les diffractogrammes établis montrent des compositions minéralogiques voisines avec prédominance des argiles et secondairement des quartz, des calcites et rarement des gypses (fig. 65). En coupe, les entailles fluviales présentent souvent des séries alluviales à litages et laminations horizontales. Les niveaux au sein desquels l'argile domine montrent généralement une structure organisée en agrégats polyédriques. La taille réduite des agrégats permet une bonne circulation de l'eau qui, jointe aux variations de l'humidité, entraîne des mouvements de gonflement ou de retrait se traduisant par des faces de glissement ou des fissurations (Girard *et al.*, 2011, p. 101 et 171).

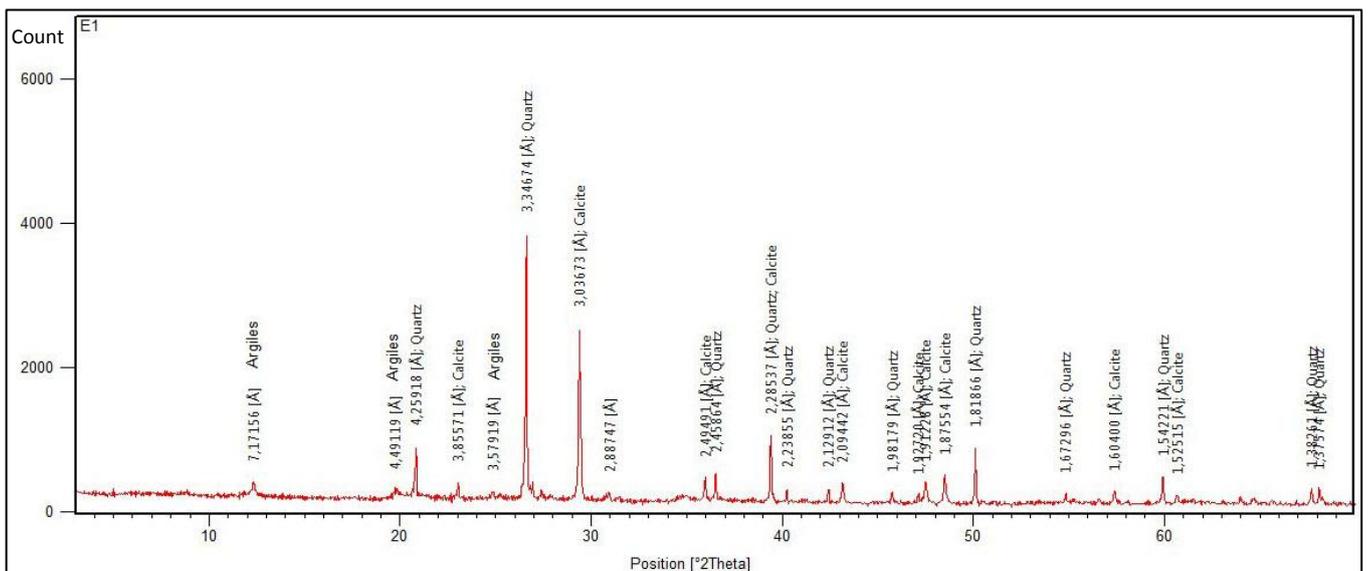


Fig. 65. Diffractogramme aux Rayons X de l'échantillon 1 levé au droit de la berge gauche de l'oued Medjerda, au voisinage du site archéologique de Borj Helal à Hakim nord (x : 468171 ; y : 4036721).

Concernant la deuxième variable de contrôle, elle est liée à la présence ou l'absence de la végétation rivulaire pour laquelle les avis sont partagés. Certains auteurs considèrent que la ripisylve contribue à stabiliser les berges, eu égard à la hauteur des parois, au type du couvert végétal, au développement racinaire et à la densité des arbres (Gilbert, 1914, p. 222 ; Hickin, 1984, p. 123 ; Piégay, 1996, p. 356 ; Thorne *et al.*, 1997, p. 179 ; Simon *et al.*, 2004, p. 2). D'autres auteurs estiment que la présence de la végétation sur les berges est un facteur d'instabilité, compte tenu de la nature de la végétation riveraine (type prairial ou résineux) et de la structure du réseau racinaire (nombre et taille des racines ; Zimmerman *et al.*, 1967, p. 271 ; Murgatroyd et Terman, 1983 ; Petit, 1991, p. 345). Dans la moyenne vallée de la Medjerda, le couvert végétal riverain est généralement bien fourni notamment le long des principaux cours d'eau (fig. 66). D'après nos mesures établies sur le collecteur principal (273 km), il s'étend sur un linéaire de 213,5 km et de 194 km respectivement sur les rives droite et gauche. Ainsi, le taux de recouvrement végétal est de 78,2 % et 71,1%. Il occupe également une superficie totale d'environ 22,7 km² dont 12,9 km² sur la rive droite et 9,8 km² sur la rive gauche. Il est tantôt continu tantôt discontinu, avec un contraste notable entre les deux bords. Or, la largeur moyenne du corridor fluvial est respectivement de 108,5 m et 78,3 m, tandis que la largeur maximum est de l'ordre de 662 m et 800 m (tab. 12).

Tab. 12. Données chiffrées sur la couverture végétale rivulaire de la Medjerda, entre Ghardimaou et barrage Laroussia (obtenues grâce à l'exploitation des photos satellites à haute résolution de Google Earth datant de 2016 environ).

	Longueur du tronçon fluvial (en km)	Longueur du linéaire végétalisé (en km)	Taux de recouvrement végétal (en %)	Superficie des espaces végétalisés (en km ²)	Largeur moyenne du corridor végétal (en m)	Largeur maximum du corridor végétal (en m)
Rive droite	273	213,5	78,2	12,9	108,5	662
Rive gauche	272,8	194	71,1	9,8	78,3	800

Par ailleurs, la végétation rivulaire est largement dominée par un peuplement de *Tamarix africana* souvent touffu occupant les fonds des lits avec une présence plus ou moins faible de plantations d'Eucalyptus et d'Acacia sur leurs marges. Le genre *Tamarix* est formé d'espèces d'arbres en forme de parasol à régénération naturelle et à croissance rapide. Ils possèdent une grande fixité et constituent souvent des fourrés très denses impénétrables, au point de masquer le talus des berges fluviales. Ainsi, la ripisylve, de par son effet de peigne déjà souligné dans d'autres recherches, tient,

à notre avis, un rôle capital dans le ralentissement de la marche des eaux d'écoulement de la Medjerda donc l'amortissement de leur puissance érosive latérale (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993, p. 44 ; Piégay, 1996, p. 356 ; Simon *et al.*, 2004, p. 1).



Photo 11. Méandre concave de l'oued Medjerda au lieu-dit El-Khadhra à Jendouba (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 12. Cours aval de l'oued Tessa au niveau du pont-route GP5 (Cl., personnel, 24/04/2017).



Photo 13. Oued Medjerda vu à Sidi Bou-Hawel, 4 km en amont de Sidi-Smail (Cl., personnel, 21/07/2009).



Photo 14. Cours aval de l'oued Siliana, 3 km avant sa confluence avec la Medjerda (Cl., personnel, 11/07/2008).

Fig. 66. Chenaux fluviaux enserrés étroitement de ripisylve localement touffue, et recouvrement végétal des berges limitant l'action d'érosion latérale.

VII.1.1.2. Le recul des berges : étude comparative et diachronique

L'étude repose sur l'application des outils géomatiques en vue de caractériser quantitativement l'activité géodynamique latérale des cours d'eau et de mesurer leur évolution en plan à travers le temps. Elle vise, d'une part, à analyser le degré de maturité des lits fluviaux par la combinaison de certains paramètres morphométriques et, d'autre part, à calculer leurs taux d'érosion passés par la confrontation, au moyen des SIG, de supports photographiques réalisés à différentes dates (1962, 1974, 2016). Parmi les indices de maturité et de forme les plus fréquemment utilisés comme indicateurs d'une dynamique probable d'érosion, on retient le rapport du rayon de courbure à la largeur à pleins bords (Rc/W ; Bagnold, 1960, p. 135 ; Hickin, 1974, p. 425 ; Bravard et Petit, 1997, p. 118) et le ratio de la largeur sur la profondeur moyenne (l/p ; Schumm, 1963, p. 1089 ; Leopold *et al.*, 1993, p. 482 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 58). Le rayon de courbure (Rc) est défini ici en dessinant un cercle passant par les points d'inflexion d'une sinuosité ou en l'ajustant au mieux dans le cas d'un méandre très contourné (fig. 67). Il est mesuré à partir des tracés d'oueds en 2016 à l'aide de l'outil *Circle Tool* d'ArcGIS. La largeur à pleins bords (W) est également mesurée au droit des zones d'inflexion des sinuosités, afin d'éviter les sur-largeurs, grâce aux images d'archives de Google Earth Pro datant de 2016 sur lesquelles est calculée via l'outil *règle* une valeur moyenne. Quant à la profondeur moyenne à pleins bords, elle est estimée directement sur le terrain comme dans le cas de l'oued Medjerda pris à titre d'exemple. Plusieurs études indiquent que la migration latérale la plus active se produit lorsque le rapport Rc/W est compris entre 2 et 3, avec un pic à 2,5, et que les taux d'érosion diminuent de part et d'autre de cet intervalle (Bagnold, 1960, p. 135 ; Hickin et Nanson, 1984, p. 1563 ; Thorne *et al.*, 1997, p. 192 ; Malavoi et Bravard, 2010, p. 71). Pour les valeurs $Rc/W < 2$, les courbures de méandre évoluent vers le resserrement et tendent au recoupement tandis que pour $Rc/W > 5$ les boucles de méandre apparaissent douces « gentle bends » et à grand rayon de courbure (Hickin et Nanson, 1984, p. 1562 ; Thorne, 1991, p. 309 ; Bravard et Petit, 1997, p. 118 ; Lagasse, 2004, p. 11). Dans le cas d'étude, les valeurs du rapport Rc/W varient globalement entre 1,4 et 9,7 dont 65 % des indices sont supérieurs à 3, ce qui suppose des taux d'érosion latérale faibles à moyens (fig. 67). Cette variabilité s'explique notamment par l'effet de la pente, de la granulométrie des berges et de la végétation des lits fluviaux. De même, les rayons de courbure oscillent en gros entre 52 m et 463 m, soit trois à quatre fois leurs largeurs ce qui implique la présence de méandres matures.

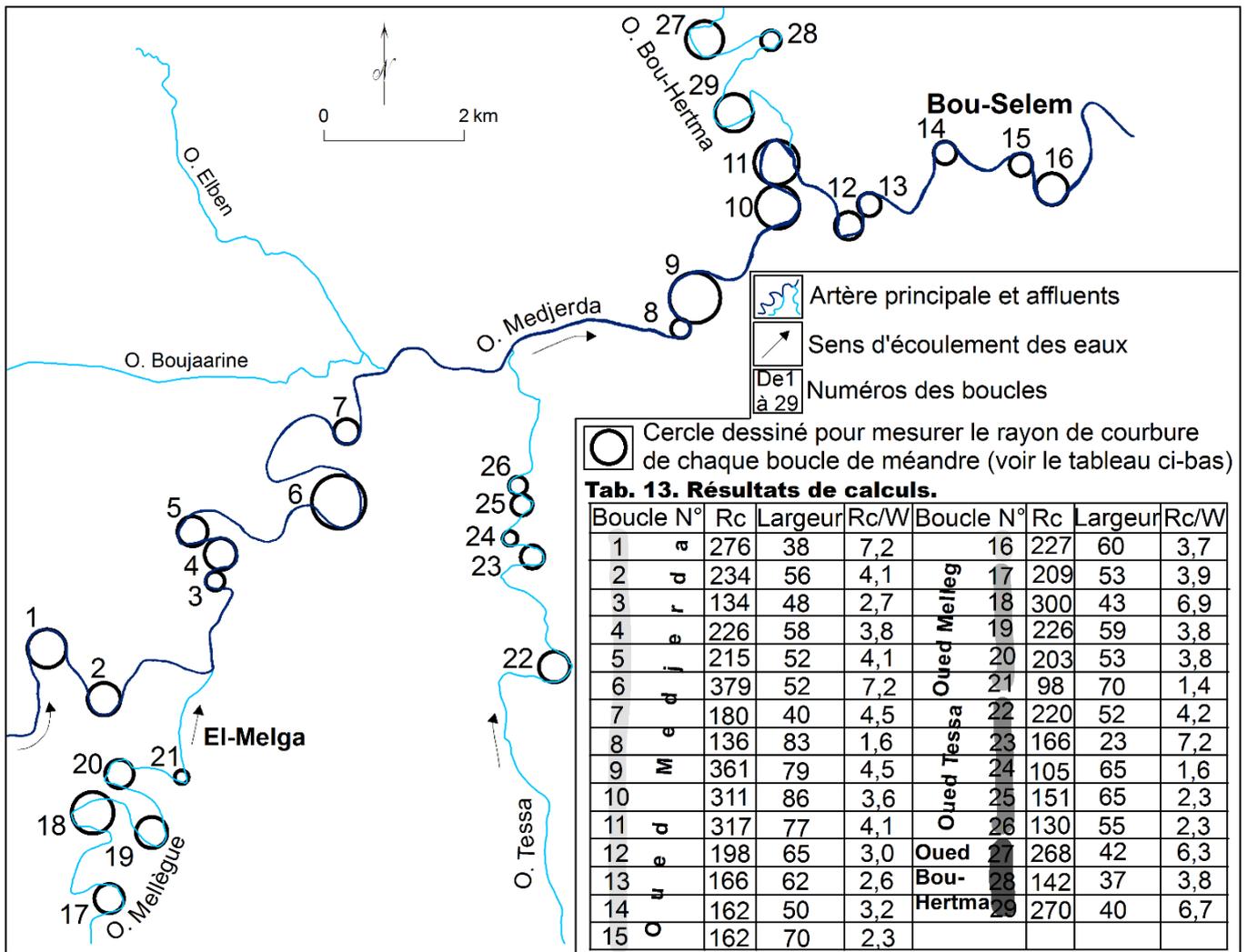
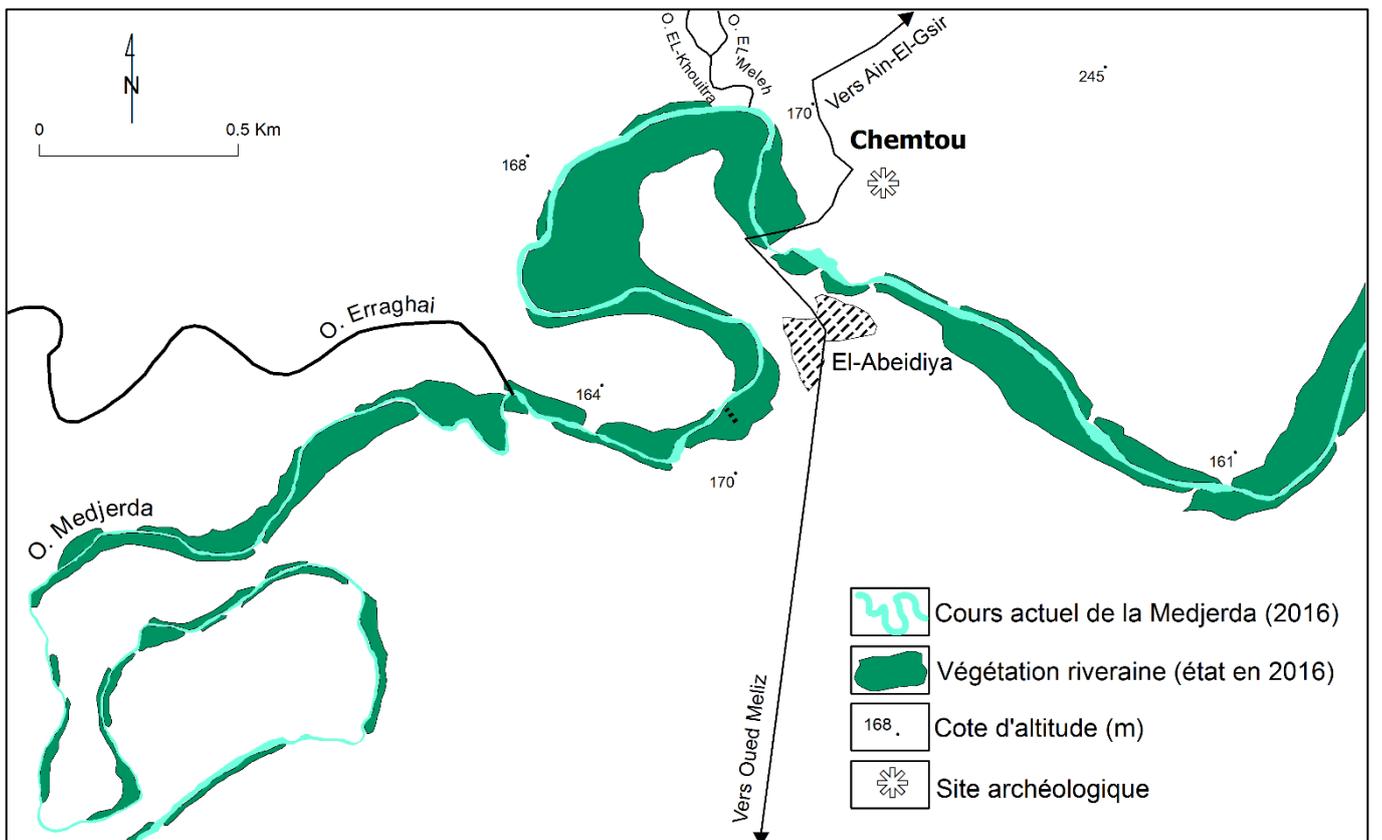
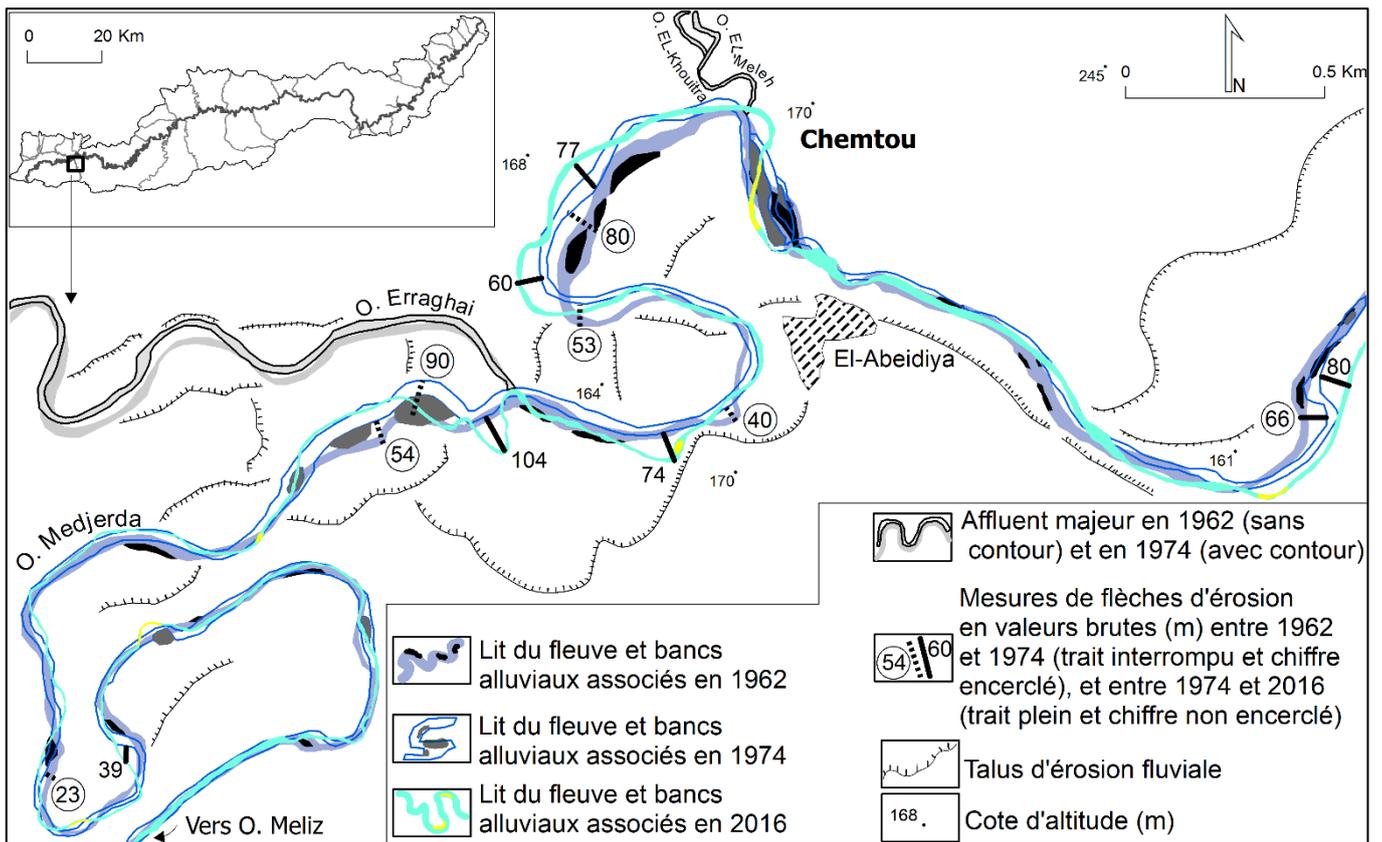


Fig. 67. Mesures des rayons de courbure et calculs des indices de maturité dans le secteur d'El Melga-Bou Selem.

L'état de maturité peut aussi être déduit de la configuration des méandres qui dessinent souvent des boucles larges et allongées avec plusieurs courbures successives de sens différent. Mais cela ne veut pas dire non plus que les chenaux fluviaux sont stables : l'érosion latérale paraît localement active. Elle est révélée, outre l'observation de terrain, par la vue en plan des cours d'eau présentant un faible rapport largeur/profondeur, généralement inférieur à 10, comme c'est le cas par exemple de la vallée de la Medjerda à douar Guessi (4,87 m), à Swaidiya (5,62 m) et à Bou-Selem-ville (10 m). De telles valeurs sont caractéristiques des lits sinueux relativement étroits et profonds ayant des berges passablement cohésives (Schumm, 1985, p. 9 ; Lagasse *et al.*, 2004, p. 7), et dénotent par conséquent une certaine mobilité latérale. Celle-ci est attestée également par la comparaison diachronique des

tracés en plan des organismes hydrographiques à partir d'un traitement numérique de différents supports photographiques. Il s'agit de mosaïques de photographies aériennes des années 1962 et 1974 (échelle 1/12 500 et 1/25 000) et d'images satellitaires à très haute résolution spatiale datant de 2016 environ et mises en ligne sur Google Earth. Elles concernent deux tronçons de la Medjerda choisis comme cas d'étude, situés respectivement en amont dans le secteur d'Oued Meliz-Chemtou et en aval dans le secteur de Testour-Slougua (fig. 68 et 70). Le premier tronçon, long de 9,52 km, présente de multiples divagations historiques d'une amplitude moyenne de 377 m, dont les traces sont reconnaissables surtout par des talus d'érosion (fig. 68). À l'époque récente (1962-2016), bien que les déplacements latéraux des chenaux semblent amoindris puisque la bande d'errance ne dépasse pas en moyenne 78 m, l'activité géodynamique du fleuve est cependant notable (fig. 69 et 71). En effet, les mesures des longueurs des flèches d'érosion enregistrées entre 1962 et 1974 varient de 23 m à 90 m avec une moyenne de 56,5 m. Ramenées au nombre d'années séparant les dates de prises de vues (12 ans), elles révèlent un taux d'érosion moyen annuel de 4,70 m/an. Ce chiffre, ramené à une largeur moyenne à pleins bords de 45.19 m (calculée sur les deux missions aériennes), permet aussi d'estimer le taux annuel d'érosion relative qui est de l'ordre de 10,4 %. Cela signifie que chaque année l'oued parvient à éroder l'équivalent de 10 % de sa propre largeur. D'après le classement d'activité proposé par Malavoi (2000), il peut-être globalement considéré comme une « rivière active », vu que son taux d'érosion relatif se situe dans l'intervalle 5-10 %. Pour la deuxième période d'observation (1974-2016), les valeurs des longueurs des flèches d'érosion obtenues s'échelonnent entre 39 m et 104 m, soit une moyenne de 71,5 m (fig. 68). Ramenées au pas de temps séparant les deux documents photographiques (42 ans), elles montrent un taux d'érosion moyen annuel de 1,70 m/an. Ce dernier, ramené à une largeur moyenne à pleins bords d'environ 47,31 m, donne un taux annuel d'érosion relative de 3,59 m/an. Selon la typologie exposée précédemment et qui comprend un intervalle de 3-5 %, elle peut être classée comme une « rivière moyennement active ».



Dans le second tronçon, long de 10,80 km, les longueurs des flèches d'érosion mesurées entre 1962 et 1974 et entre 1974 et 2016 varient respectivement de 75 m à 610 m et de 62 m à 153 m (fig. 70). Les valeurs moyennes obtenues sont de l'ordre de 219 m et de 107,16 m. Les taux d'érosion moyens annuels calculés pour la première et la deuxième période d'observation sont égaux à 18,29 m/an et à 2,55 m/an. Compte tenu des largeurs moyennes à pleins bords, qui sont d'environ 97,35 m et 78 m, les taux annuels d'érosion relative atteignent respectivement 18,78 % et 3,26 %. En retenant la même classification qui contient des intervalles supérieurs à 15 % et à 3-5 %, la Medjerda a enregistré au cours des temps récents deux dynamiques différentes : la plus ancienne d'entre elles (1962-1974) s'avère « extrêmement active », probablement à cause de l'effet des grandes crues, comme par exemple celles de 1969 et surtout de 1973 la plus puissante de toutes. En revanche, la dynamique récente (1974-2016) se révèle « peu active » à « moyennement active », vraisemblablement en raison de la raréfaction des crues morphogènes, due principalement à l'interruption des effets des eaux pluviales par la multiplication des aménagements hydrauliques sur leur chemin. Il en a résulté un rétrécissement des lits fluviaux comme le montre par exemple le lit de 2016, s'inscrivant désormais dans celui façonné en 1974 (fig. 70). À cela s'ajoute une colonisation végétale des marges fluviales qui a contribué à freiner la mise en place des macroformes alluviales. Les superficies des bancs alluviaux sont passées de 3,5 ha en 1962 à 2,4 ha en 1974 à 1,4 ha en 2016, soit une diminution de 72,8 % entre 1962 et 1974 et de 58 % entre 1974 et 2016 (fig. 70 et 71).

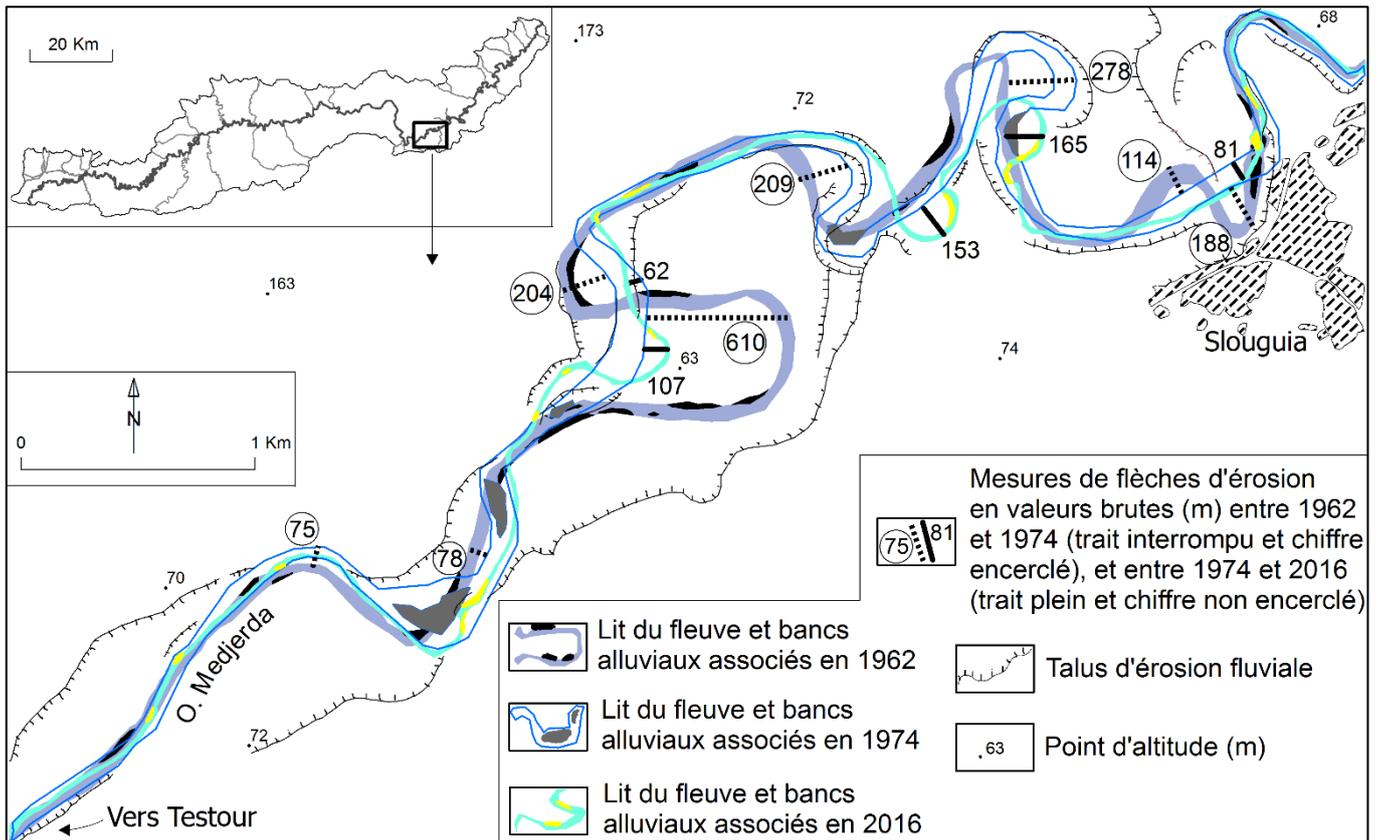


Fig. 70. Évolution de la géométrie en plan de l'oued Medjerda, et intensité de la dynamique d'érosion fluviale dans le secteur de Testour-Slouguia.

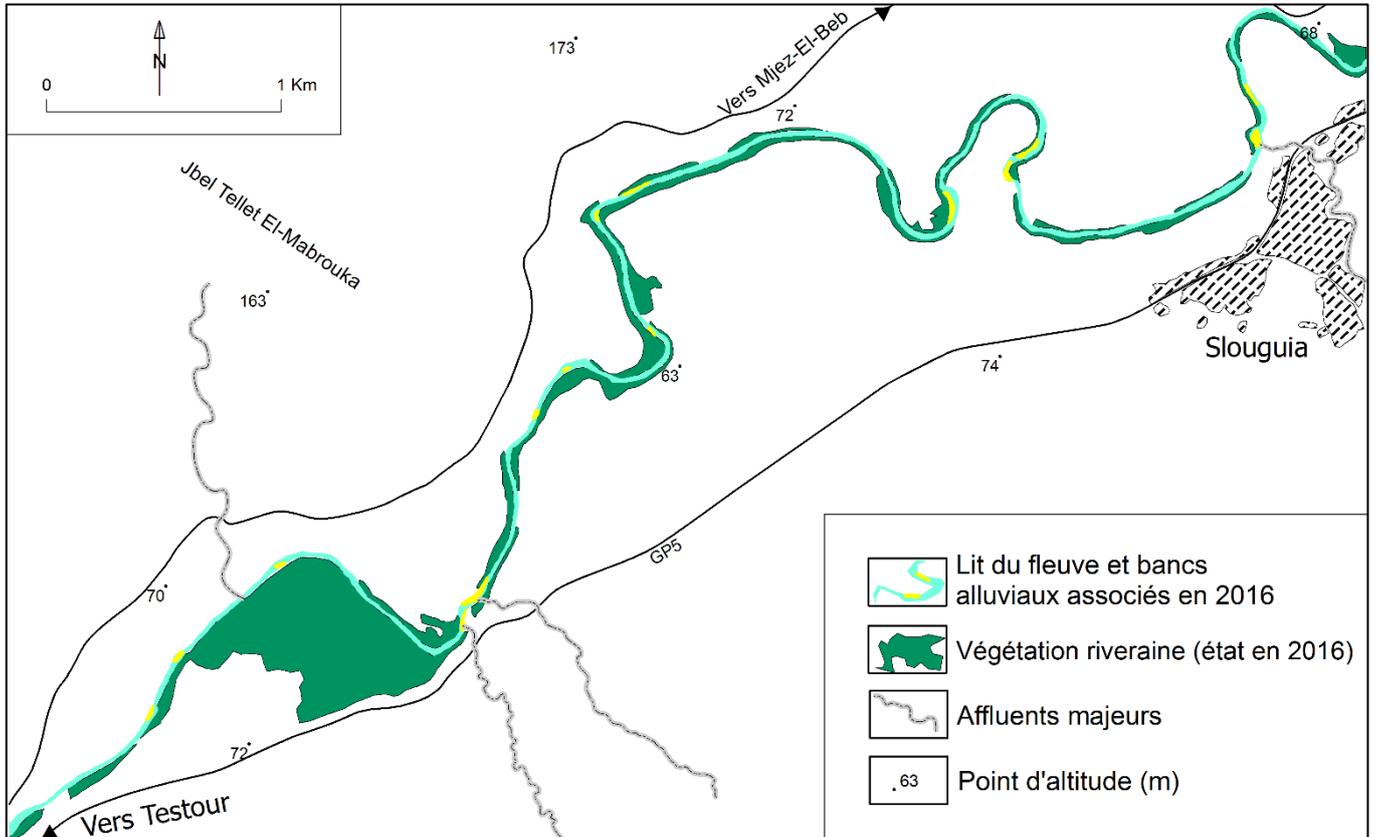


Fig. 71. Conquête des anciens lits de la Medjerda par la ripisylve (se reporter aussi à la fig. 70).

VII.1.2. Des formes d'érosion linéaire et une tendance générale à l'enfoncement des talwegs

VII.1.2.1. Suffosion et dynamique des berges

La suffosion (*piping*) est le départ en profondeur d'éléments fins sous l'action des eaux d'infiltration (Pellegrin et Salomon, 2001, p. 55). Dans la moyenne vallée de la Medjerda, ce processus érosif est lié en grande partie à la présence de fentes de dessiccation, favorisées par la faiblesse de la pente, l'ardeur des étés et l'importance des dépôts meubles. Il se traduit par l'existence en surface de cavités de dimension variable, souvent alignées et rapprochées aux marges des oueds. Ces excavations se transforment quelquefois, par coalescence et élargissement, en ravines parallèles ou sub-parallèles séparant des pans entiers à risque d'effondrement. Il se reconnaît aussi, en coupe, à travers des galeries, conduits et tunnels créés par l'écoulement hypodermique. Selon nos observations de terrain, il est largement répandu le long du tronçon de la Medjerda compris entre les localités de Sidi-Meskine et Ouled El'Haj, sur une distance de 10 km environ (fig.72, photos 15-17).



Photo 15. Systèmes de trous de suffosion dont certains ont déjà donné naissance à des cicatrices d'arrachement de pans et au ravinement (1). D'autres sont en cours d'évolution préparant l'ouverture de fentes de dessiccation (2). Le reste est encore inopérant mais ne tarde pas longtemps à fonctionner pareillement (3). Vue sur la berge droite de la Medjerda, 700 m en amont de Sidi-Meskine à Jendouba (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 17. Trou de suffosion perçant le sommet de la berge droite de la Medjerda, 8 km à l'aval de Sidi-Meskine, et favorisant le recul d'une tête d'une ravine (Cl., personnel, 10/08/2008).



Photo 16. Formes d'érosion marquant la berge droite de la Medjerda, 5 km à l'aval de Sidi-Meskine, et travaux de lutte anti-érosive par plantation de cactus épineux (Cl., personnel, 10/08/2008). 1. Ravinement ; 2. Suffosion ; 3. Glissement

Fig. 72. Manifestations de la suffosion affectant les berges de la Medjerda à Sidi-Meskine (Jendouba).

VII.1.2.2. Dégradation par ravinement

Malgré la faiblesse des pentes, la modicité des débits ordinaires et la rareté des réseaux de bras latéraux dans les plaines de la moyenne vallée de la Medjerda, le phénomène de ravinement est fréquent sur les marges des oueds. Il se manifeste à travers des berges burinées de multiples rigoles et ravines et des paysages de badlands localisés (photos 18 et 19). Les exemples de telles situations sont nombreux aussi bien sur le collecteur principal (Swaidiya, Chemtou, Sidi-Ali Jbini) que sur les affluents tributaires (oueds El-Meleh, Meliz, Mellègue). Les explications des faits sont

à rechercher dans la nature des affleurements tendres en surface et les effets des grosses crues lors des débordements. Elles viennent ensuite du côté des riverains du fait de leurs activités inadaptées et déstabilisatrices des berges, comme par exemple le labour jusqu'au rebord des nappes alluviales ou l'emploi des groupes motopompes, installés au bas des talus de raccordement, pour le relevage des eaux d'écoulement ou encore la conduite des troupeaux au pâturage sur les bords des cours d'eau transformés ainsi en sentiers (fig. 73, photos 20-33).



Photo 18. Terres fortement affectées par un ravinement profond et dense rappelant les badlands. Vue sur la rive gauche de l'oued Medjerda à Swaidiya, 7 km à l'est de Chemtou (cliché : L. Lahmar, 30/11/2013).



Photo 19. Partie centrale du talus transformé en sentier marqué par le passage répété du bétail. Noter aussi le système de ravinement évoluant par recul de tête, ainsi que l'étalement des cultures jusqu'au sommet de la berge. Vue de l'oued Medjerda à Sidi Ali-Ben Selem en regardant, au sud, vers la ville de Testour (cliché : L. Lahmar, 16/7/2008).



Photo 20. Motopompe implantée sur une base rectangulaire au pied du talus et munie de tuyaux en caoutchouc pour l'irrigation. Berge gauche de l'oued El-Meleh à Chemtou (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 21. Paysage de ravinement généralisé dans un champ d'oliviers, situé sur la rive droite de l'oued Medjerda à Chemtou (Cl., personnel, 31/03/2013).



Photo 22. Série d'entailles métriques échantonnant le front de la berge droite de l'oued Meliz, 700 m au sud de douar El-Mdefe'a (Cl., personnel, 08/11/2008).



Photo 23. Formation de ravins par recul de tête à partir de la berge gauche de l'oued Bou-Hertma, à la suite du débordement de la crue d'avril 2009 (Cl., personnel, 23/04/2009).

Fig. 73. L'érosion ravinatoire dans la région d'étude : processus, manifestations, déterminants et impacts environnementaux.

VII.1.2.3. Incision des talwegs

La tendance à l'enfoncement récent des chenaux fluviatiles est un fait établi dans différents terrains aussi bien en Tunisie qu'à l'étranger (Tricart, 1977, p. 24 ; Ballais, 1991, p. 224 ; Bourgou, 1993, p. 256 ; Bravard, 1994, p. 5 ; Gautier, 1994, p. 60 ; Arnaud-Fassetta, 1997, p. 251 ; Oueslati, 2005, p. 161 ; Brahim, 2005, p. 265 ; Zerai, 2006, p. 156. Fadhlaoui, 2017, p. 174). La même tendance semble également se dégager de l'observation de certains tronçons de la Medjerda et ses affluents majeurs (photo 25). Les indices sont principalement des chenaux nouvellement créés ou des surfaces disposées en gradins successifs ou encore des piliers de ponts et des vestiges de ruines exhumés. Des exemples de telles situations existent au droit des ponts construits sur l'oued Tessa à douar El-Gramit ainsi que sur l'oued Medjerda à Bou-Selem et sur l'oued Siliana à 2 km à l'ouest de Testour. D'autres exemples se trouvent au niveau des sections méandriformes de l'oued Meliz à 2,5 km au sud de la ville du même nom, et de l'oued Tessa à 1,5 km à l'ouest de douar Eryebna. Les facteurs qui concourent à favoriser ce phénomène d'incision verticale tiennent non seulement à des données naturelles mais aussi et surtout à certaines activités humaines liées aux modes d'aménagement et d'utilisation de l'espace fluvial. Les travaux d'endiguement réalisés entre les années 1950 et 1980 ont eu le plus d'impact sur l'équilibre dynamique des cours d'eau. L'écoulement fluvial s'est atrophié et la charge de fond a nettement diminué. De plus, le transit sédimentaire s'est encore affaibli par l'effet de « peigne » de la ripisylve. Par conséquent, les oueds, disposant d'une énergie nette à dissiper et ayant en contrepartie peu de travail à mener en raison de la faiblesse de la charge sédimentaire, se sont souvent trouvés contraints à inciser leurs talwegs. À cela s'ajoutent les activités d'extraction de sable effectuées par les habitants pour son utilisation dans des chantiers de construction. Lors de nos tournées sur le terrain, on a eu l'occasion de repérer de nombreux amas de sable ou leurs traces et de voir à maintes reprises le passage de tracteurs avec remorques (fig. 74, photos 25-31).



Photo 24. Mobilité verticale du lit de l'oued Meliz et développement des profils en gradins (x : 461461 ; y : 4034424).



Photo 25. L'oued Medjerda à Chemtou (Cl., personnel, 31/03/2013).



Photo 26. L'oued Meliz à 2,5 km à l'amont du pont de même nom (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 27. L'oued Mellègue à Err'haimiya (Cl., personnel, 30/11/2013).



Photo 28. L'oued Tessa à Ettrakhna (Cl., personnel, 24/12/2008).



Photo 29. Vue de l'oued Tessa depuis le marabout de Sidi-Abid.



Photo 30. Lit de l'oued Tessa à 200 m de la photo 28.



Photo 31. Près de la confluence de l'oued Medjerda avec l'oued Siliana (Cl., personnel, 12/01/2014).

Fig. 74. Actions d'extraction et de transport de sable dans différents oueds (les lettres indiquent de l'amont vers l'aval).

VII.2. Les remblaiements alluviaux récents des fonds de vallée et leur impact sur les paysages fluviaux

L'alluvionnement impressionnant dans la moyenne vallée de la Medjerda est l'un des traits marquants de la dynamique fluviale passée et actuelle. Les alluvions qui forment aujourd'hui les « Grandes Plaines », les célèbres *Magni Campi* des Anciens, ne sont-elles pas l'œuvre collective du fleuve et de ses affluents ! (Tissot, 1888, p. 62 ; Bonniard, 1934, p. 156). Or, c'est à l'occasion des événements exceptionnels qu'il est possible de prendre mesure de l'ampleur de ce phénomène. Les dépôts de crue sont parfois tellement volumineux qu'ils sont susceptibles d'influencer la morphologie des fonds des lits et des terrains bas limitrophes. C'est aussi grâce à l'apport des photographies diachroniques qu'on va pouvoir suivre l'évolution du paysage fluvial et de reconstituer certains de ses éléments qui ne sont plus directement accessibles. La documentation photographique compilée pour cette étude comprend des photos prises au sol couvrant cent sept ans (1910-2017). Les plus anciennes sont des cartes postales et des clichés d'amateurs consultés sur le site internet de delcampe.net (<https://delcampe.net>), ainsi que des photos d'auteurs trouvées dans un album photo numérique édité en 1973 par l'office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM) (<https://core.ac.uk/download/pdf/39884389.pdf>). Les plus récentes sont des photographies acquises par des particuliers, ou par nous-même au fil des missions de terrain.

VII.2.1. Dynamique de remblaiement interne au lit fluvial et évolution paysagère

Le transport solide dans les cours d'eau de la moyenne Medjerda est important, comme en témoigne par exemple le taux d'envasement élevé des retenues des barrages qui les contrôlent (Rodier *et al.*, 1981, p. 431 ; Ben Mammou et Louati, p. 205 et 206). Il se fait essentiellement lors des crues qui représentent en moyenne au moins de 80 % de l'écoulement annuel (Rodier *et al.*, 1981, p. 430). Mais ses valeurs extrêmes ne coïncident pas forcément avec celles d'apport liquide. Autrement dit, les débits maxima ne correspondent pas nécessairement aux plus gros volumes de sédiments en transit car ces derniers sont liés à d'autres facteurs, comme l'intensité de la pluie, le pouvoir érosif du bassin-versant et les opérations de dévasement des barrages-réservoirs. La teneur de matières solides en suspension peut dépasser 100 g/l au cours de certaines crues comme celles de mars-avril 1973, les mieux connues, qui ont fourni en six jours 100 millions de tonnes environ de dépôts de sédiments,

soit l'équivalent de l'apport solide moyen durant cinq ans (Rodier *et al.*, 1981, p. 429 ; Zahar, 2001, p. 72). Cela représente aussi une abrasion moyenne ramenée à l'ensemble du bassin-versant au niveau de la station de Slouguia de 4300 à 4750 t/km², c'est-à-dire 4,3 fois le taux moyen annuel de l'érosion spécifique évaluée à 1050 t/km² à la station de Mjez El-Beb, située à 11 km en aval de la précédente (Claude et Loyer, 1982, p. 212 ; Abid, 2003, p. 6). À l'occasion des crues plus récentes de janvier-février 2003, les transports en suspension mesurés à la station de Slouguia ont atteint 20 millions de tonnes, soit presque le même volume annuel moyen estimé à 21,5 millions de tonnes (Ghorbel, 2003, p. 19). Les matériaux solides charriés par les eaux courantes sont arrachés aux versants, dominés par des formations géologiques tendres, et aux berges érodables des oueds. Leur sédimentation s'effectue souvent dans les parties convexes des méandres et sur les bords des chenaux sinueux sous la forme de gradins d'accumulation, de bancs alluviaux et de levées fluviales. Les dépôts accumulés sont à l'origine du relèvement du fond des lits, favorisé par la présence de la végétation rivulaire qui participe à la fixation et au piégeage des sédiments. En revanche, à l'occasion de nouvelles crues, le profil en travers des lits peut subir d'importantes modifications dues à la dynamique fluviale des chenaux. Le recoupement des photographies anciennes et récentes permet de donner une idée de l'évolution des paysages fluviaux analysés. Ils concernent la section de l'oued Medjerda vue à deux endroits. Le premier se trouve en amont, au niveau du pont-route abandonné et celui actuel de la ville de Bou-Selem (fig. 75, photos 32-37). La section d'écoulement visée, aujourd'hui large de 75 m, apparaît sur au moins cinq photos prises à cent six ans d'intervalle (1911-2017). Le second endroit existe en aval, au droit du pont moderne de la ville de Mjez El-Beb (fig. 76, photos 38-43), construit à l'époque turque et mouradite en 1677 (Guellouz, 2010, p. 133). Ce pont en dos d'âne percé par huit arches est reconnaissable sur six photos étalées sur 107 ans (1910-2017).



Photo 32. Carte postale, datée du 08-04-191, donnant une vue orientée Nord-Sud du lit de l'oued Medjerda au droit de son pont abandonné à Souk El-Khemis, l'actuelle Bou-Selem. Noter la largeur du lit fluvial et la raideur modérée de ses berges surtout de la rive gauche (pièce trouvée sur le site internet : www.delcampe.net).



Photo 33. Photo du même lieu prise après deux mois de la crue de janvier 2004. Mise en place d'une importante accumulation de charge de fond, et rétrécissement du chenal d'écoulement des eaux (Cl., personnel, 05/03/2004).



Photo 34. Photo prise au moment de la crue du 05 mai 2009. Noter la bifurcation et la création d'un nouveau chenal au pied de la berge droite, également la formation d'un banc médian (Cl., personnel, 05/05/2009).



Photo 35. Situation en 2011 : réincision du chenal récent et dégagement du talus du banc médian parsemés de végétation (Cl., personnel, 14/04/2011).



Photos 36 et 37. Le même endroit revu en 2017, en regardant vers le Sud (photo 36 de gauche) et vers le Nord (photo 37 de droite). Nouvelle configuration du profil fluvial : concentration des eaux d'écoulement dans un chenal unique passant au milieu du lit, formation de gradins d'accumulation à couverture végétale de part et d'autre du talweg (37), et disparition du banc médian déjà vu en 2009 et en 2011 (Cl., personnel, 29/04/2017).

Fig. 75. Série de photographies commentées révélant les processus d'évolution du paysage fluvial, immédiatement en amont du pont abandonné de la ville de Bou-Selem.

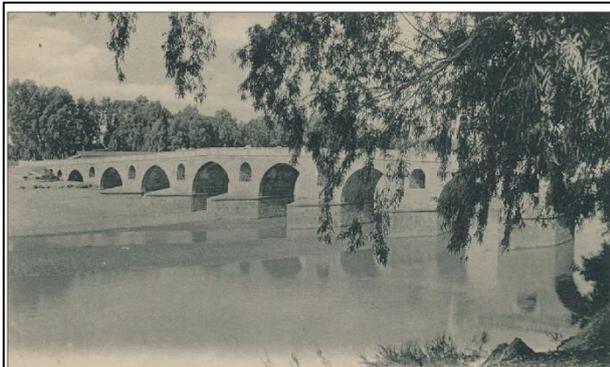


Photo 38. Vue de l'amont en direction du Nord, sur le lit large de l'oued Medjerda à Mjez El-Beb (1910 environ), et état des arches de son pont moderne (Cl., P. Masson, 1910).

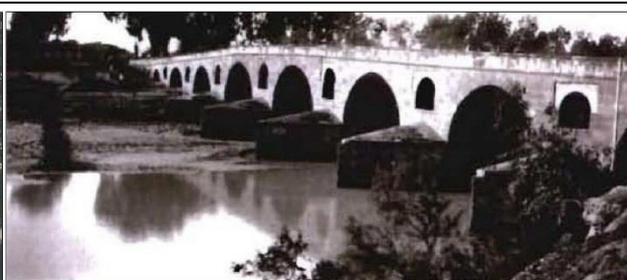


Photo 39. Photo illustrant le même endroit vu en 1924. Situation presque pareille à la précédente hormis le surcreusement du chenal d'écoulement attesté par l'exhumation des avant-becs des piles (Cl., DRE, 1924).

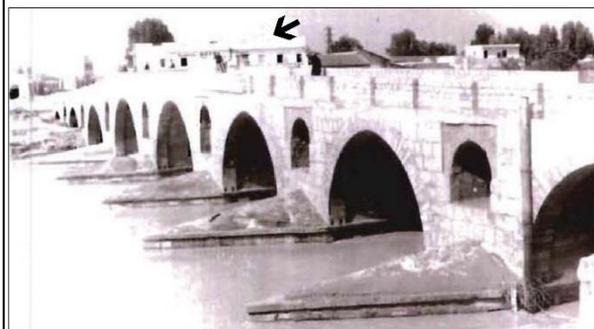


Photo 40. Situation après la grande crue de 1973 (l'hôtel de Membressa, indiqué par une flèche noire, servira de repère pour reconnaître le lieu sur cette photo et les trois suivantes). Noter le comblement du lit fluvial par des dépôts de fin de crue (Cl., Colombani, 1973).

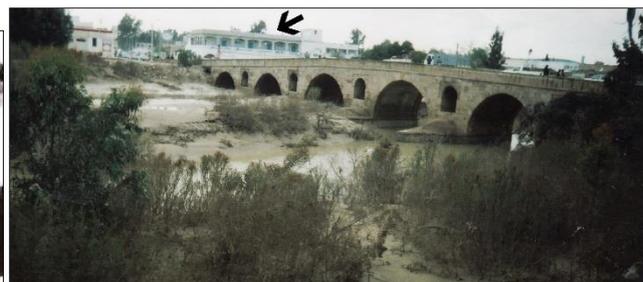


Photo 41. Photo prise en 2000 révélant un changement sensible du profil en travers de l'oued : rétrécissement du chenal d'écoulement, formation de bourrelets de berge gauche provoquant un relèvement du fond et présence d'une végétation rivulaire (Cl., H. Amor, 24/04/2000).



Photo 42. Photo datée de 2003 montrant en particulier un développement notable de la végétation de part et d'autre du lit mineur (Cl., M. Ben Ouezdou, 2003).



Photo 43. Photo prise en 2017 indiquant un envahissement de la bande active par une végétation dominée par un peuplement de *Tamarix africana* au point de masquer certaines arches du pont (Cl., personnel, 28/04/2017).

Fig. 76. Sélection de photos commentées illustrant les mécanismes de changement du paysage fluvial, immédiatement en amont du pont moderne de la ville de Mjez El-Beb.

VII.2.2. Ampleur des atterrissements dans la plaine d'inondation

Les atterrissements se forment lors des débordements des eaux par franchissement des levées de berge au moment des crues. Ils apparaissent accumulés au sommet des berges sous la forme de bourrelets alluviaux, ou étendus sur des aires déprimées (plaine d'inondation) s'ajoutant aux nappes alluviales surplombant les axes fluviaux. Les épaisseurs des tranches déposées dans le bassin fluvial moyen de la Medjerda varient de quelques millimètres à plus de 2 m, suivant l'intensité des crues et la topographie des lieux. Par exemple, celles estimées au cours des inondations de 1912 et de 1931 sont respectivement de 20 à 30 cm et de 50 cm (Habel, 1912, p. 72 ; Bonniard, 1934, p. 266). Celles mesurées au lendemain de la crise climatique de 1973 sont de 10 à 15 cm et ponctuellement de 2,30 m entre Testour et Slougua (Rodier *et al.*, 1981, p. 432). Selon nos observations faites en 2004 dans la plaine de Jendouba au lieu-dit Swaissiya, l'épaisseur des dépôts aurait dépassé 2 m durant la dernière décennie (Lahmar, 2005, p. 53). D'après nos relevés effectués 10 jours après la crue de 2009, la plaine de Bou-Selem a hérité d'une couche de sédiments de 10 à 20 cm d'épaisseur (fig. 77, photos 44 et 45).



Photo 44. Dépôt d'alluvions, de 20 cm d'épaisseur et de 16 ha de superficie, formé lors de la crue d'avril 2009. Vue sur la rive droite de l'oued Medjerda, 600 m en aval de son ancienne confluence avec l'oued Kesseb (Cl., personnel, 20/07/2009).



Photo 45. Atterrissement sur une surface cultivée en blé déjà mûr, et dégradation des récoltes (photo prise à proximité du lieu précédent).

Fig. 77. Aspects des dépôts accumulés par l'oued Medjerda et leur impact sur les cultures, par suite de la crue d'avril 2009 dans le secteur d'El-Kodia à Bou-Selem (x : 501196 ; y : 4049249).

Le retrait des eaux a fait apparaître de larges surfaces d'atterrissements qui font désormais partie de la stratigraphie des formations superficielles, entraînant ainsi l'exhaussement des plaines d'inondation par sédimentation. Le matériel alluvial montre souvent une structure polyédrique liée à des matériaux fins à dominante argileuse. Les polygones de dessiccation (mud cracks) sont déterminés par la rétraction à l'air de sédiments argileux initialement saturés en eau (Chamley *et al.*, 2011, p. 92). Le remplissage prolongé de la porosité par de l'eau limite ainsi de façon considérable la disponibilité en oxygène dans les sols déjà à engorgement par nappe proche de la surface (Girard *et al.*, 2011, p. 77). D'où la perturbation des réseaux trophiques et finalement la perte des cultures comme c'était le cas en 2009 à Bou-Selem, à Sidi-Ali Jbini et à Sidi-Smail. Du point de vue morphologique, la comparaison des photographies diachroniques montre un épaissement remarquable des constructions alluviales accolées aux berges (fig. 78, photos 46-49). La banquette associée à l'oued Mellègue, juste à l'amont de son pont « Cinq dinars » à El-Melga, est un exemple parmi d'autres. Formée au cours des défluviations de l'oued dont les traces sont visibles sur toutes les photos aériennes depuis 1948, elle mesure en moyenne 260 m de longueur sur 65 m de largeur avec 4-5 m de hauteur. Sa surface paraît avoir été exhaussée entre 2004 et 2017, dates des observations, par les apports alluviaux successifs des inondations de 2005, 2009, 2011, 2012 et 2015.



Fig. 78. Vision diachronique (2004-2017) de la progression des atterrissements sur la rive droite de l'oued Mellègue, au droit de son pont « Cinq dinars » à Jendouba (les flèches permettent de reconnaître le lieu).

Par ailleurs, les atterrissements peuvent aussi atteindre les agglomérations implantées dans les plaines d'inondation, à travers des bras morts ou des voies de communication dirigées vers le bâti. Ils sont très gênants pour la vie des habitants qui se souviennent toujours du même morne paysage : des constructions envahies par d'eau et de matériaux de toutes sortes, des trottoirs boueux et corrodés, des rues recouvertes de boues et d'immondices dégageant de mauvaises odeurs parfois insupportables (fig. 79, photos 50 et 51).



Photo 50. La cour d'une maison à Bou-Selem comblé de matériaux terreux, provenant de l'oued Medjerda lors de sa crue en janvier 2004 (Cl., personnel, 05/03/2004).



Photo 51. L'avenue du Grand Maghreb à Mjez El-Beb jonchée de boues et d'immondices, à la suite de la crue de l'oued Medjerda en novembre 2011(Cl., personnel, 03/11/2011).

Fig. 79. Photos d'atterrissement de la Medjerda dans les secteurs urbains de Bou-Selem et de Mjez El-Beb.

Conclusions

L'étude de l'activité géodynamique récente met en évidence divers processus et manifestations d'érosion et de sédimentation. Outre les phénomènes de suffosion et de ravinement, celui de recul des berges est le plus dominant dans le fond de la vallée de la Medjerda. Les taux d'érosion moyens annuels calculés sur deux tronçons fluviaux, situés en amont et en aval, pour deux périodes successives (1962-1974 et 1974-2016) sont respectivement de l'ordre de 4,70 et 1,70 m/an et de 18,29 et 2,55 m/an. Les faibles valeurs de la deuxième période d'analyse sont dues aux effets des travaux d'aménagement hydraulique et de la colonisation végétale de la bande active. Les remblaiements alluviaux sont aussi remarquables surtout dans les plaines d'inondation. L'épaisseur moyenne des dépôts par crue est estimée à environ 15 cm entre 2004 et 2015, d'où l'exhaussement continu des fonds. Ainsi, la connaissance

des dynamiques érosives et anthropiques le long des sections des oueds a également permis de mieux apprécier les menaces qui pèsent sur le patrimoine archéologique qui leur est associé.

VII.3. Des ruines archéologiques en danger

La moyenne vallée de la Medjerda appartient à une aire archéologique de première importance en Tunisie. Elle renferme près de 540 sites antiques, soit 1 site par 4 km², dénombrés sur les cartes topographiques au 1/50000 éditées lors de la première moitié du XIX^e siècle. Mais certains édifices n'existent plus sur le terrain à cause de leur démolition et l'usage de leurs matériaux dans la construction des ponts, des voies ferrées et des habitations (Tissot, 1881, p. 95 ; Saladin, 1893, p. 52 ; Tissot, 1888, p. 260 ; Carton, 1891, p.1). D'autres ruines parfois de moindre importance mais notables, ayant échappé à l'observation des brigades topographiques ou récemment mis à jour par les cours d'eau, méritent aussi d'être signalés. Aujourd'hui, de nombreux vestiges anciens situés au bord des oueds sont menacés de disparition sous l'action des eaux et des Hommes. Les quelques exemples suivants, relevés sur la base d'observations directes anciennes et récentes, semblent éclairants sur l'état de dégradation du patrimoine archéologique et sur l'évolution du paysage jadis florissant. Ils sont présentés de l'amont vers l'aval et du versant vers la plaine.

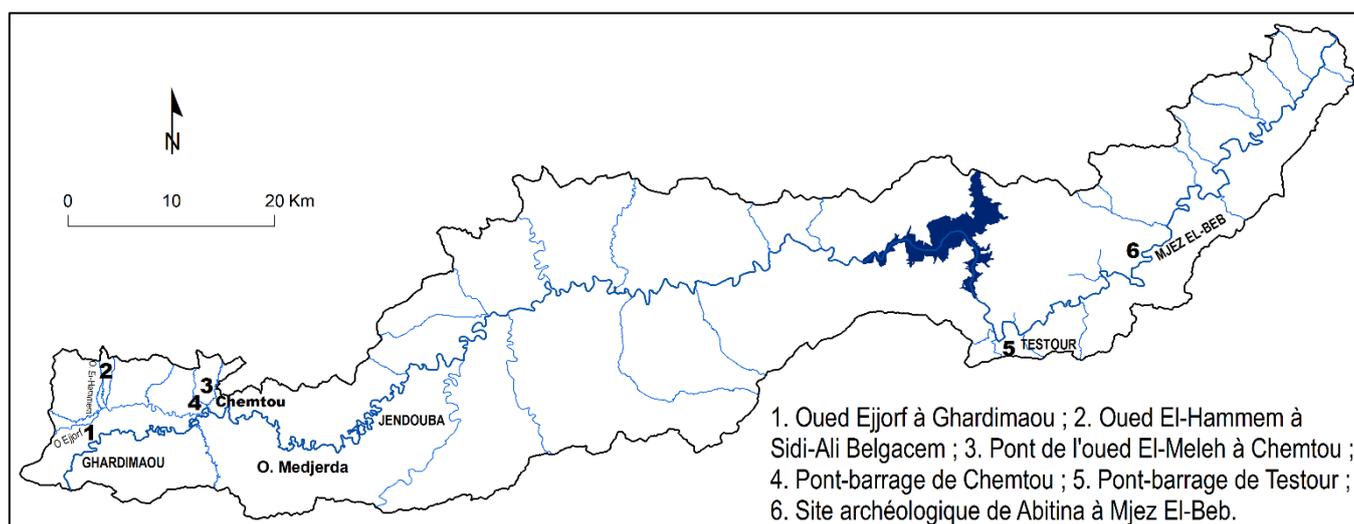


Fig. 80. Localisation des sites des vestiges archéologiques étudiés.

VII.3.1. Les ruines archéologiques dans l'oued Ejjorf à Ghardimaou

Les ruines se trouvent en aval de la confluence des oueds Ejjorf-La'hjar, affluents de l'oued Erraghai, à 3 km au nord-ouest de la ville de Ghardimaou. Elles comprennent de grosses pierres de taille situées au sommet de la berge gauche ainsi que de nombreux débris de matériel archéologique, parmi lesquels des restes de pressoir à huile, disséminés sur le fond du lit (fig. 81). Ces derniers appartiennent incontestablement au même site, eu égard à l'aspect frais et peu usé des objets observés et à l'inexistence de vestiges archéologiques plus en amont sur une distance parcourue de 2 km. L'examen des supports cartographiques et photographiques révèle que le site d'étude a subi une grande crue probablement à l'origine de sa destruction. Les preuves sont tirées des traces du champ d'expansion des eaux d'inondation et du bras abandonné, qui sont visibles sur les photographies aériennes de 1962 et de 1974 mais manquants sur les cartes topographiques de 1912 et de 1958 sur lesquelles figurent uniquement les symboles de ruines. D'après le répertoire des événements hydrologiques majeurs enregistrés dans la région (partie 4), la crue de mars 1959 est vraisemblablement responsable de la dégradation, voire de la disparition de plusieurs vestiges antiques. Cela n'est pas surprenant puisque les oueds Ejjorf, La'hjar et Erraghai dont les noms signifient respectivement « fossé », pierres » et « bruissement », sont dotés d'une forte puissance érosive remarquée sur le terrain. L'hydronymie n'est jamais gratuite.

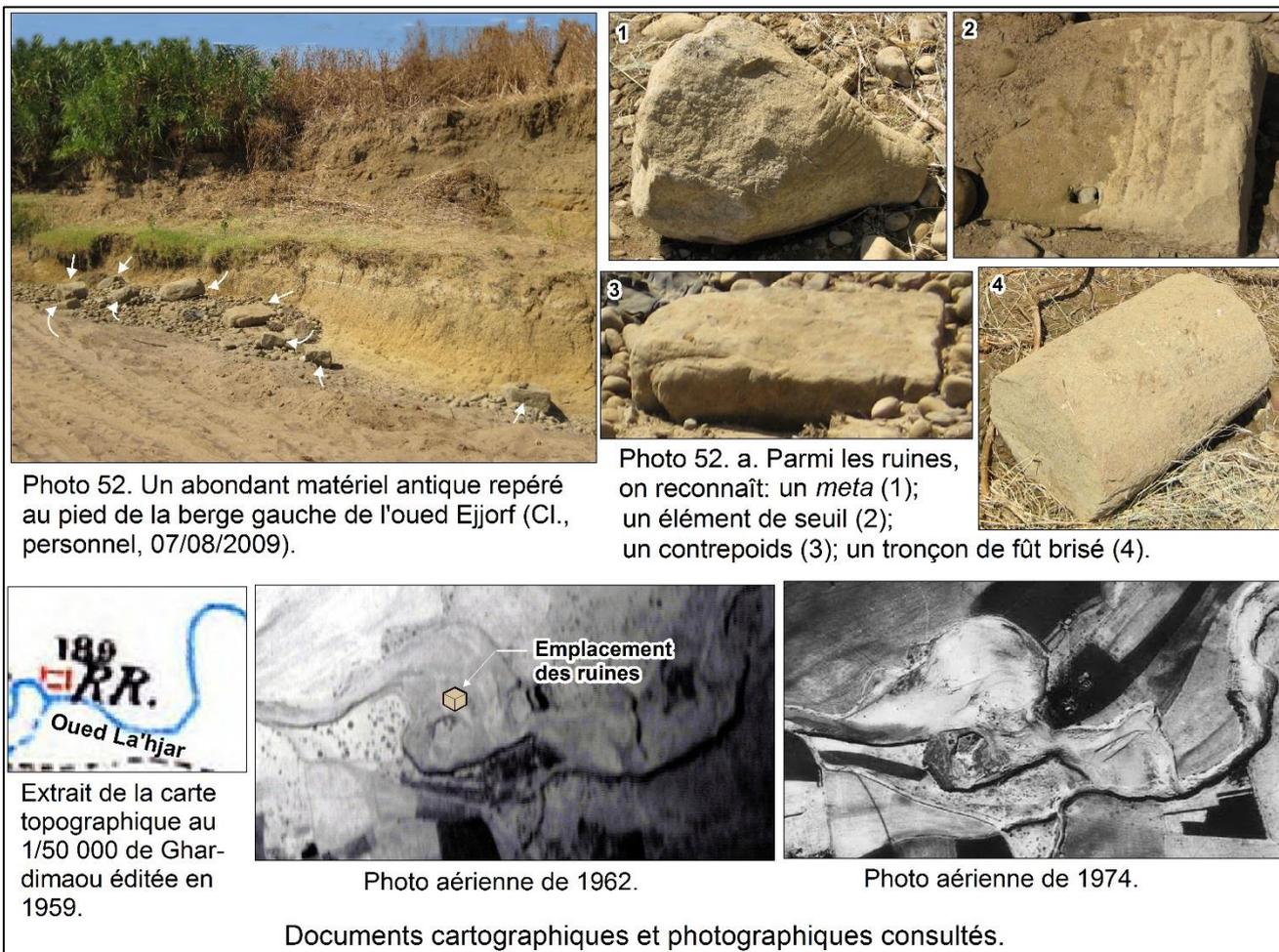


Fig. 81. Dégradation des vestiges archéologiques juxtant l'oued Ejjorf à Eddora (Ghardimaou) sous l'effet des crues.

VII.3.2. Les ruines de l'oued El-Hammem à l'antique Thuburnica (Sidi-Ali Belgacem)

Nombreux sont les vestiges archéologiques dans l'ancien territoire de la *colonia Thuburnica* actuellement Werghich, situé au pied sud de jbel El-Gouaress à 220 m d'altitude et à 7 km au nord de Ghardimaou. Ceux associés à l'oued El-Hammem, l'un des branches de l'oued Erraghai, lequel affluent de la Medjerda, se voient dans le talus des berges et au fond du lit actuel. Leur exhumation se serait alors produite suite au processus de sapement latéral dû à la capacité de travail du cours d'eau qui coule dans une zone de chasse d'eau, au passage du plateau à la plaine. Les débris archéologiques se rencontrent dans la partie inférieure et moyenne du vallon sur 2 km de long. Mais les plus remarquables, vu leur position à l'intérieur du dépôt et leur dégradation rapide, se trouvent encore en amont dans deux sites. Le premier se situe

à 40 m en aval du pont du village de Werghich à El-Kalaa, où paraît le reste d'une construction antique taillée dans la berge gauche avant sa disparition, en l'espace de 5 ans seulement, sous l'effet des eaux et surtout des Hommes (fig. 82, photos 53-55). Le deuxième site existe à quelque 60 m en aval du premier, où apparaît une partie d'une structure ancienne incluse dans la berge droite sévèrement attaquée par les eaux (fig. 83, photos 56-58).



Photo 53. Photo prise en 2006 en face de la berge gauche de l'oued El-Hammem, montrant les fondements d'une ancienne construction exhumée par l'action érosive des eaux de crue (Cl., M. Mjejri, 2006).



Photo 54. Trois ans après (2009), la partie supérieure de la même construction est enlevée, probablement par un bulldozer dont la trace, en creux, de la pelle est désormais devenue un point de déversement d'ordures ménagères (Cl., personnel, 21/06/2009).



Photo 55. Deux ans après (2011), au même site, on était témoin de la disparition totale des ruines, par suite des travaux de nivellement du fond de l'oued, par un Bulldozer, afin de mettre en place un ouvrage en gabion pour protéger la route passant à côté (Cl., personnel, 09/04/2011).

Fig. 82. Disparition des ruines de l'oued El-Hammem sous l'action conjuguée de l'Homme et de l'eau.



Photo 56. Photo prise par Mjejri en 2006 sur l'oued El-Hammem, révélant des « pans de murs antiques basculés » dans le chenal d'écoulement (Cl., Mjejri, 2006).



Photo 57. Le même endroit revu par nous-même en 2009. Il s'agit d'un mur antique en place de 3,70 m de hauteur, formé de moellons non équarris liés par un mortier beige. Par comparaison avec la photo de 2006, il ne subsiste plus qu'un seul fragment (1) du mur parmi les trois fragments (1, 2, 3) vus auparavant (Cl., personnel, 21/06/2009).

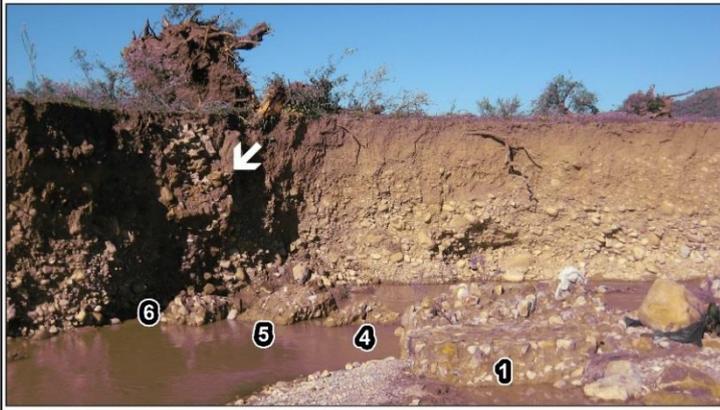


Photo 58. En 2011, trois nouveaux morceaux (4, 5, 6) arrachés du même mur s'ajoutent au fond du lit. Le mur lui-même, étant fortement tronqué par les eaux, ne tardera pas longtemps à disparaître (Cl., personnel, 09/04/2011).

Fig. 83. Des vestiges anciens sur l'oued El-Hammem, livrés au caprice de la nature, sont en voie de disparition.

VII.3.3. L'ancien pont de l'oued El-Meleh à *Simitthus*

Il s'agit des vestiges d'un pont antique repéré dans le méandre du cours aval d'El-Meleh, affluent de la Medjerda, à 1,4 km de sa confluence près du site archéologique de Chemtou, l'antique *Simitthus* (fig. 84). L'ouvrage est inconnu à part une courte mention dans la légende d'une figure réalisée par Gauckler (1899, p. 111 et 113), signalant un « barrage ruiné sur un petit oued ». Il devait se trouver sur le passage de la voie romaine de Carthage à *Hippo Regius* via *Bulla Regia* permettant de franchir le cours d'eau, aujourd'hui large de 18 m et profond de 10 m. Il est presque totalement

en ruine, à l'exception de quelques masses de maçonnerie encore en place dans la berge droite constituées de moellons et de grandes pierres de taille. Les bases de ces constructions sont en proie à une érosion hydrique active causant leur détachement, et dont certains fragments sont encore visibles dans le lit. En revanche, les parties supérieures des ruines sont enfouies sous 5 m d'alluvions ce qui témoigne d'épisodes exceptionnels de sédimentation depuis l'Antiquité tardive.

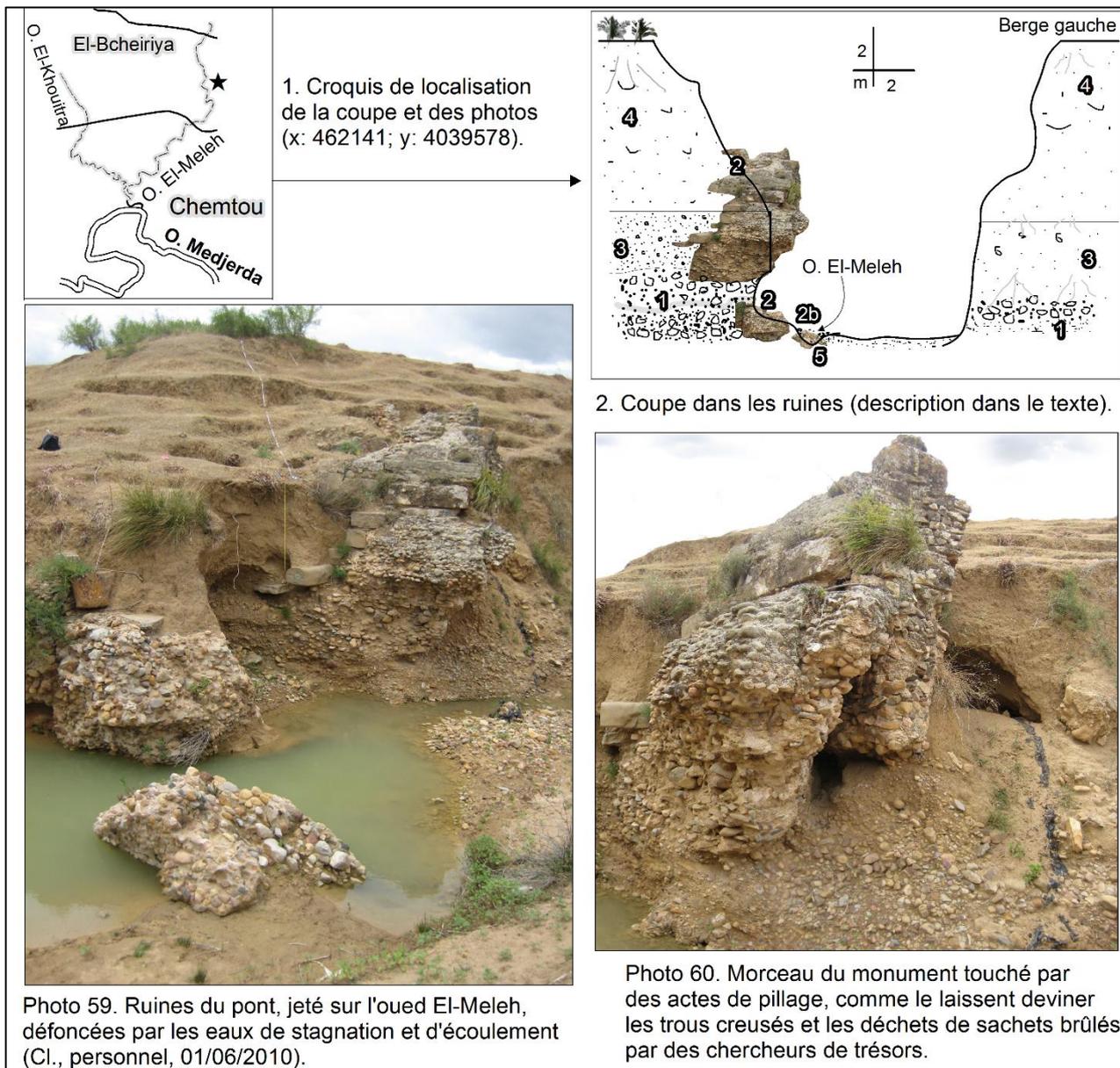


Fig. 84. Des vestiges du pont antique de l'oued El-Meleh à Chemtou soumis à l'action conjuguée de l'eau et de l'Homme.

Légende de la coupe dans fig. 84. 1. Couche pléistocène ; 2. Massif de facture romaine probablement destiné à porter un pont ; 2b. Fragment du pont dans le talweg ; 3. Couche argilo-sableuse de texture fine riche en débris d'escargots d'âge historique ; 4. Alluvions de la terrasse historique supérieure ; 5. Matériel grossier du fond de l'oued en transit.

VII.3.4. Le pont-barrage romain de l'antique *Simitthus*

Il s'agit des ruines du pont dit de Trajan qui enjambe l'oued Medjerda au droit de son passage par le site archéologique de *Simitthus*, la moderne Chemtou. Il fut construit par la légion provinciale de l'empereur romain Trajan en 112 apr. J.-C., comme l'atteste une inscription trouvée par Tissot vers 1859 et exposée actuellement au musée du site (Tissot, 1881, p. 273). Selon l'auteur, la dédicace mentionne également l'établissement d'un pont nouveau sur de nouvelles fondations. Il conclut que les vestiges de l'ancien ouvrage, qu'il date de l'époque des rois numides, donc deux ou trois siècles avant, se trouvent à une cinquantaine de mètres en amont du nouvel emplacement. Bien que rien ne confirme ni n'infirme ce témoignage, il est fort probable que les travaux de réfection effectués étaient en rapport avec une crise hydrologique majeure responsable de la destruction du pont préexistant qualifié de monumental (Tissot, 1881, p.10 ; Cagnat et Saladin, 1894, p. 232). Il comprenait, à l'époque, cinq arches en plein cintre et quatre piles carrées en pierre de taille, avec deux murs de garde distants entre eux de 48 m environ (fig. 85 ; Caillat, 1882 ; Saladin, 1893, p. 32). Son tablier, qui devait être légèrement en dos d'âne, portait une route qui reliait *Simitthus* à la cité de *Sicca Veneria* (Le Kef ; Khanoussi, 1991, p. 835). Mais le monument semble avoir subi d'importants remaniements à différentes époques, comme en témoignent la présence de nombreux matériaux de remploi datant du II^e et du début du III^e siècle apr. J.-C. (Khanoussi, 1988, p. 209). Ils seraient vraisemblablement liés à de grands événements climato-hydrologiques et érosifs survenus dans la région à l'Antiquité tardive, à l'origine de l'effondrement partiel ou total du monument. Aujourd'hui, il n'en subsiste debout qu'une partie du parapet, deux piles, et une seule arche ; la deuxième arcade, vue par Tissot, Cagnat et Saladin au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle, était disparue. D'autres vestiges encombrant le lit de l'oued et masquent partiellement une structure assez conservée à rainures destinées à assurer le jeu de vannes. C'est un moulin à eau servant à broyer le blé, exemple de la technologie antique dans ce domaine, qui fut aménagé au VI^e-VII^e siècle après la destruction définitive du pont (Saladin, 1893, p. 36 ; Chaouali, 2008, p. 136). Ce sont là quelques éléments qui renseignent sur un territoire prospère au temps des Romains, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui puisqu'il est déserté de ses habitants. Ne serait-il pas profitable de tenter de redonner vie à ce milieu chargé d'histoire et de l'intégrer dans un circuit touristique ? (cf. *infra*).

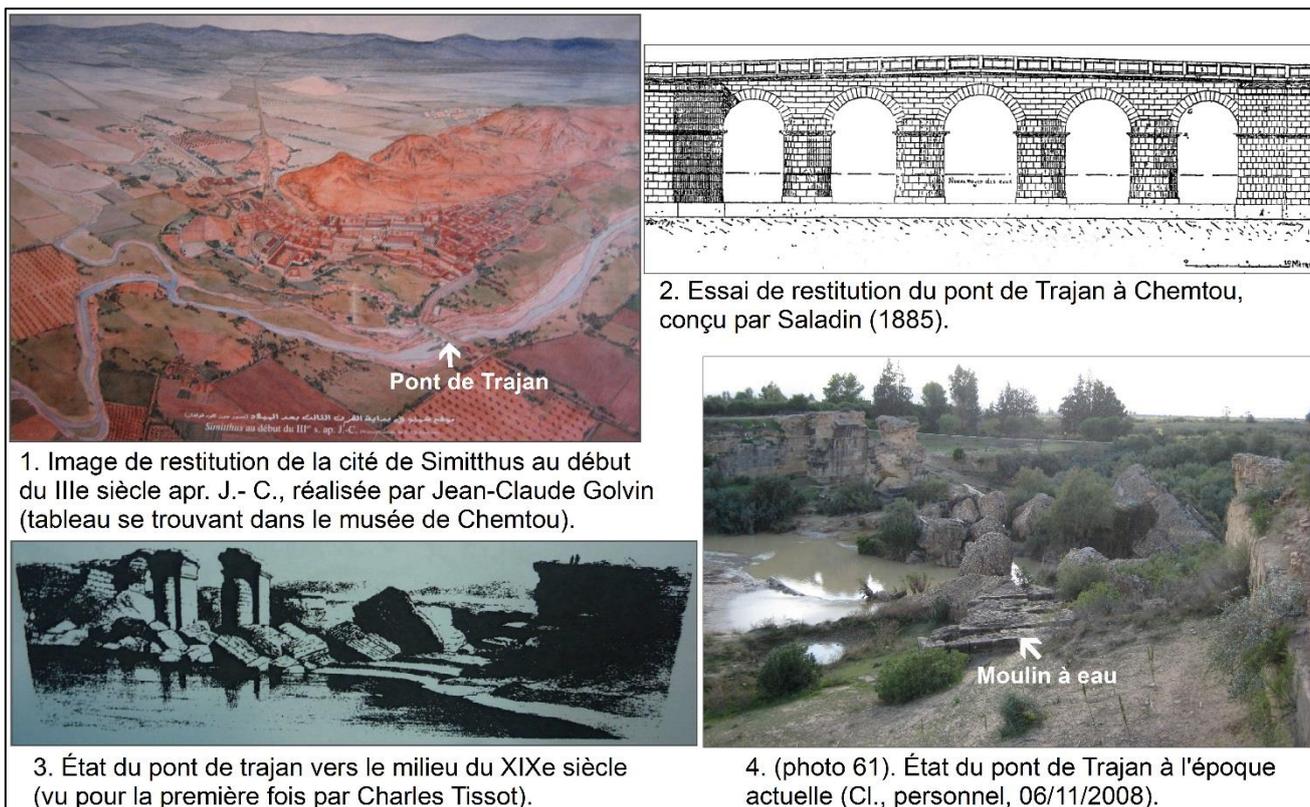


Fig. 85. Le pont-barrage monumental de la ville antique de Chemtou à travers les âges.

VII.3.5. Le pont-barrage de l'antique *Tichilla*

Les ruines de ce monument, cité par les auteurs du XIX^e siècle, se voient le long du talus de la berge droite de l'oued Medjerda à l'actuelle Testour et au milieu du chenal d'écoulement (fig. 86). Elles consistent en un massif de maçonnerie encastré dans la paroi formant probablement la culée du pont et en quelques morceaux de construction, noyés dans l'eau, faite avec des moellons et pierres de taille. Selon Guérin (1862, p. 166) et Carton (1895, p. 91), il s'agit d'un ancien pont dont les soubassements étaient visibles notamment lors des basses eaux. Il reliait la cité romaine à la voie Carthage-*Theveste* sur la rive gauche et à la route menant à *Sicca Veneria* en passant par *Thignica* sur la rive droite (Carton, 1885, p. 91 ; Tissot, 1888, p. 336). Sans doute, aura-t-il souffert des grandes crues survenues pendant l'Antiquité tardive et connu un sort pareil à celui de Chemtou. Après sa démolition, il aurait abrité un moulin actionné par le courant d'eau de l'oued, à l'image de celui de *Simitthus*, interprété à première vue comme « un ancien barrage romain »

(Berbrugger, 1857, p. 385). Les spécialistes parlent même de moulins hydrauliques, compte tenu de l'existence de deux canaux servant à tourner les axes des moulins (Slim et Khanoussi, 1995, p. 29 in Grira, 2015, p. 109). Cependant, il est fort regrettable qu'un monument rarissime de ce genre soit livré à la merci des eaux fluviales et des riverains.



Photo 62. Les vestiges du pont et du moulin hydraulique antiques de Tichilla (Testour), localisés au pied de la berge droite de l'oued Medjerda (Cl., personnel, 12/01/2014).



Photo 63. Le reste de la culée du pont jonché d'ordures ménagères (Cl., personnel, 12/01/2014).

Fig. 86. État des ruines du pont-barrage romain à Testour.

VII.3.6. Le site archéologique de l'ancienne *Abitina*

C'est un vaste site archéologique d'époque romaine, situé sur la rive gauche de l'oued Medjerda à 4 km en amont de la ville de Mjez El-Beb. Il s'appelait *Abitina* ou *Chouhoud el-Batin*, la cité des célèbres martyrs africains, actuellement dénommé Henchir El Blida-El B'harine (Beschaouch, 1976, p. 255). Les ruines s'étendent vers l'est jusqu'à environ 10 m du sommet de la berge et forment un tertre cerné de trois

côtés par des dépôts alluviaux d'âge historique. Certaines structures sont presque couvertes par des alluvions, auxquelles s'ajoutent des champs de cactus épineux qui empêchent même de les observer. Il est clair que le site est laissé à l'abandon ce qui est regrettable vu sa valeur patrimoniale. Les formes de sa dégradation sont multiples et nécessitent une intervention urgente pour le protéger (fig. 87).

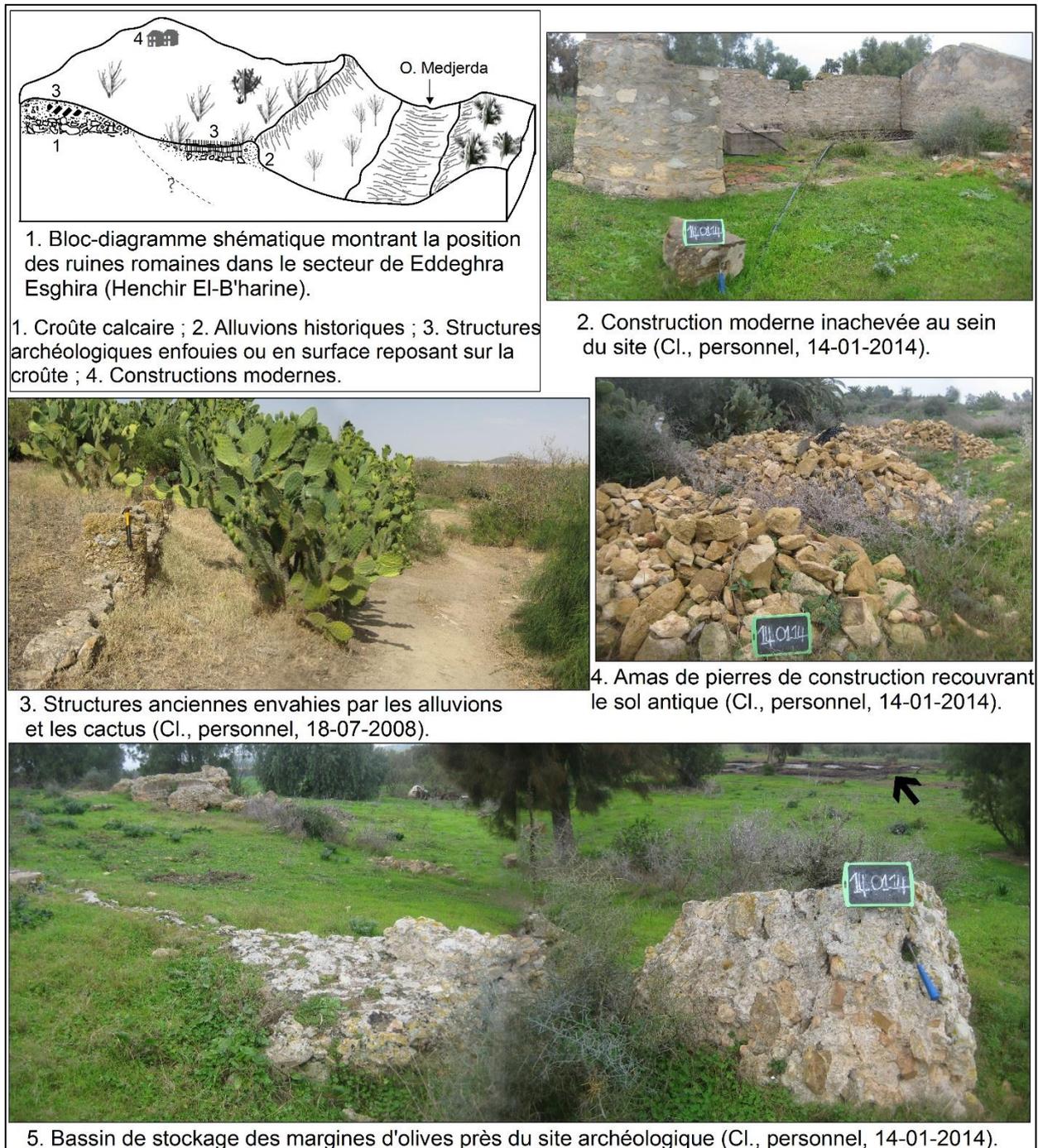


Fig. 87. Le paysage géoarchéologique et ses formes de dégradation dans le secteur de Henchir El-B'harine à Mjez El-Beb.

Conclusions

Les vestiges d'installations antiques repérées au fond des oueds sont parfois d'un grand intérêt pour faire réapparaître des paysages disparus et de redécouvrir la beauté et le prestige des édifices anciens. Mais leur état de dégradation continue, voie de destruction partielle ou totale, d'origine naturelle et anthropique, doit sonner l'alarme afin de prendre des mesures urgentes de protection et de conservation.

Conclusion du chapitre VII

Ce chapitre précise les dynamiques hydrosédimentaires actuelles qui caractérisent les fonds de vallée dans le bassin de la moyenne Medjerda, ainsi que les menaces qui pèsent, de nos jours, sur les ruines archéologiques associées aux cours d'eau. Sur le premier point, il apparaît que le processus de sapement latéral occupe une place prépondérante. Son intensité, révélée d'abord par une analyse synchronique, est globalement modérée. Ceci s'explique par la nature des dépôts cohésifs à dominante essentiellement fine et par l'importance de la couverture végétale rivulaire à effet de peigne et protectrice des berges. Le taux de recouvrement végétal moyen sur les deux rives de la Medjerda, long de 204 km, atteint environ 75 %. De tels résultats sont confirmés par une étude comparative et diachronique, à travers la combinaison de certains paramètres morphométriques, et l'appréciation de l'évolution en plan des oueds. Elle montre que les valeurs du rapport R_c/W varient généralement entre 1,4 et 9,7, dont 65 % des indices sont supérieurs à 3 ce qui suppose des taux d'érosion latérale faibles à moyens pour des méandres souvent matures. Cependant, le recul des berges paraît par endroits actif comme l'attestent les observations de terrain et la vision diachronique des tracés en plan. Dans le secteur d'Oued Meliz-Chemtou en amont (9,52 km), les taux d'érosion moyens annuels calculés entre 1962-1974 et entre 1974-2016 sont respectivement de l'ordre de 4,70 m/an et 1,70 m/an. De même, dans le secteur de Testour-Slougua en aval (10,80 km), les taux d'érosion moyens annuels calculés pour la période 1962-1974 sont très forts. Ils ont atteint 18,29 m/an certainement à cause de l'effet des grosses crues de 1969 et surtout de 1973. Mais pour la période 1974-2016, ils ne dépassent pas 2,55 m/an en raison de

la désorganisation du tracé des eaux fluviales par suite de l'installation de plusieurs ouvrages hydrauliques. Concernant les formes d'érosion linéaire, le processus érosif de suffosion est manifestement actif dans le secteur compris entre Ghardimaou et Jendouba, plus particulièrement entre les localités de Sidi-Meskine et Ouled El'Haj. À cela s'ajoute la dégradation par ravinement due aux effets des eaux de crues agressives et à quelques activités anthropiques dégradantes de l'environnement fluvial (extraction de sable, emploi de motopompes). Certes, la dynamique actuelle des eaux courantes au fond des vallées reste beaucoup plus favorable à l'enfoncement des talwegs, mais la dynamique de remblaiement à l'intérieur du lit fluvial reste parfois considérable. Les dépôts accumulés, sur lesquels poussent la ripisylve favorisant la fixation et le piégeage des sédiments, sont à l'origine du relèvement du plancher alluvial. Sur les berges et les terrains déprimés, l'atterrissement est aussi notable. Les épaisseurs des dépôts déposés varient de quelques millimètres à plus de 2 m, suivant l'intensité des crues et la topographie des lieux. Par exemple, celles mesurées au lendemain de la crue de 2009 sont comprises entre 10 et 20 cm. Le paysage fluvial est finalement très changeant comme le montrent les recoupements des photographies au sol anciennes et récentes. Tout cela a eu en effet des répercussions graves sur le patrimoine archéologique. Certaines structures archéologiques sont aujourd'hui exhumées, tronquées et ennoyées suite au recul des berges ; d'autres sont enfouies sous les alluvions à cause des remblaiements. Il est regrettable de voir des monuments comme le beau pont de *Simitthus* livré à la nature ou bien encore les moulins hydrauliques de Testour et de Chemtou, rares au Monde antique, en proie aux actions des eaux et des Hommes.

Quatrième partie

Le risque d'inondation dans le bassin moyen de la Medjerda aujourd'hui : un phénomène nettement plus fréquent et menaçant que par le passé

Chapitre VIII. Témoignages des archives sur les inondations

**Chapitre IX. Couplage des données de terrain, SIG et télédétection
pour l'analyse et la cartographie des inondations récentes
majeures**

Introduction

Les inondations ont toujours existé dans la moyenne vallée de Medjerda. Les séquelles de ces crises sont là et rien n'est plus significatif que les ponts remployés et les vestiges archéologiques remblayés (Zielhofer et Faust, 2003, p. 212 ; Oueslati, 2005, p. 109 ; Khanoussi, 2008, p. 109). Sans doute, ont-elles joué un rôle bénéfique dans l'histoire du peuplement de la région, par l'amélioration de la fertilité des sols recherchés par les occupants à travers les âges. La région n'était-elle pas réputée pour des latifundia à hauts rendements céréaliers depuis les Carthaginois (Slim, 2008, p. 23), les « Grandes Plaines » de Polybe et d'Appien sous les Romains (Tissot, 1884, p. 62) ou bien encore les grands domaines coloniaux puis de l'agriculture irriguée actuellement (Cherif, 1994, p. 85) ? Or, si l'effet bénéfique des inondations a été toujours agréablement reçu par les riverains, celui maléfique ne leur a apporté que des malheurs et des ennuis. Les données trouvées particulièrement dans les archives textuelles montrent que les ravages étaient souvent épouvantables.

Cet exposé s'attache à examiner deux aspects peu développés ou carrément négligés dans les nombreux travaux déjà publiés (Oueslati, 1999, p. 69 ; Fehri *et al.*, 2008, p. 13 ; Gharbi, 2016, p. 96 et 106 ; Hmercha, 2016, p. 98 et 101) et par la même à éviter de reprendre les écrits qui sont repris dans la plupart des études en question. Le premier aspect porte sur la recherche, dans les documents d'archives, de témoignages éclairant l'ampleur du phénomène d'inondation. L'objectif visé est double : d'une part, dresser un inventaire exhaustif des dégâts et pertes enregistrés ; d'autre part, faire connaître ce triste état de choses souvent occulté. Le second aspect se focalise sur la cartographie des champs inondés pour une sélection de grandes crues. L'approche géomatique et géospatiale associée aux observations de terrain occupe une large place dans cette étude cartographique.

Chapitre VIII. Témoignages des archives sur les inondations

D'abord, il faut dire que les renseignements rassemblés ici sont glanés dans des documents inconnus ou rarement utilisés, notamment avant 1973. Ils sont pour l'essentiel des documents émanant du service des archives nationales de Tunisie. Leur nature est variée : des correspondances adressées par des contrôleurs civils,

des rapports de caïds, des notes et télégrammes, des circulaires et des articles de presse. À cela s'ajoutent des publications de différentes spécialités (géographie, histoire, archéologie) et des rapports internes des services hydrologiques (DGRE, CRDA, DGBTH...). Parallèlement, pour les événements exceptionnels plus récents, on a recours à deux autres types d'informations : celles collectées directement sur le terrain (propos de riverains, recensement, photos d'illustration...) et celles ramassées sur la toile (réseaux sociaux, blogs, journaux électroniques, vidéos...).

À la lecture de ces archives, on note pour davantage de développement les principales constatations suivantes : 1)- la succession rapprochée de 9 crues sérieuses entre 2000 et 2015 provoquant des inondations fâcheuses ; 2)- l'enregistrement de pertes en vies humaines à chaque crue durant 129 ans (1886-2015); 3)- l'enregistrement de dégâts matériels considérables pendant la même période de recherche ; 4)- l'augmentation de souffrances morales, par les temps qui courent, chez les riverains sinistrés.

VIII.1. De fréquents et dangereux débordements

Le dépouillement des différents documents consultés sur près de 130 ans montre que le phénomène d'inondation est assez fréquent (fig. 88). Entre 1886 et 2015, période d'observation, il y a eu 27 crues exorbitantes dont l'amplitude des écarts inter-crue est de 2,86 (tab. 14 de fig. 88). La proportion de celles enregistrées dans l'espace de seulement trois ans puis 2 ans est respectivement 61,1 % et 46,1 % (tab. 15 de fig. 88). Ce caractère répétitif est remarquable au cours des quinze dernières années, si bien qu'entre 2000 et 2015 neuf événements majeurs se sont produits. Leur fréquence de réapparition est de 1 à 3 ans, or 44 % des événements se sont produits sur des années successives (2003, 2009, 2012 et 2015). Les intervalles inter-crues prolongés, compris entre 5 et 15 ans et ceux supérieurs à 15 ans, ne représentent au total que 30,8 % des événements. Cela signifie que les riverains impactés par les crues vivent depuis déjà longtemps au rythme du va-et-vient des eaux d'inondation.

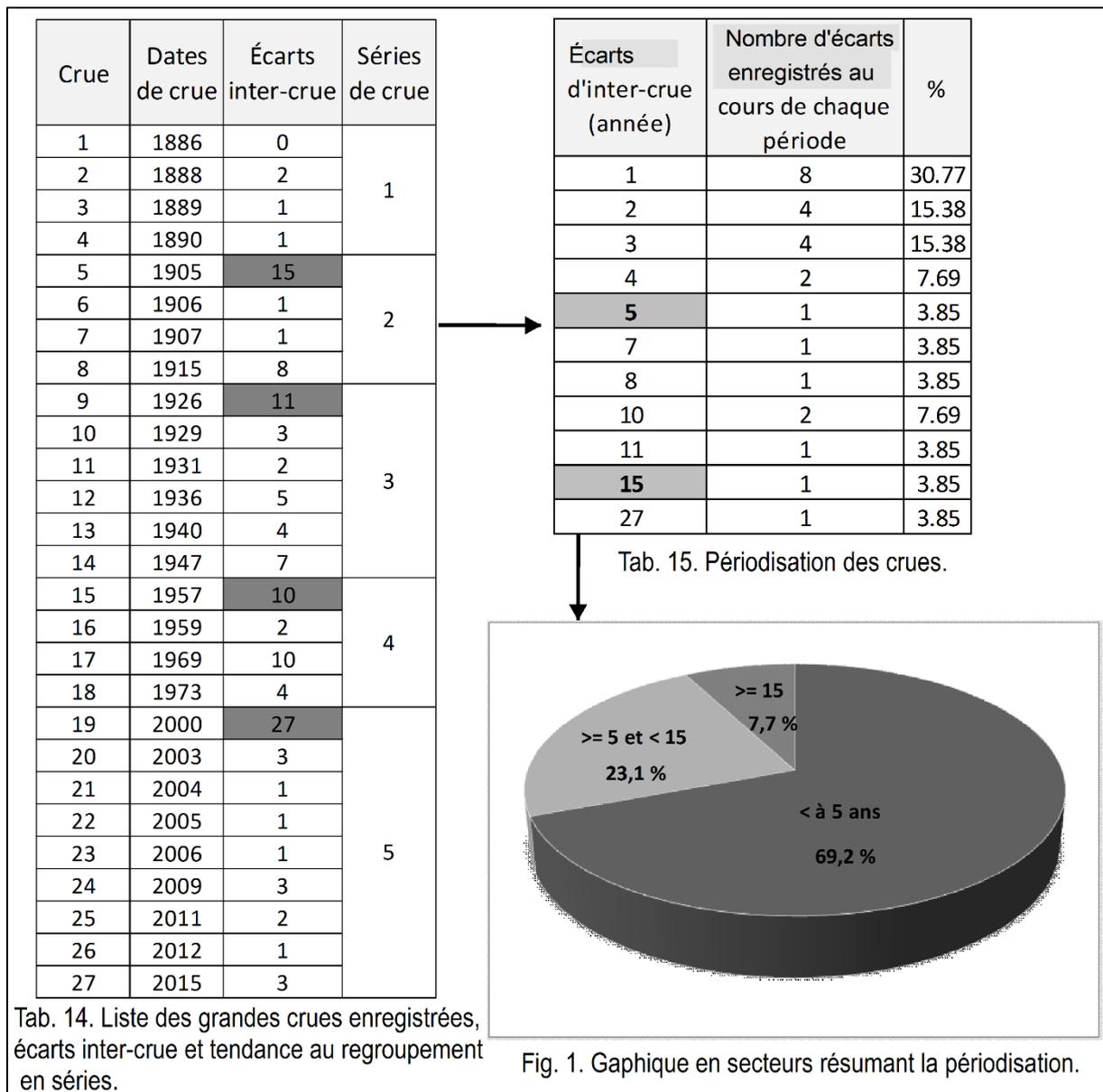


Fig. 88. Les crues dévastatrices survenues dans la moyenne vallée de la Medjerda. Résultats obtenus à partir du dépouillement des archives.

Par ailleurs, d'après les tableaux 16-29 concernant l'inventaire des crues par mois de l'année, mis à part juillet et août, tous les autres mois ont enregistré au moins une fois une grave inondation. Le rapport établi donne l'ordre suivant : janvier (7 crues), février (6), mars (5), septembre-octobre (3), novembre-décembre (2) et avril-mai-juin (1). Ainsi, janvier et février viennent en tête avec un pourcentage de 50 % ; le chiffre s'élève à 58 % pour toute la saison d'hiver.

De plus, la répartition des dates des crues tend vers un regroupement en cinq séries, compte tenu de la succession rapprochée de ces dates et des écarts qui les séparent

(tab. 16-29 et fig. 89). La première série comprend les événements situés entre 1886 et 1890. La deuxième, espacée de quinze ans, commence en 1905 et s'achève en 1915. La troisième, d'amplitude de onze ans, va de 1926 à 1947. La quatrième, qui s'installe dix ans après, s'étend de 1957 à 1973. La cinquième, éloignée de la précédente de vingt-sept ans, est comprise entre 2000 et 2015. Ces constatations semblent aller de pair avec les résultats de notre travail sur la pluviométrie dans la première partie, qui a permis d'identifier cinq épisodes à tendance humide et sèche sur pratiquement la même période d'observation.

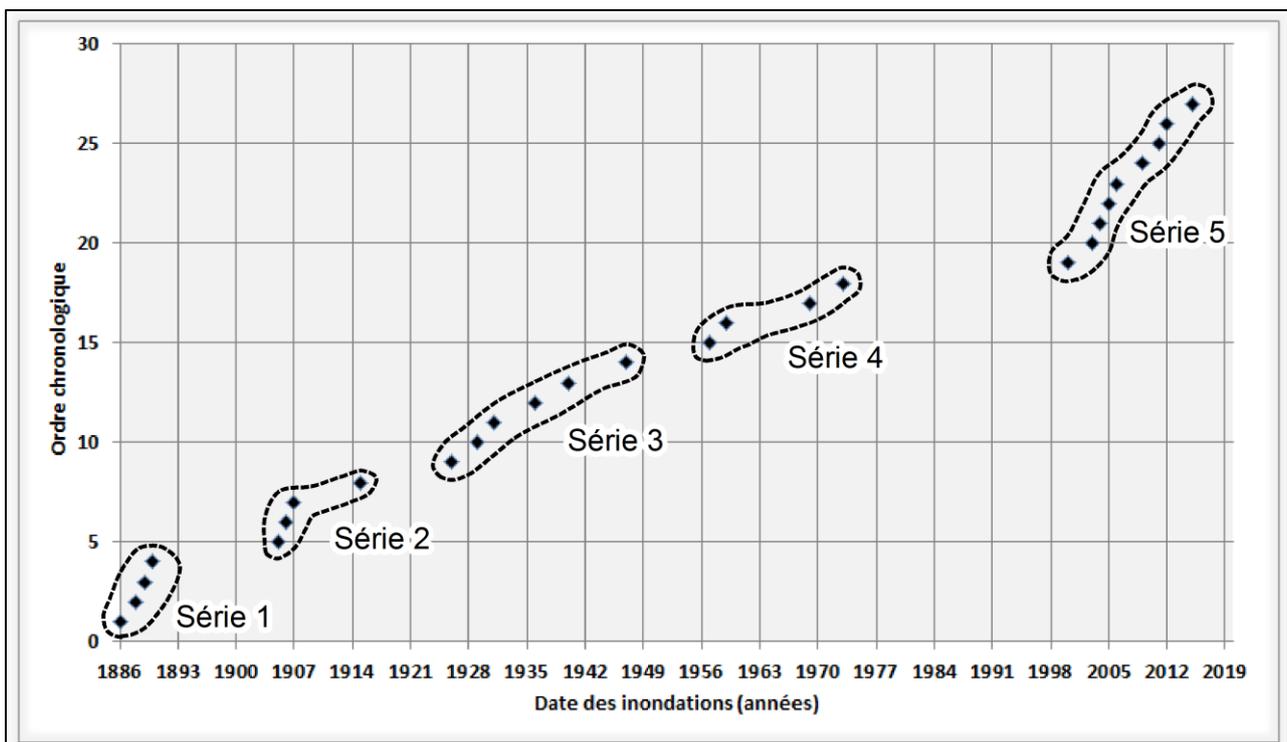


Fig. 89. Distribution des crues et tendance au regroupement en séries

Quoi qu'il en soit, la récurrence du phénomène d'inondation est bien remarquable et touche plusieurs groupes humains. Les illustrations sont nombreuses dont voici quelques-unes. De l'amont vers l'aval, sont présentées celles de Jendouba, de Bou-Selem et de Mjez El-Beb (fig. 90, 91 et 92).



Photo 1. La catastrophe de 1973 : envahissement des eaux de l'oued Medjerda des trottoirs et des voies urbaines (cliché d'un citoyen, 28/03/1973).



Photo 2. L'événement de 2009 : des maisons au quartier Timiry encerclées par les eaux ; les propriétaires étant forcés à se réfugier sur les toits (Cl., personnel, 24/04/2009).



Photo 3. La crue de 2012 : un atelier de marbre au quartier d'El-Hwailiya, presque entièrement submergé (Cl., personnel, 23/02/2012).

Fig. 90. Illustrations de quelques inondations intervenues dans la ville de Jendouba.



Photo 4. La catastrophe de 2003 : le quartier de Diamonta noyé sous une épaisse couche d'eau et de boue (mosaïque de photos extraites d'un enregistrement vidéo d'un citoyen, 2003).



Photo 5. L'événement de 2009 : le lit de la Medjerda à pleins bords (Cl., personnel, 23/04/2009).



Photo 6. La crue de 2012 : vue d'en face du quartier d'El- Khlij cerné par les eaux (Cl., personnel, 24/02/2012).



Photo 7 . L'inondation de 2015 : submersion du quartier de Fattouma Bourguiba (Cl., personnel, 01/03/2015).

Fig. 91. Photos montrant la portée des inondations dans la ville de Bou-Selem.



Photo 8. La grande crue de 1907 : le pont "Andalou" submergé. Au premier plan, des spectateurs massés le long de la rive droite de l'oued Medjerda (carte postale, 17/02/1907).



Photo 9. L'inondation de 1940 : vue d'avion montrant l'ampleur des espaces inondés (archives DRE, 26/01/1940).



Photo 10. La crue de 1969 : des eaux coulant à pleins bords touchant la partie supérieure du pont (archives des SNCFT, ponts et chaussées, 1969).

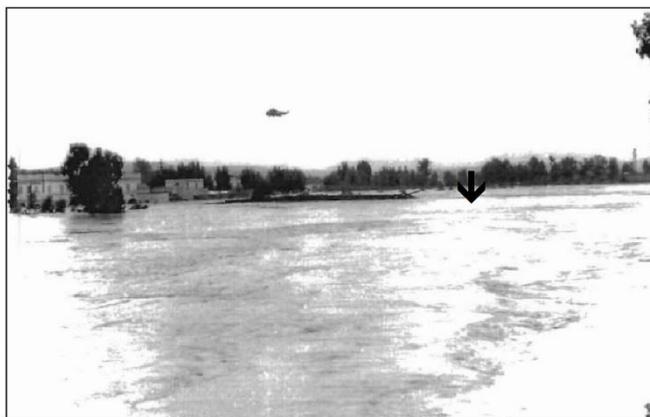


Photo 11. La catastrophe de 1973 : une prise de vue selon un angle pareil à celui de 1907 ; au second plan des opérations de sauvetage par hélicoptère (Cl., Lamachère, 30/03/1973).



Photo 12. L'événement majeur de 2003 : en contrebas du pont, le premier étage du café de Membressa étant sous l'eau (photo de Hatem Amor, citoyen, 21/01/2003).



Photo 13. La crue de 2011 : des débordements gênants privant des écoliers de se rendre en classe et des ouvriers d'aller au travail (Cl., personnel, 03/11/2011).

Fig. 92. La ville de Mjez El-Beb : le même endroit (repère du pont indiqué par une flèche) montré sur un peu plus d'un siècle (1907-2011).

Outre leur caractère fréquent, les crues des oueds sont aussi dangereuses. Le danger provient de la virulence des courants fluviaux surtout avant la mise en eau des grands cours d'eau. Les comptes rendus des envoyés spéciaux des journaux à l'époque sont expressifs à cet égard. Par exemple, on lit dans le journal *La Dépêche Tunisienne* du 15 décembre 1931 qu'à Mjez El-Beb : " *Les eaux roulent avec une vitesse prodigieuse qui rappelle les crues du Rhône. Toute la plaine si fertile est transformée en un lac immense* ". Dans la même publication périodique parue le 12 octobre 1947, on lit aussi que près du village de Souk-el-Arba (Jendouba actuellement) : " *Le Mellègue déborde, il attaque au passage les remblais d'accès d'un pont et les culbute sur quarante mètres et sur une largeur de huit kilomètres, il dévale vers la cuvette de Souk-el-Arba. À certains endroits sa couche dépasse un mètre. Il coupe les routes, couche les poteaux des lignes électriques, s'attaque à la voie ferrée. C'est quatre-vingts kilomètres carrés de terre qu'il recouvre* ". D'autres témoignages existent également dans les archives nationales qui évoquent les caractères de brutalité et de violence des crues funestes (fig. 93). Toutefois, depuis l'endiguement du réseau fluvial principal et surtout après la construction du grand barrage au pays de Sidi-Selem en 1982, les débordements sont plutôt dus à des écoulements lents et surprenants. Cela n'empêche, dans les deux temps avant et après aménagement hydraulique, d'enregistrer des pertes en vies humaines affligeantes et des dégâts matériels lourds.

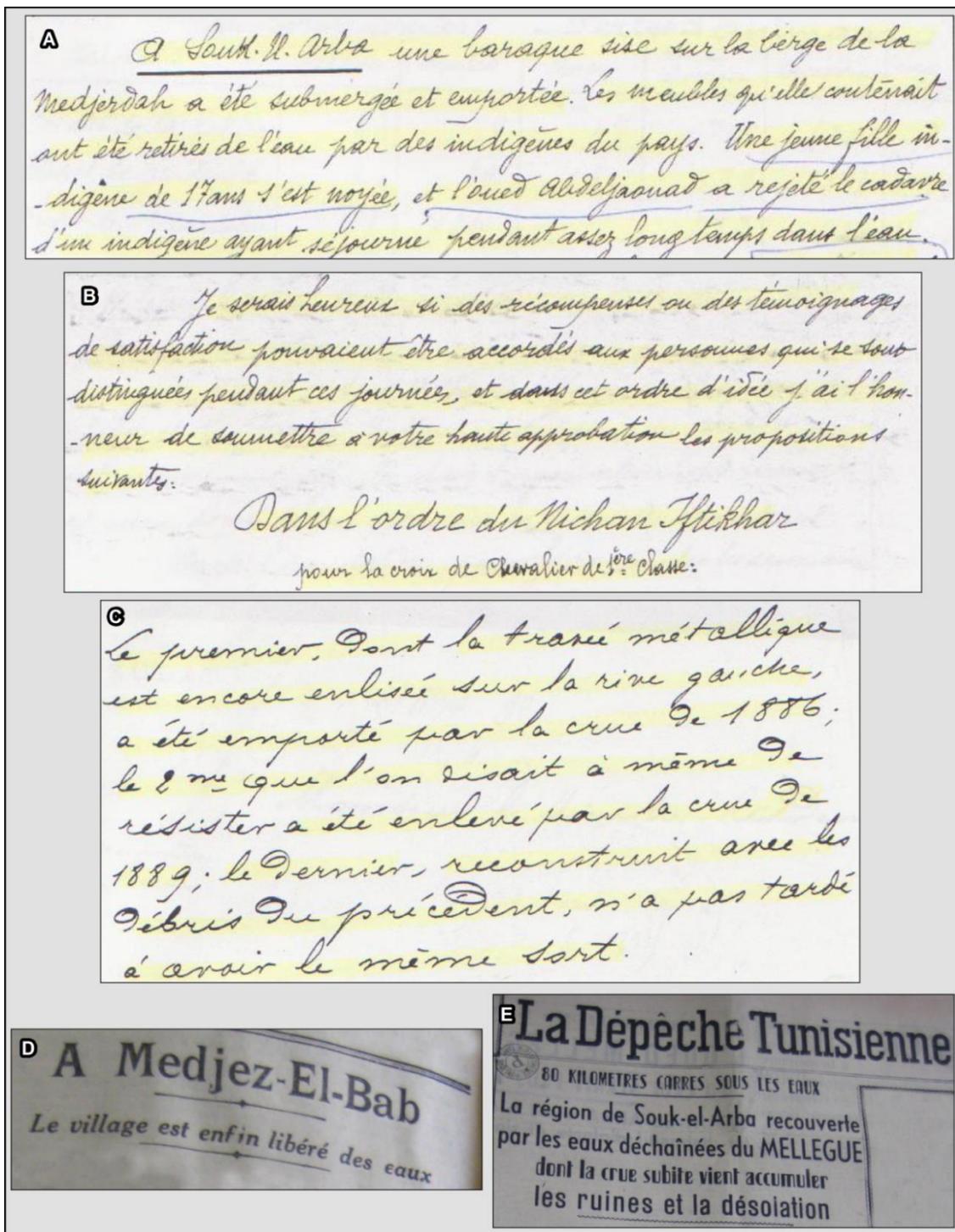


Fig. 93. Exemples de témoignages trouvés dans les archives renseignant sur les inondations enregistrées dans la première moitié du XX^e siècle.

A. Extrait d'une correspondance datant du 6 mars 1907 à propos des pertes générées par l'inondation de cette année à Souk-El-Arba (Jendouba) ; B. Dans le même rapport, pétitions signées par le contrôleur civil de Souk-El-Arba et adressées au Résident général français afin d'accorder des récompenses ou des témoignages de satisfaction aux personnes qui se sont distinguées par leurs actes de courage lors des inondations de février 2007 (la liste qui comprend 15 personnes a été volontairement enlevée) ; C. Passage tiré d'une lettre écrite le 27 mars 1890 dans laquelle le contrôleur civil informe le Ministre Résident de la destruction à trois reprises du pont antique de Chemtou suite à de puissantes crues ; D et E. Titres de la presse quotidienne (dans *La Dépêche Tunisienne* datant du 16-12-1931 et du 12-10-1947) portant sur les événements majeurs de 1931 à Mjez El-Beb et de 1947 à Jendouba.

VIII.2. Des pertes en vies humaines sévères et méconnues

Le bilan total des décès fait état de 131 morts durant la période 1886-2015 (tab. 16-29). Ce bilan concerne uniquement les victimes déplorées dans les secteurs immédiats de la moyenne vallée de la Medjerda. Celles enregistrées dans les régions extrêmes de ladite zone, comme à Tejerouine, à Siliana, à T'borba (cette dernière marque la limite du terrain d'étude avec la basse vallée) ne sont pas ici considérées. Et même si l'on en tient compte, le nombre de disparus reste de loin inférieur à ceux affichés ailleurs. Mais cela ne peut être qualifié que de regrettable puisqu'il s'agit de pertes humaines. En réalité, ces dernières auraient pu être beaucoup plus élevées car les informations relatives aux victimes trouvées surtout dans les archives des journaux sont souvent grossières et entachées d'imprécisions. Voici quelques exemples : dans *La Dépêche Tunisienne* du 9 février 1906 on apprend que "Des indigènes ont été emportés par les eaux " de l'oued Beja mais sans précisions. Dans un télégramme envoyé le 6 mars 1907 par le contrôleur civil de Souk-El-Arba concernant la situation à Ghardimaou, il est écrit " Il est probable que l'on aurait en outre à enregistrer la perte de plusieurs personnes ". Dans le même journal *La Dépêche* daté du 15 décembre 1931, l'envoyé spécial a noté que : " Ces frêles habitations ont très vraisemblablement été emportées par le courant et certains ne peuvent pas être chez eux ". Mais son propos peut également signifier que des propriétaires seraient éventuellement à l'intérieur et auraient ainsi perdu la vie. Cela fait aussi allusion aux exigences de la censure déjà affirmée par écrit postérieurement : " On sait, tout le monde sait qu'il a plu énormément en ce temps-ci en Tunisie. La censure interdit pour des raisons autant que justifiées de publier tout renseignement d'ordre météorologique " (*La Dépêche*, 01-02-1940). Par ailleurs, les descriptions données par les correspondants des journaux quant aux situations parfois navrantes vécues par les sinistrés laissent comprendre qu'il y a eu vraisemblablement des drames humains. Le passage suivant décrivant la situation à Mjez El-Beb pendant l'inondation de 1931 apparaît éloquent : " Ils essayèrent de se sauver mais il était trop tard. Alors dans l'obscurité, on entendait des cris de frayeur, des clameurs de personnes affolées réclamant du secours. Le jour se leva sur un chaos indescriptible. Impossible de joindre les malheureux " (*La Dépêche Tunisienne*, 15-12-1931).

Or, il est à noter qu'après la catastrophe de 1973, les pertes en vies humaines sont devenues assez limitées et ce pour au moins trois raisons. D'abord, l'activité des eaux courantes s'est atrophiée suite à l'endiguement des principaux organismes fluviaux qui les a privés de grands volumes d'eau circulant auparavant librement. Ainsi, les crues se produisant très graduellement peuvent être annoncées relativement tôt à l'avance (fig. 94). Ensuite, les riverains paraissent connaître le danger et s'en prémunissent lors de la montée des eaux (rehaussement des seuils des maisons, refuge sur des toits...). Enfin, il faut mentionner l'amélioration des mesures d'alerte, d'évacuation et de sauvetage au fil du temps à laquelle s'ajoute l'efficacité de la pression médiatique.



Photo 14. Une foule de riverains suivait les progrès de la crue au droit du pont-route GP6. À un certain niveau critique repéré par eux-mêmes sur les piliers, ils savaient d'avance que le débordement aurait lieu (Cl., personnel, 23/04/2009).



Photo 15. Construction de murets devant les boutiques pour parer à l'intrusion des eaux débordantes (Cl., personnel, 24/02/2012).



Photo 16. Des véhicules de la Protection civile devant la municipalité de la ville portant, entre autres, des canots de sauvetage. (Cl., personnel, 13/04/2009).



Photo 17. Des opérations d'évacuation, au quartier Khairiddine, conduites par des unités de l'Armée nationale (Cl., personnel, 25/02/2012).

Fig. 94. Des illustrations sur les préparatifs et les interventions des secours dans la ville de Bou-Selem.

VIII.3. Des dégâts matériels lourds

Rares sont les crues intervenues dans la vallée moyenne de la Medjerda qui n'ont pas entraîné de dommages considérables. Cela s'explique par l'ampleur des débordements des eaux et l'importance des enjeux sociaux. Les documents des archives examinés renferment de nombreux comptes-rendus justificatifs. Voici, à titre d'exemple, deux extraits écrits à l'occasion de l'inondation de 1931 ayant affecté la ville de Mjez El-Beb : *"Le fleuve mettait à découvert un bien triste spectacle ; une boue noire pétrie de paille recouvrait le sol. Les murs des maisons étaient couleur de vase ; des objets emportés par les flots gisaient épars un peu partout"*. Ailleurs, *"Beaucoup de gourbis avaient été emportés par les eaux. Leurs habitants avaient pu se sauver à temps, mais leurs provisions étaient perdues et leurs bêtes mortes. C'était pour beaucoup la ruine complète, la misère"* (*La Dépêche Tunisienne*, du 16 et du 19 décembre 1931). De ce fait, les dégâts sont variés et touchent aux biens mobiliers et immobiliers, au cheptel, aux récoltes ainsi qu'aux différentes infrastructures (tab. 16-29). Souvent, le coup le plus dur est porté aux objets mobiliers généralement abîmés, parmi eux des objets irréparables (meubles en bois déformés et dégageant pour toujours une mauvaise odeur...), documents inestimables (albums de photos, papiers privés...). En réalité, ces dommages sont inévitables car les riverains ont très peu de temps et de moyens pour faire en sorte que leurs biens soient partiellement touchés par les eaux d'inondation qui dépassent parfois les châssis des fenêtres (fig. 94). Les propriétés bâties subissent elles aussi des avaries multiples : destruction des maisons frêles, dépréciation des logements en terme monétaire, humidification à l'origine des problèmes sanitaires. Citons par exemple la destruction de 1167 habitations en 1973 dans la région de Beja-Jendouba ainsi que l'endommagement de 5000 maisons et 1000 entrepôts en 2003 dans la ville de Bou-Selem (Lahmar, 2005, p. 60). D'autre part, plusieurs centaines d'hectares sont quasiment soustraits au bilan de la récolte tous les deux ou trois ans, à cause de la stagnation prolongée des eaux en surface ou à proximité de la surface et du recouvrement des sols des exploitations agricoles par d'épaisses couches d'alluvions. C'était déjà le cas en 2000 et 2003, deux années qui se sont soldées par la perte de 2170 ha puis 10.000 ha appartenant respectivement à 1380 et 1426 agriculteurs dans les plaines de Ghardimaou et Sidi-Selem. Plus récemment, en 2009, 2012 et 2015, la région de Mjez El-Beb a perdu en moyenne chaque année 1700 ha de terres cultivées auxquels se joignent d'importants préjudices matériels infligés aux différents équipements de

production (groupes-motopompes, ouvrages d'irrigation et de drainage...). Du reste, les voies de communication routière et ferroviaire ainsi que les ponts établis sur les nombreux cours d'eau n'échappent pas souvent au même sort. Ces dommages s'entremêlent avec d'autres préjudices d'ordre économique et social (isolement de la population, suspension des activités quotidiennes...).



Photo 18. Le pont romain de Chemtou ruiné sous l'effet des crues répétées de l'oued Medjerda (Cl., 31/03/2013).



Photo 19. Environ 16 ha de céréales perdues par asphyxie dans le petit village d'El-Melga à Jendouba (Cl., personnel, 05/05/2009).



Photo 20. Une maison au quartier Fattouma Bourguiba (Bou-Selem) qui baigne dans l'eau. Sur le toit quelques biens mobiliers sauvés à temps! (Cl., personnel, 24/02/2012).



Photo 21. Des édifices à Mjez El-Beb envahis par les eaux boueuses (Cl., personnel, 03/11/2011).

Fig. 95. Images montrant la nature des dommages causés par les crues.

VIII.4. Des effets pernicious tangibles

Les crues, par la violence qu'elles incarnent, suscitent aussi des émotions fortes chez les riverains lésés. Ce sont des états de malaise, d'agitation, de peur, d'énervement voire de colère qui précèdent et suivent la crise. Déjà, on trouve mention de tels comportements dans les anciens articles de presse relatifs aux événements majeurs du premier tiers du vingtième siècle. Dans un article paru dans *La Dépêche Tunisienne* le 19 février 1907, l'envoyé spécial du journal à Bou-Selem a écrit : "*Cet événement a jeté la désolation dans une population extrêmement éprouvée par tant de désastres*". Celui dépêché sur le lieu de Mjez El-Beb a publié le 15 décembre 1931 dans le même journal : "*Les mots sont trop faibles nous dit un colon pour exprimer toute l'horreur qui s'est dégagée de la scène tragique au moment où le fleuve bondissant est sorti de ses rives*". Le lendemain, il a écrit : "*Les réfugiés, sont dans un bien triste état. Encore mal remis de leur détresse, certains d'entre eux circulent dans les rues. Les traits défaits, le visage hâve, souillés de vase jusqu'au-dessus du genou, ils attendent le moment où ils pourront regagner leurs habitations non pas pour se reposer, ce serait trop beau, mais pour essayer de réparer le désastre*". Aujourd'hui, presque les mêmes scénarios se suivent et se répètent dont voici quelques témoignages, fruit de multiples observations de terrain et entretiens avec les riverains. D'abord, les habitants, devenu particulièrement excités par le mot inondation, ne semblent pas vivre tranquilles même en période de calme hydrologique. Les traces de la montée des eaux encore sur les murs, les nombreux écriteaux "maison à vendre" et les propos désespérants des gens sont autant d'indices significatifs (fig. 95). Ils pensent périodiquement au prochain événement et au coût des dégâts et des réparations attendus. Lorsque la crue s'annonce, ils se trouvent livrés à une grande agitation. Certains d'entre eux se dirigent vers les lits des oueds pour suivre les progrès de l'inondation, d'autres s'occupent à construire des murets ou à mettre des sacs de sable devant les bâtisses, beaucoup d'autres s'activent à déplacer les biens précieux vers des lieux plus sûrs. L'intrusion des eaux dans les habitations amène ensuite des sentiments de peur principalement chez les personnes fragiles. La situation s'aggrave lorsque ceci se passe la nuit comme c'était le cas en 2000, 2003 et 2015. Ainsi, des familles entières, tenues éveillées jusqu'au matin, sont restées bloquées dans de mauvaises conditions en attendant l'intervention des secours. Ce phénomène d'isolement peut durer des jours d'affilée et touche notamment les occupants installés dans les boucles de méandres. Cela s'est

manifesté plus d'une fois dans les localités de Hinchir Echchat et de La'achaichiya à Jendouba, d'El Ghraba au Nord de Bou-Selem et d'El Matiss à l'Est de Mjez El-Beb. Dans les villes s'offre d'habitude un morne paysage dominé par de l'eau boueuse mêlée avec des immondices de toutes sortes (fig. 96). Il est évident que le rythme normal de vie est ici et là paralysé : des établissements scolaires et sociaux fermés, des services domestiques (d'électricité et de distribution d'eau potable) interrompus, des trafics routiers suspendus. Après la décrue, recommencent les mêmes tâches ennuyeuses et coûteuses d'assainissement des terrains, d'enlèvement des ordures et de désinfection ou réparation des maisons. Dans les champs cultivés, c'était bien toujours la ruine : les récoltes perdues et la fortune changée en quelques heures. Mais il est à noter que finalement, malgré tous ces dangers et problèmes, les zones inondables dans la région d'étude demeurent attractives ; si bien que les appels (simples ou forcés) des autorités à un relogement des sinistrés ont généralement abouti à l'échec. Et même ceux qui l'ont accepté à contre cœur n'ont pas tardé à revenir à leurs domiciles. Les explications se trouvent dans les attaches familiales, les habitudes scolaires et la proximité des lieux de travail.



Fig. 96. Quelques situations navrantes vécues par la population de Jendouba, de Bou-Selem et de Mjez El-Beb à l'occasion des inondations.

Conclusion du chapitre VIII

L'examen des archives nationales et des documents photographiques anciens et récents a permis d'établir la chronologie des apparitions d'inondations majeures dans la moyenne Medjerda et d'apprécier leurs manifestations. Il s'avère que le phénomène d'inondation dans la région est plus pesant qu'on ne le pensait réellement, vu le manque d'informations dans la littérature. Outre les grandes crues enregistrées après 1973 et qui sont les mieux connues, de nombreuses crues fâcheuses se sont également produites avant cette date. Au total, vingt-sept événements exceptionnels ont eu lieu entre 1886 et 2015, soit un écart inter-crue moyen de 4,77 ans. La répartition des dates des événements répertoriés révèle une tendance au regroupement en cinq séries de crues. Contrairement aux trois premières séries, les deux plus récentes (1957-2015) correspondent à la période post-barrages édifiés sur les principaux organismes fluviaux. Cela signifie que, malgré la régulation du régime hydrologique par des barrages écrêteurs, le phénomène d'inondation est toujours présent voire plus fréquent surtout entre 2000 et 2015. Au cours de cette période, neuf crues exorbitantes se sont produites avec une fréquence d'apparition élevée de 1,66 ans. Au caractère récurrent s'ajoute aussi le caractère imprévisible des crises pluvio-hydrologiques qui se sont déroulées pratiquement dans tous les mois, exceptés juillet et août. Sur le plan des pertes en vies humaines et des dégâts matériels, le bilan est souvent lourd. On a dénombré 131 morts (1886-2015) mais le nombre réel de victimes est sans doute supérieur. Les dommages aux biens matériels sont généralement considérables, parfois inestimables, et difficilement supportables. Or, les débordements ne sont pas le seul risque auquel les riverains se sentent soumis. Pour beaucoup, l'envahissement des eaux amène aussi l'émotion, la peur et laisse sur eux une empreinte profonde.

Tab. 16-29. Inventaire des inondations mémorables, des pertes en vies humaines et des dommages occasionnés depuis l'Antiquité, dans la moyenne vallée de la Medjerda.

Date de l'événement	Faits et effets
Antiquité romaine	- Pont de la Medjerda à Chemtou : destruction du pont antique de Trajan à trois reprises sous l'effet des grandes crues survenues (Khanoussi, 2008, p. 109).
112 apr. J.-C.	- Chemtou : destruction du pont antique. Un texte épigraphique (CIC, VIII, 10117) évoque sa reconstruction depuis les fondations sous le régime de l'empereur Romain Trajan (Lassère, 2005, p 530-531).
812 hégires (1312)	- Bassin-versant de l'oued Medjerda : les eaux ont emporté des oliveraies, des habitats et des biens divers (Abu-l-Qāsim ibn Ahmed al-Balawī at-Tūnusi, auteur du Moyen Âge, édition 2002, p. 313).
1700	- Régions du Nord : des dégâts catastrophiques ont complètement ravagé les vastes terrains agricoles à la suite de grandes perturbations météorologiques : tempêtes de pluies avec des vents très forts (Kallel et Benzarti, 1990, p. 15).
1726	- Bassin-versant de l'oued Medjerda : " <i>Au début de cette année (1139 H/1726), la pluie tomba pendant cinq mois d'une façon continue</i> " ; dégâts parmi les récoltes (Ben Youssef, p. 445).
1761	- Bassin-versant de l'oued Medjerda : " <i>Du mois d'août 1174 au mois de mai 1175 H/ 1761-1762, c'est-à-dire depuis l'époque de la moisson jusqu'au printemps, la pluie tombe sans discontinuer (...), les aires furent submergées et les grains se gonflèrent et furent perdus ; bien peu de cultivateurs eurent une récolte épargnée par l'eau</i> " (Ben Youssef M.S., p. 445).

Hiver 1886	- Medjerda - Chemtou : le pont de Chemtou emporté par la crue (ANT, 1890, série E, carton 233, N° 447, p. 2) ; la circulation a été interrompue durant plus de 3 mois entre la Tunisie et l'Algérie (Cagnat et Saladin, 1884, p. 221).
Septembre 1888	- Oued Mellègue : 1 mort à l'oued Gefra, affluent de l'oued Mellègue (série E, carton 226, dossier 3/1, 1885-1891). - T'borsok-Oued Tibar-Oued Arkou : 21 personnes décidées ; un tronçon de la voie ferrée emporté par les eaux ; une centaine de bœufs perdus (série E, carton 226, dossier 3/1, N° 289).
Janvier 1889	- Chemtou : le pont de Chemtou emporté par les eaux pour la deuxième fois (ANT, 1890, série E, carton 233, N° 447, p. 2). - Souk El Khémis (Bou-Selem) : débordement au niveau du marché à la faveur d'un ancien lit de l'oued Medjerda ; extension des eaux sur 2 km de long et 250 m de large (série E, carton 226, dossier 3/1, 1885-1891).
27 mars 1890	- Chemtou : Le pont de Chemtou emporté pour la troisième fois (ANT, 1890, Série E, Carton 233, N° 447, p. 2). *Grandes pluies, la plus forte crue observée le 27 mars ; pont de Chemtou emporté (Narcisse, 1893 ; p. 16-17). - Souk El Arba (Jendouba) : cavalier et monture noyés au droit de l'oued El-Meleh (<i>La Dépêche Tunisienne</i> le 28-03-1890). - Oued Beja : une femme morte par noyade à la hauteur de l'oued Beja (<i>La Dépêche Tunisienne</i> le 28-03-1890).
11-15 décembre 1905	- Ghardimaou et Bou-Selem : des pluies considérables, des dégâts importants enregistrés (ANT, 1905 série E, carton 226, dossier 1/9).

8-11 février 1906	<p>- Ghardimaou : une violente tempête survenue ; toutes les communications sont à peu près interrompues ; les oueds sont infranchissables (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 09-02-1906).</p> <p>- Bou-Selem : les habitants du centre-ville complètement cernés par les eaux ; 2 indigènes ensevelis sous les décombres de leurs maisons (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 12-02-1906).</p> <p>- Pont de Trajan-Oued Beja : des indigènes emportés par les eaux, un mort au droit de l'oued Beja ; des troupeaux noyés ; des dégâts sérieux sur la route du pont de Trajan ; la route du Munchar emportée (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 09-02-1906).</p> <p>- Mjez El-Beb : Le contrôle de Mjez El-Beb entièrement inondé, 80 cm hauteur des eaux ; des opérations de sauvetage ; beaucoup de dégâts sont signalés (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 10,12 et 13 février 1906).</p>
Février 1907	<p>- Ghardimaou : mort de plusieurs personnes ; 4 rescapés ; 150 ha de récoltes perdues ; 9023 têtes de bétails perdues ; des dégâts estimés à 3000 francs environ (série E, carton 226, dossier 1, pièce 44, 09 mars 1907).</p> <p>- Jendouba : 2 disparus ; 3433 têtes de cheptel perdues ; 750 ha de récoltes perdues (ANT, série E, carton 226, dossier 1, 09 mars 1907).</p> <p>- Bou-Selem : un mort ; 2 femmes disparues à Bir Lakhdher ; 2705 têtes de bétails perdues ; 110 ha de récoltes endommagées ; (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 19-02-1907 et ANT, série E, carton 226, dossier 1, 09 mars 1907).</p> <p>- Oued Arkou (T'borso) : un mort à l'oued Arkou (ANT, série E, carton 226, pièce 66, 18-02- 1907).</p> <p>- Mjez El-Beb : 1 colon et 3 enfants ont failli mourir ; 641 indigènes et 610 européens gravement touchés par les débordements du 16 au 18 février 1907 (ANT, série E, carton 226, dossier 1 ,1907).</p>

Janvier-février 1915	<ul style="list-style-type: none"> - Ghardimaou : 9269 têtes de bétail perdues (ANT, série E, carton 226, dossier 1/15, pièce 112, 1915). - Jendouba : 4996 têtes de bétail disparues (ANT, série E, carton 226, dossier 1/15, pièce 112, 1915). - Mjez El-Beb : 16616 têtes de bétail perdues (ANT, série E, carton 226, dossier 1/15, pièce 112, 1915).
Juin 1915	<ul style="list-style-type: none"> - Jendouba : pluie importante enregistrée le 5 juin, moisson touchée (ANT, série E, carton 226, dossier 1/15, pièce 10, 1915). - Oued Khalled à Siliana et Oued Jedra à Testour : crue le 5 juin 1915 à l'oued Jedra près de Testour, débordement de l'oued Khalled, pont sur l'oued Khalled emporté par les flots pour la deuxième fois après la grande crue du 20 janvier (ANT, série E, carton 226, dossier 1/15, pièce 10, 1915).
28 septembre 1926	<ul style="list-style-type: none"> - Jendouba : extension des eaux de débordement sur 8 km de large (Bonniard, 1934, p. 158).
Fin mars 1929	<ul style="list-style-type: none"> - Amont de T'borba : une famille, composée du père, de la mère et de 7 enfants, disparue ; digue renversée ; plusieurs sinistrés ; circulation interrompue (<i>La Dépêche Tunisienne</i> le 20-03-1929). - Jendouba, Bou-Selem et Mjez El-Beb : du 25 au 27 mars d'énormes quantités de pluies ont été enregistrées ayant donné de fortes crues (Bonniard F., 1934, p. 265).
Décembre 1931	<ul style="list-style-type: none"> - Ghardimaou : pluie continue depuis 4 jours ; l'oued Soufi s'est étalé sur 1km de large le long de la rive gauche de l'oued Medjerda ; des fermes et des douars isolés ; interruption de communications (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 18-12-1931, p. 4).

	<p>- Mjez El-Beb : une femme morte ; débordement causant partout des dégâts importants ; le niveau d'eau atteint généralement le rez-de-chaussée des maisons et presque le plafond des locaux commerciaux ; gourbis emportés par les eaux ; sauvetage de plusieurs familles (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 15-16 et 19 décembre 1931, p. 2).</p> <p>-Testour : l'eau atteint 1,80 m ; mise en place d'une couche de boue de 40 à 50 cm d'épaisseur (Id., 19-12-1931).</p>
Novembre 1936	<p>- Bou-Selem : la localité d'El Berdaa encerclée par les eaux d'une hauteur de 2 à 2.5m; la voie ferrée de Sidi-Smail-Nebeur au km 137 couverte par les eaux sur une longueur de 800 m ; circulation interrompue (ANT, 16-11-1936, série SG2, carton 86, pièce 29).</p> <p>- Mjez El-Beb : la femme d'un colon emportée par les eaux de l'oued Lahmar, son enfant sauvé par son mari (Id. 16-11-1936, pièce 23).</p>
16 janvier 1940	<p>- Ghardimaou : un indigène noyé dans l'oued Essoufi ; dégâts importants sur les olivettes et les routes (ANT, série SG2, carton 86, pièce 51 écrite le 27-01-1940 ; <i>La Dépêche Tunisienne</i>, 30-01-1940, p. 2).</p> <p>- Jendouba : circulation routière interrompue (ANT, série SG2, carton 86, pièce 40, 26-01-1940).</p> <p>- Bou-Selem : 8 morts, le père, la mère et les six enfants suite à l'effondrement de leur maison à Balta (ANT, série SG2, carton 86, pièce 31 écrite le 16-11-1940 ; journal <i>Le Petit Matin</i> du 20-01-1940).</p> <p>* dans la ville, douar El Berdaa encerclé et isolé par les eaux ayant atteint par endroits 2 à 2,5 m de hauteur ; six gourbis écroulés sous l'action de l'eau (ANT, série SG2, carton 86, pièce 45 écrite le 26-01-1940).</p>

<p>Octobre 1947</p>	<p>- Jendouba-Oued Mellègue : 15 morts, 80 km² de terres inondées ; 1,80 m niveau d'eau au droit de l'oued Mellègue et 1 m au voisinage de la ville de Jendouba ; routes coupées, poteaux de lignes électriques couchés et voie ferrée localement abîmée (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 12-10-1947).</p> <p>- Bou-Selem : 20 000 ha de terres environ sous l'eau ; dégâts aux biens et au bétail considérables ; voie ferrée endommagée et coupures entre Bou-Selem et Sidi Smaïl (Id. 12-10-1947, p. 9) ; 1,5 m environ hauteur d'eau (Berkaloff, 1947).</p> <p>- Mjez El-Beb : 6 morts (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 12-10-1947).</p>
<p>Octobre 1957</p>	<p>- Oued Sarrat : destruction de deux ponts ferroviaires ; écroulement de deux autres ponts-routes (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 17-11-1957).</p> <p>- Mjez El-Beb : "<i>une auto de louage et ses occupants ont disparu</i>" (chauffeur et trois passagers) ; sept voitures emportées par les eaux : une maman et ses 2 jeunes enfants noyés, 1 mort trouvé à Grich El-Wed ; 7 morts ; Trois blessés ; plusieurs voitures et cars bloqués ; le centre-ville de Mjez El-Beb isolé ; 2 ponts emportés au niveau de Borj Ettoumi ; des dégâts matériels extrêmement importants aux routes et aux voies de chemin de fer (Id., 17-11-1957).</p>
<p>Mars 1959</p>	<p>- Slouguia : 1 mort (<i>La Dépêche Tunisienne</i>, 15-03-1959).</p> <p>- Mjez El-Beb : 1 m d'eau au niveau de l'ancien siège du contrôle civil ; débordements importants ; le centre de la ville encerclé par les flots ; voies de communication coupées en plusieurs endroits ; "<i>les cultures ont gravement pâti dans le vaste secteur inondé</i>" (Id. 1959).</p>

<p>Septembre- octobre 1969</p>	<p>- Jendouba : des dégâts matériels : routes coupées, ponts écroulés et bétails emportés (<i>La Presse de Tunisie</i>, 29-30 septembre 1969).</p> <p>-Tessa- l'oued Siliana-Testour : le pont de Testour sur MC56 emporté ; pont de l'oued Siliana GP5 emporté, pont-route GP5 sur l'oued Tessa emporté (ANT, 1969, code 2653).</p>
<p>Mars 1973</p>	<p>- Délégation de Jendouba : "<i>la ville entièrement inondée, localement sous environ 50 cm d'eau, par un débordement rive droite</i>" (Claude et Francillon, 1977, p. 44).</p> <p>* Evacuation de 250 personnes de douar El Aouarchia à Jendouba (<i>La Presse de Tunisie</i>, 30-03-1973, p. 8).</p> <p>- Ghardimaou-Jendouba-Bou-Selem : puits comblés ou détériorés, groupes-motopompes et canalisations endommagés, totalement détruits ou emportés par les eaux ; bâtiments d'exploitation endommagés ainsi que les équipements de production (CRDA Tunis, 1973, code 50308, p. 2).</p> <p>- Ghardimaou : des débordements importants dans la plaine au niveau de la localité de l'oued Meliz (Claude et Francillon, 1977, p. 44).</p> <p>- Bou-Selem : "<i>survolant Bou-Selem, on remarque que la localité est isolée</i>" (<i>La Presse de Tunisie</i>, 30-03-1973, p. 8).</p> <p>- Gouvernorat de Jendouba : 22 morts ; 10000 sinistrés, 63 habitations détruites et des taudis emportés par les eaux ; 4253 pieds d'oliviers arrachés ; 46 ha de cultures céréalières affectées ; 2600 sinistrés hébergés sous les tentes (<i>La Presse de Tunisie</i>, 30-03 et le 03-04 1973).</p>

Le coût total des dégâts dans l'infrastructure et la production agricole a été estimé à 237,198 dinars (CRDA Tunis, 1973, code 50308, p. 4).

- **Gouvernorat de Beja** : 16 disparus ; 5552 sinistrés à l'exception de Mjez El-Beb ; 1104 habitations détruites ; 357 têtes de bétail perdues (*La Presse de Tunisie*, 30-03 et 03-04 1973).

* Photos montrant "*pont voie ferrée partiellement détruit et voie ferrée affouillée dans la région de Sidi-Selem-Pont Trajan*" (ORSTOM, Tunis, 1973, p. 106).

⇒ Le coût total des dégâts dans l'infrastructure et la production agricole a été évalué à 587,305 dinars (CRDA Tunis, 1973, code 50308, p. 4).

-**Testour-Slougua** : l'ancien pont-route métallique de Slougua a été détruit par effondrement de la pile centrale (Claude et Francillon, 1977, p. 46).

* Entre Testour et Slougua, l'épaisseur des alluvions a dépassé 2 m (Claude et Francillon, 1977, p 50).

* Illustrations sur d'importants débordements à Slougua (ORSTOM, Tunis, 1973, p 31).

*Photo montrant un "puits de 13 m comblé par les alluvions en amont de Slougua (de nombreux autres puits sont dans le même cas)" (ORSTOM, Tunis, 1973, p. 116).

- **Mjez El-Beb** : "*les eaux ont atteint plusieurs mètres de hauteur causant d'importantes pertes matérielles*" (*La Presse de Tunisie*, 3 avril 1973).

* Groupes motopompes, équipements et accessoires emportés par les eaux (CRDA Tunis, 1973, code 50308, p. 3).

* Les localités de Mjez El-Beb, Borj Ettoumi et l'amont de T'borba ont été largement inondées (Claude et Francillon, 1977, p. 45).

	<p>* Le pont andalou classé monument historique a été submergé et endommagé (Claude et Francillon, 1977, p. 46).</p> <p>* "On estime qu'en six jours 29,2 millions de tonnes seraient passées à Mjez El-Beb, ce qu'on peut comparer à la moyenne annuelle, évaluée à 21,5 millions de tonnes" (Bomer et Naoui, 1990, p. 44).</p> <p>* Au lieu-dit Sidi Midyen : 3500 sinistrés (<i>La Presse de Tunisie</i>, 03-04-1973).</p> <p>⇒ En somme : la superficie des terrains inondés en 1973 dans les agglomérations de Ghardimaou et T'borba est d'environ 234 km² (DGBTH, 1973 ; Lahmar, 2021).</p> <p>* La brigade mondiale a massivement participé aux opérations de sauvetage et de secours. Au total 39 hélicoptères ont évacué les sinistrés et porté secours aux personnes isolées (29-03-1973).</p>
Mai 2000	<p>- Jendouba : débordements au droit de l'oued Mellègue en direction des plaines de Saâda, Echchorfa, Ouseltia et la route GP6 à l'aval du pont Cinq dinars (Balti, 2000, p. 3).</p> <p>* La hauteur de l'eau atteinte est comprise entre 0,75 m et 1,75 m (Balti, 2000, p. 6 et 7).</p> <p>* Environ 40 km² de terres inondées (CRDA Jendouba 2003, Lahmar, 2005).</p> <p>- Bou-Selem : remontée de l'eau au confluent de l'oued Medjerda et de l'oued Bou-Hertma jusqu'à une longueur d'environ 4 km. En conséquence d'importants débordements (longueur 2,5 km et largeur 750 m) au Nord de la voie ferrée passant par la ville (Ghorbel, 2000, p. 20 et 26).</p> <p>* Remontée des eaux de l'oued Medjerda au niveau de sa confluence avec l'oued Boujaarine engendrant l'inondation des constructions limitrophes (Id., p. 20).</p>

	<p>* Débordements des eaux de l'oued Medjerda au niveau de la ferme d'El-Merja à douar El Gattous sur les terres de Hinchir Ettorshan (rive gauche) et de Hinchir Bir Lakhdher (rive droite, longueur 5 km environ) (Id., p. 20).</p> <p>* 1070 sinistrés ; dégâts dans les propriétés et les biens vestimentaires chiffrés à 231,118 et 671,834 mille dinars respectivement (statistiques de la délégation de Bou-Selem, 2003).</p> <p>* Débordement de rive gauche au niveau de la station ONAS à 500 m en amont de la station hydrométrique. L'eau a emprunté la même trajectoire que celle de la crue de 1973 envahissant les cités de Diamonta, de l'Hôpital, de la Délégation et du 7 novembre.</p> <p>* Hauteur de l'eau au centre-ville comprise entre 1,47 et 2,02 m (Balti, 2000, p. 3 et 5).</p> <p>⇒ Dans la plaine de Jendouba-Bou-Selem : 1380 agriculteurs sinistrés, 2170 ha endommagés ; destruction de 347 canaux de drainage ; accumulation de 2 à 3 m de boue dans 73 puits de surface ; détérioration de 143 ouvrages d'irrigation et de vidange ; submersion de 59 moteurs de pompage des eaux ; des subventions données à 930 éleveurs pour le soin de 11900 têtes de bétail.</p> <p>* Le coût des dégâts (cultures et infrastructures agricoles) a été chiffré à 1.422.700 mille dinars. (CRDA Jendouba, 2000, p. 4, 8,16 et 24).</p>
<p>Janvier-février-décembre 2003</p>	<p>- Jendouba : débordements à douar El'waychiya qui comprend 28 familles dont 15 en situation d'isolement ; envahissement des eaux à douar El Maarif et 40 familles affectées ; écroulement du pont d'El Lou'h à Essa'ada ; cultures endommagées dans plusieurs secteurs (CRDA Jendouba, 2003, p. 1).</p> <p>- Bou-Selem : des eaux de débordements ont emprunté un ancien chenal de l'oued Medjerda et affecté successivement douar Mastour, la cité Diamonta, l'Hôpital de la délégation, la cité 7 novembre et la cité Fattouma Bourguiba ; la hauteur d'eau a atteint 3,05 m au droit du pont-route GP6 sur l'oued Boujaarine (Balti, 2003, p. 6 et 13).</p>

	<p>* Au niveau de la confluence de l'oued Medjerda avec l'oued Bou-Hertma, les eaux débordantes ont envahi toute la plaine située entre la voie ferrée et la cité La'chaichiya en plus des cités de Hached et de SNIT ; la tranche d'eau atteinte varie entre 0,58 m et 1,23 m ; de lourds dégâts enregistrés dans la ville surtout dans les logements (Id.).</p> <p>⇒ entre la ville de Ghardimaou et le barrage de Sidi-Selem, la superficie de zones inondées est d'environ 47 km² (DGBTH, 1973 ; Lahmar 2021).</p> <p>- Dans ce secteur, 1426 agriculteurs sinistrés et 10.000 ha de cultures totalement abîmées (CRDA Jendouba, 22-02-2003, lettre au nom du Ministre, p. 1).</p> <p>- 56 puits comblés par la boue et 64 motopompes endommagées (CRDA Jendouba, 2003, p. 3).</p> <p>- Au total, les dégâts matériels aux biens et aux récoltés ont été estimés à 20 millions de dinars tunisiens (Lahmar, 2005, p. 60).</p> <p>- Mjez El-Beb : débordements impressionnants au centre-ville et isolement de douars comme celui d'El Matiss ; le niveau d'eau a par endroits atteint 2,5 m (Ben Hassine et Rejeb, 2003, p. 8 et 20).</p> <p>* Routes coupées entre les localités de Borj Ettoumi et Halfaoui ; perte de 400 ha de culture (DGRE, 2003, p. 6).</p> <p>⇒ Entre les agglomérations de Testour et Mjez El-Beb, la superficie des terres inondées avoisine 52 km² (DGBTH, 1973 ; Lahmar 2021).</p>
Janvier 2004	<p>- Jendouba : intrusion des eaux dans les maisons des quartiers de Hawaiiya et de Zghaddiya (observations de terrain, 2004).</p>

	<p>- Bou-Selem : isolement des quartiers de Diamonta, de 7 novembre et de Hached ; suspension du trafic routier passant par la ville (investigations de terrain, 2004).</p>
Janvier 2005	<p>- Mjez El-Beb : envahissement des eaux des quartiers de Lahssine et d'El Merdassi ; isolement des localités de Weljet El Matiss (enquête de terrain, 2005).</p>
Janvier 2006	<p>- Bou-Selem : inondation au centre-ville et interruption des activités (enquête de terrain, 2006). - Mjez El-Beb : les quartiers de Lahssine, d'El Merdassi et de Sicila ont été les plus affectés (idem, 2006).</p>
Avril 2009	<p>- Jendouba : 54 ha de terrains inondés dans la ville ; 1,5 m hauteur de l'eau dans le quartier de Timiriya où se trouve une vingtaine de personnes en danger ; une dizaine de familles occupant le quartier de La'Hwailiya affecté par les débordements de l'oued Medjerda (travaux de terrain, Lahmar, 05-05-2009).</p> <p>- Bou-Selem : à douar El Ghraba au Nord de la ville, une vingtaine de personnes secourues par des hélicoptères après avoir passé la nuit sur le toit de leurs maisons ; leur bétail est mort (Id., 2009).</p> <p>- Barrage Nebeur sur l'oued Mellègue : 1 élève emporté par les flots de l'oued d'Aïn Hamma jusqu'à la retenue du barrage (enquête de terrain personnelle, avril 2009).</p> <p>- Mjez El-Beb : 13,5 km² de terres inondées (DGRE, 2009, p. 64, Lahmar 2017).</p>

	<p>* 1100 ha de cultures endommagées appartenant aux communes d'El Matiss, Grich El-Wed, Mjez El-Beb sud et El Gri'at ; indemnisations à 259 agriculteurs déclarés sinistrés (journal <i>Echourouk</i>, 11-08-2009, p. 26).</p>
Novembre 2011	<p>- Mjez El-Beb : sauvetage de 20 familles (journal <i>Assabah</i> électronique, 04-11-2011) ; une centaine de personnes amenées à un centre d'hébergement (<i>La Presse de Tunisie</i>, 03-11-2011, p. 8).</p>
Février 2012	<p>- Bou-Selem : 2 morts ; 3 m hauteur d'eau au quartier de Fattouma Bourguiba (enquête de terrain personnelle, Lahmar, 25-02-2012).</p> <p>* Réserve de 5 hélicoptères pour des opérations de ravitaillement et de sauvetage (journal <i>Ettounissia</i>, 25-02-2012, p. 14).</p> <p>* 5090 personnes sinistrées et 5 millions de dinars coût des indemnisations (<i>El Kasbah News</i>, 03-10-2012).</p> <p>* Sauvetage de 26 personnes et logement de 120 individus (journal <i>Assarih</i>, 25-02-2015, p. 8).</p> <p>- Mjez El-Beb : sauvetage de 43 personnes ; 14 maisons envahies par les eaux à Sidi-Smail ; endommagement de 1000 ha de terres cultivées (journal <i>Ettounissia</i>, 25-02-2012, p. 14).</p> <p>* 27 familles reçues au centre d'hébergement (<i>La Presse de Tunisie</i>, 27-02-2012, p. 5).</p>
Février-mars 2015	<p>- Jendouba : sauvetage de 16 familles à Jendouba (Id. 2015) ; interruption des enseignements (journal <i>Echourouk</i>, 26-02-2015).</p>

	<p>- Bou-Selem : secours à 220 personnes ; réalisation de 42 opérations de sauvetage (journal <i>Echourouk</i>, 28-05-2015).</p>
--	---

À l'échelle du gouvernorat de Jendouba, évacuation de 606 personnes dont 61 par hélicoptères (vidéo des actualités de la chaîne nationale *Al Wataniya-1*, 24-02-2012).

- **Mjez El-Beb** : accueil de 80 personnes dans des centres de logement ; sauvetage de 25 familles ; 3000 ha de terres de cultures endommagés (journal *Echourouk*, 26-02-2015).

Chapitre IX. Couplage des données de terrain, SIG et télédétection pour l'analyse et la cartographie des inondations récentes majeures

Les illustrations cartographiques relatives aux zones inondables en Tunisie sont très rares, malgré les nombreuses publications consacrées à ce sujet (Ben Ouezdou *et al.*, 1990 ; Boujarra et Ktita, 2009 ; Chouari, 2006 ; Fehri *et al.*, 2008 ; Fehri, 2014). De plus, elles sont basées presque uniquement sur des enquêtes de terrain et sont souvent approximatives et très localisées. Celles portant sur la région d'étude se trouvent dans des rapports internes, émanant des services hydrologiques, généralement hors de portée des chercheurs universitaires. Elles sont établies soit à partir d'observations *in situ* menées par des ingénieurs hydrologues appartenant aux organismes publics (Ben Hassine et Rejeb, 2003, p. 53 ; Rejeb, 2012, p. 31 et 32 ; Ajala et Khalfoun, 2015, p. 40 et 41) et rarement par des chercheurs (Lahmar, 2005, p. 44), soit sur la base de modélisations hydrauliques sans validation par le terrain (Djebbi *et al.*, 2006, p. 5 et 6 ; Hammami, 2010, p. 89 et 90). Or, la télédétection spatiale offre une large gamme de données permettant d'améliorer nos connaissances sur les surfaces affectées par les eaux d'inondation (Henry *et al.*, 2002 ; Puech *et al.*, 2003). Celles auxquelles nous avons eu recours de ce travail sont inédites et sont restées inexploitées jusqu'à présent. De même, le système d'information géographique (SIG) est un outil performant pour la mise en commun, l'analyse et la représentation cartographique des informations variées relatives à l'eau. Le SIG a été ici couplé avec 1) les produits satellitaires à travers la plate-forme du programme ArcGis et 2) les données de terrain.

Dans le chapitre suivant, l'accent sera mis d'abord sur l'analyse des caractéristiques pluvio-hydrologiques de quatre événements majeurs survenus dans le bassin moyen de la Medjerda. L'objectif de la compilation de ces événements extrêmes aux conséquences parfois dramatiques est double : 1) rassembler les informations bibliographiques peu connues et dispersées en un seul document accessible et richement illustré ; 2) examiner les processus et les mécanismes complexes de déroulement des inondations dans le but de dégager ce qui fait leur similitude et leur particularité à des fins de gestion des risques. Dans cette étude, la cartographie occupe une place importante qui se manifeste à travers la réalisation de différentes cartes illustrant les espaces touchés par les eaux pluviales (ruissellement sur les versants) et fluviales (inondations de fond de vallée). Ces cartes sont le résultat de la

compilation, au sein du SIG, des renseignements collectés sur les lieux visités et des informations fournies par l'imagerie satellitaire optique et radar.

IV.1. Données et méthodes

L'approche cartographique proposée consiste à combiner deux sources d'information, à savoir le terrain et la télédétection spatiale. Leur mise en relation et leur exploitation sont assurées par divers outils de géomatique dont les tâches techniques seront précisées au fur et à mesure des besoins.

IV.1.1. La recherche sur le terrain

Elle concerne particulièrement les événements exceptionnels de 2012 et de 2015 et est porte principalement sur la plaine de Jendouba-Bou Selem. Celle-ci est très souvent la première région à être envahie par les eaux de débordement, étant donné sa position sur le cours amont de l'axe fluvial de la Medjerda. Dans l'ensemble, les actions réalisées dans cette thèse se résument en trois points : 1) réaliser des entretiens auprès de la population locale et leur demander éventuellement des photos et des enregistrements vidéo sur la crise ; 2) prendre des coordonnées GPS localisant, entre autres, les laisses de crue et les limites de débordement ; 3) établir des croquis hydrogéomorphologiques intégrant l'emprise des eaux.

IV.1.2. La télédétection spatiale optique et radar

Outre l'avantage de la vue synoptique, l'imagerie satellitaire apporte des informations pertinentes sur les surfaces touchées par les eaux (Robin, 1998 ; Yesou, 2007 ; Wade *et al.*, 2008 ; Yesou *et al.*, 2008). La télédétection passive présente de nombreux atouts tels que l'accessibilité, la richesse spectrale et la facilité relative des traitements (Bonn et Rochon, 1992 ; Dabas et Flamant, 2002). Dans le cas d'étude, cinq images optiques ont été analysées : deux scènes Landsat ETM+ prises à deux dates différentes dans l'année 2003, trois scènes Spot5, l'une acquise en 2003 et les deux autres, à la même date, en 2012 (tab. 30). Par ailleurs, la télédétection active, du fait de son aptitude à s'affranchir des couvertures nuageuses, offre d'importantes possibilités de cartographie des espaces inondables, contrairement à la télédétection optique (Hostache *et al.*, 2007 ; Schumann *et al.*, 2007 ; Yesou *et al.*, 2008). Deux produits radar ont été utilisés dans ce travail : l'un enregistré en 2012 par le capteur ASAR d'Envisat, l'autre acquis en 2015 par le capteur C-SAR du satellite Sentinel-1 A (tab. 30).

Tab. 30. Principales Caractéristiques des produits satellitaires utilisés.

Téledétection	Optique		Radar	
Satellite	Landsat7	Spot5	Envisat1	Sentinel-1A
Capteur	ETM+	HRG2 ; HRG1	ASAR	C-SAR
Mode-acquisition	SAM	THR+HX ; XS	IM	IW
Répétitivité/ revisite	16 j	2 à 3 j	3 j	12 j
Date-acquisition	- 21-02-2003 - 05-02-2003	- 24-02-2012 (2) - 08-02-2003	- 27-02-2012	- 26-02-2015
Résolution spatiale	15, 30, 60 m	- 2,5 m (P et MSI) - 10 m (3 B) et 20 m (1 B MIR)	30 m	5 à 20 m
Résolution spectrale	8 bandes	1 bande, 3 bandes 4 bandes	Bande-C polarisation VV	Bande-C double polarisation (VV+VH)
Format-image	GEOTIFF	GEOTIFF ; DIMAP	N1	SAFE
Type-produit	L1T	L1A ; L1C	ASA-IMP-1P	L1
Référence-scène	LE71920352003052ED C00 LE71920342003036ED C00	- 5062-276/5 - 5062-276/1 - 064_276_0	ASA_IM_OPNP AM20120227 ASA_IM_OPNP DE20030125	S1A_IW_GRDH_2 0150304T172006 S1A_IW_GRDH_2 0150226T052915
Accès-données	disponible sur : https://glovis.usgs.gov/next/	- Soumission de dossier auprès du CNES http://www.isis-cnes.fr/ - Disponible sur : https://theia-landsat.cnes.fr	Soumission de projet auprès de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) https://earth.esa.int/	Libre sur Copernicus https://sentinels.copernicus.eu

IX.2. L'inondation catastrophique de mars 1973

Exceptionnelle par son ampleur et ses effets, la catastrophe de mars 1973 est la plus prodigieuse de mémoire d'homme. Sur le plan climatique, elle est due à la succession et la combinaison de deux faits marquants. D'abord, l'humectation ou la saturation des sols par des précipitations préparatoires en janvier et février ; ensuite la persistance des averses pluvieuses durant presque tout le mois de mars sur l'ensemble du bassin-versant de la Medjerda (Miossec, 1975, p. 281). Les hauteurs

d'eau furent considérables, supérieures de 140 mm à la normale de 50 mm. L'indice pluviométrique va de 3 à 4,5, voire 5 à 7,5 pour certaines stations de mesure (Claude *et al.*, 1977, p. 40). En fait, trois épisodes pluvieux, de plus en plus marqués, se succédèrent pendant ce mois : du 1 au 4, du 11 au 18 et du 22 au 28 mars (Kassab, 1979, p. 127). Le dernier épisode, qui a atteint son paroxysme dans les journées du 27-28 mars, fut à l'origine de pluies torrentielles provoquant des crues puissantes. Les plus gros débits furent enregistrés dans l'axe fluvial de la Medjerda avec des valeurs records jusqu'à présent : 2420 m³/s à Jendouba, 3180 m³/s à Bou-Selem, 3500 m³/s à Slougua en amont de Mjez El-Beb. Ces débits furent renforcés par des apports notables provenant des principaux affluents tributaires surtout méridionaux, en particulier ceux des oueds Khalled, Siliana et Mellègue. Concernant l'oued Mellègue, la situation fut délicate dans la retenue de son barrage qui s'est rempli jusqu'à la cote 268,75 m alors que la cote maximum est 269 m ! Pour des raisons de sécurité, les barragistes procédèrent à d'importants lâchers équivalents à 1200 m³/s mais ils furent réalisés, d'après eux, en phase de décrue de la Medjerda. De leur point de vue, la digue a joué son rôle car sans l'amortissement au barrage, le débit de pointe aurait atteint 4500 m³/s dans les villes de Bou-Selem et de Mjez El-Beb (Direction EGTH, 1973, p. 8). Les volumes d'eau écoulés pendant cet événement furent énormes : 943 millions de m³ en six jours, un volume excédant l'apport d'une année moyenne (Claude *et al.*, 1977, p. 43). L'inondation fut inévitable et les eaux de débordement des oueds envahirent de vastes étendues de la plaine d'inondation. Pour illustrer ceci, et en l'absence de données télédéteectées, on a eu recours à deux documents cartographiques publiés, les seuls existants (Becha, 1973 ; Claude *et al.*, 1977). Leur mise en forme, grâce à un travail de géoréférencement, de mosaïque et de cartographie au sein du SIG, a permis d'élaborer un nouveau document couvrant tout le secteur d'étude (fig. 97). Son examen révèle que la superficie des champs inondés par la crue de mars 1973 est d'environ 234 km². Toutefois, par comparaison avec l'extension des dernières crues, qui ont été de magnitude plus faible que celle de 1973, il semble que ce chiffre de 234 km² soit très faible ce qui fait douter la fiabilité des supports originaux à partir desquelles ont été faits les calculs surfaciques.

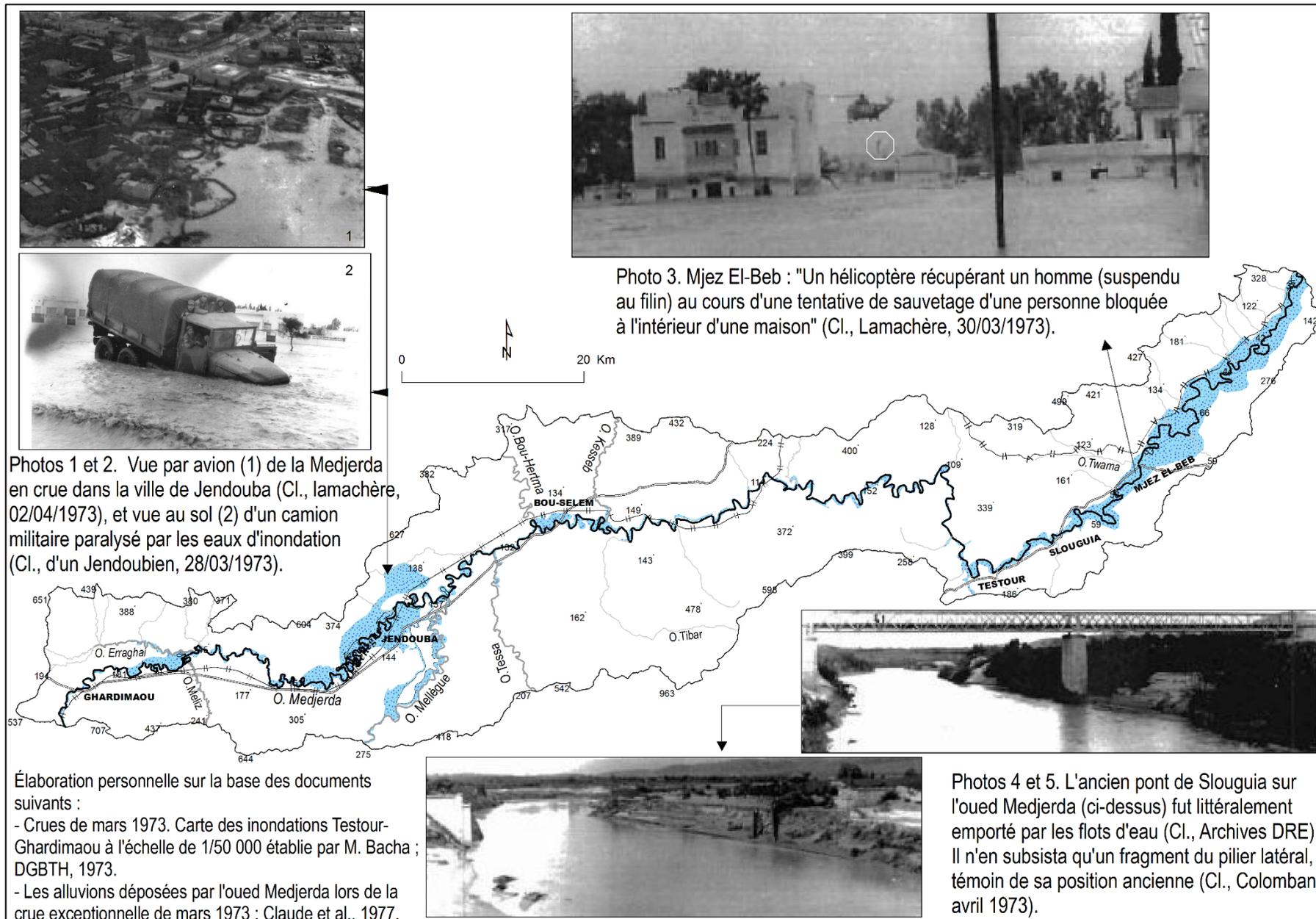


Fig. 97. Carte des zones inondées par la crue de mars 1973 dans les plaines de la moyenne Medjerda, et photos d'illustration.

IX.3. Les grandes inondations de janvier 2003

Au cours de cet événement pluvieux extrême qui s'est étalé sur un mois, du 10 janvier au 9 février 2003, le bassin de la Medjerda a reçu des pluies intenses. Elles sont consécutives aux excès pluviométriques de décembre 2002 qui avaient entraîné déjà une saturation des sols. Les rapports à la normale varient de 2 à 5 et de 1 à 2,5 suivant l'ordre des mois précités (Ghorbel, 2003 ; p. 9-10). L'événement de janvier 2003 est donc le plus arrosé si bien que les totaux pluviométriques enregistrés, dont la période de retour est supérieure à 100 ans, n'ont jamais été enregistrés jusque-là. Leur répartition temporelle montre trois épisodes pluvieux qui correspondent aux jours 10-11, 16-18 et 23-25, auxquels sont associés trois crues principales (Balti, 2003 ; p. 2, 4-5). La plus puissante est survenue durant le premier paroxysme caractérisé par des chutes d'eau extraordinaires dépassant 90 mm en moyenne (Saadaoui et Ben Mansour, 2003 ; p. 4). Ainsi, les flots s'élevèrent à des hauteurs redoutables dans la vallée principale où les débits de pointe ont atteint respectivement 1070 m³/s, 1020 m³/s et 730 m³/s aux stations de Jendouba, Bou-Selem et Mjez El-Beb (Ghorbel, 2003 ; p. 13 et 16). Ces maxima résultent en effet de la combinaison des écoulements du collecteur et de ses branches élémentaires ainsi que des lâchers des barrages-réservoirs. Au total, les mètres cubes liquides mis en mouvement par les crues sont évalués à 1284 millions m³ à la station aval de Mjez El-Beb. Quant aux volumes évacués par les différents barrages, ils sont presque équivalents à l'apport moyen interannuel (Ben Hassine et Rejeb, 2003 ; p. 32 et 76). Ces lâchers d'eau, ajoutés aux apports des oueds qui coulaient déjà à plein, élevèrent le niveau des crues en prolongent sensiblement leur durée. D'après les riverains, les lâchers de barrage sont ainsi impliqués dans la genèse des inondations survenues dans la région. En même temps, ces lâchers sont jugés indispensables par les techniciens pour assurer la sécurité des ouvrages incapables de contenir le surplus d'eau. Progressivement, la situation est devenue difficile à gérer et les eaux des oueds ont quitté leur lit pour aller envahir des terres agricoles et des sols bâtis dans la plaine d'inondation. Ces inondations s'ajoutent à celles d'autres terrains déjà fortement affectés par les eaux pluviales qui y sont restées étalées durant des dizaines de jours. En réalité, les illustrations cartographiques des zones inondées sont rares, très localisées et souvent approximatives. Elles ont été établies soit à partir des observations *in situ* réalisées généralement par les ingénieurs hydrologues d'organismes publics (Saadaoui et Ben Mansour, 2003, p. 65 ; Ben Hassine et Rejeb, 2003, p. 53 ; MEAT, 2003, p. 1) et rarement par des chercheurs (Lahmar, 2005, p. 44), soit sur la base de modélisations hydrauliques non validées par les données de

terrain (Djebbi *et al.*, 2006, p. 5-6 ; Hammami, 2010, p. 89-90). L'élément nouveau à avancer ici est l'emploi des données satellitaires qui sont totalement absentes dans les travaux précédents. Il s'agit de trois images optiques d'inondations identifiées en mode multispectral dont les dates sont un peu décalées par rapport au pic de crue (11-41 jours). Les deux premières scènes sont des produits Landsat7-ETM+ disponibles en téléchargement libre via GLOVIS (Global Visualisation : <https://glovis.usgs.gov/>). Elles ont été acquises au mois de février 2003 (jours 5 et 21) avec une résolution spatiale de 30 m pour les quatre bandes spectrales retenues et elles couvrent inégalement le secteur d'étude. La troisième scène, qui date du 8 février 2003, est de type Spot-5 HRG ; elle a été trouvée dans les archives du programme Spot World Heritage (SWH) à l'adresse du Pôle Thématique Surfaces Continentales Theia (<https://theia-landsat.cnes.fr>). Sa résolution au sol est de 10 m pour les trois premières bandes et de 20 m pour la dernière en infrarouge moyen. Une fois téléchargées, toutes les images ont été géoréférencées (UTM, WGS 84, zone 32) et visualisées à l'aide du logiciel de traitement d'images de télédétection ENVI-4.7. Leur affichage en composition colorée permet de distinguer des surfaces en eau qui apparaissent en plages compactes ou bien en taches dispersées et moins visibles. Mais ceci ressort mieux à travers le calcul d'indices radiométriques qui sont des combinaisons de bandes spectrales permettant de mettre en évidence les propriétés particulières des objets (Inglada, 2015, p. 11). Les indices d'eau sont en effet couramment utilisés dans la littérature pour indiquer ces figures (Gao, 1996 ; McFeeters, 1996 ; Hanqiu, 2006). Il s'avère que l'indice modifié de l'eau par différence normalisée (MNDWI) de Hanqiu (2006) est le plus approprié à la présente étude. Il est défini par l'équation suivante :

$$MNDWI = \frac{\text{Vert} - \text{PIR}}{\text{Vert} + \text{PIR}}$$

Les informations spectrales du vert et du proche infrarouge (PIR) sont fournies respectivement par les bandes 2 et les bandes 5 et 4 des capteurs Landsat et Spot-5. Les résultats obtenus, sous forme d'images couleurs et d'indices, sont ensuite insérés dans un SIG *via* ArcGis afin d'établir la cartographie des espaces inondés. Le premier secteur cartographié appartient à la plaine de Jendouba-Bou Selem où les dégâts ont été les plus lourds ; ils ont été estimés à 20 millions de dinars tunisiens, soit presque 8 millions euros (Lahmar, 2005). Ce secteur est représenté sur la figure 97 qui montre de vastes surfaces en eau couvrant à peu près 146 km², soit 29 % de la superficie totale (497 km²). Le champ d'inondation des eaux s'étend sur 24 km de longueur et 12 km de largeur maximale de part et d'autre de la bande active de tressage. En fait,

l'extension des zones inondées serait encore beaucoup plus importante si l'on tenait compte des surfaces drainées ou asséchées ainsi que celles masquées par le bâti. C'est le cas de la ville de Bou-Selem qui a été envahie par les eaux d'inondation début février 2003 mais aucune trace d'inondation n'apparaît sur l'image ETM+ acquise vingt jours après le pic de crue. De toute façon, cette agglomération, à haut risque d'inondation, et fortement affectée en janvier 2003, a déjà fait l'objet d'une cartographie détaillée (Lahmar, 2005) ; elle donnera aussi matière à de nouveaux développements et illustrations lors de la présentation des événements exceptionnels plus récents. Pour le reste, la figure 98 indique que bien d'autres aires périurbaines et à vocation agricole sont également touchées par les eaux pluviales et fluviales. Elles se localisent généralement le long des grands axes hydrographiques de la Medjerda, de Mellègue, de Tessa et de Bou-Hertma ainsi que dans les fonds marécageux de la plaine d'inondation. Sur la rive droite de la vallée principale, d'amont en aval, elles appartiennent aux communes d'Ettatawir, El-Melga, El'Azima, El'Aitha, Souk Essebt à Jendouba et de Bir Lakhdher, El-Merja, El-Kodia à Bou-Selem. Sur la rive gauche, elles sont rattachées respectivement aux communes de Bulla Regia et Zouhour, d'une part, et de Bou-Selem nord, El-Brahmi et A'ssila, d'autre part.

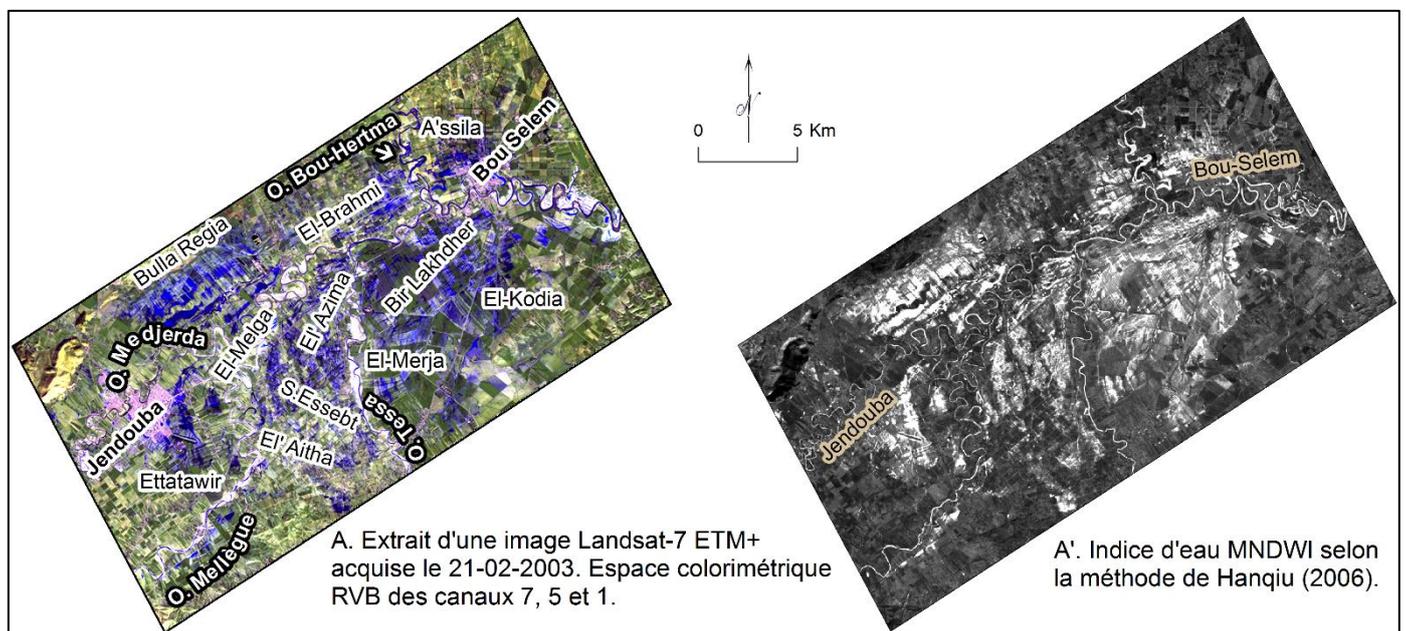


Fig. 97. Extraction des surfaces en eau par le calcul de l'indice d'eau (MNDWI), lors de la crue de janvier-février 2003 dans la plaine de Jendouba-Bou Selem.

Le deuxième secteur cartographié concerne la ville de Mjez El-Beb et de ses abords, entre les localités de Werfella et de Borj Ettoumi (fig. 98 et fig. 99). Ce territoire est

aussi régulièrement affecté par l'invasion des eaux provenant presque toujours de la Medjerda. À l'occasion de la crue de janvier 2003 (jour 27), leur hauteur au-dessus du sol a atteint par endroits 2,5 m, causant de sérieux dommages aux biens et aux personnes (Ben Hassine et Rejeb, 2003, p. 72). Les traces de cette crue ainsi que de celles qui se sont produites ultérieurement sont généralement bien visibles sur les images satellites prises quelques jours après, au mois de février (fig. 99, B, C et D). Elles apparaissent sous forme de grandes étendues d'eau et de champs humides occupant une superficie d'environ 23 km² et s'étalant sur près de 26 km pour une largeur maximale de 2 km. L'espace urbain de la ville s'avère peu touché par les débordements limités seulement, en dehors des terrains nus, au quartier Lahssine et à la place du Pont Mouradite. En revanche, le phénomène prend toute son ampleur vers l'aval où se trouvent les terres agricoles sur lesquelles sont installées divers groupes de population, d'où l'isolement de nombreuses familles habitant surtout dans les boucles de méandre. Les constructions encerclées et/ou envahies par les eaux sont d'ailleurs reconnaissables sur l'image Spot-5 et encore mieux sur les photos spatiales à très haute résolution de Google Earth qui offrent la possibilité de les dénombrer. Nous avons reconnu une centaine de maisons qui paraissent isolées suite au recoupement des méandres par les chenaux de crue (*chute cut-off*) et qui sont réparties à égalité sur trois endroits. Le premier est situé dans le lieu-dit El Matiss, à 1,5 km du centre-ville de Mjez El-Beb ; le deuxième, à proximité, est repéré dans le hameau de Smaidiya ; le troisième, distant de 3,5 km, est localisé dans le village de Grich El-Wed (fig. 100).

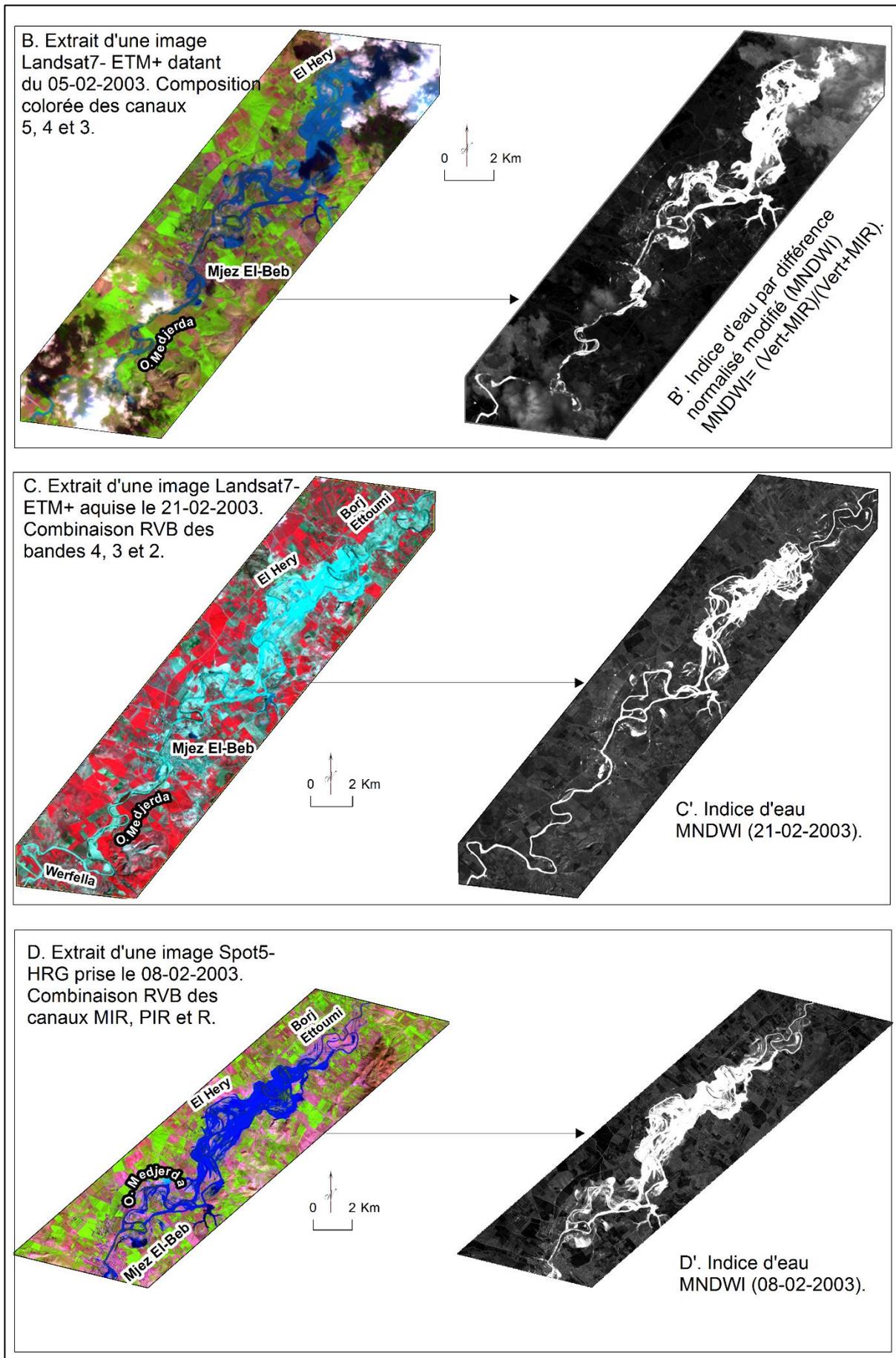


Fig. 99. Calculs d'indice d'eau à partir des images Landsat7-ETM+ et Spot5 correspondant à la crue de janvier-février 2003 dans la région de Mjez El-Beb.

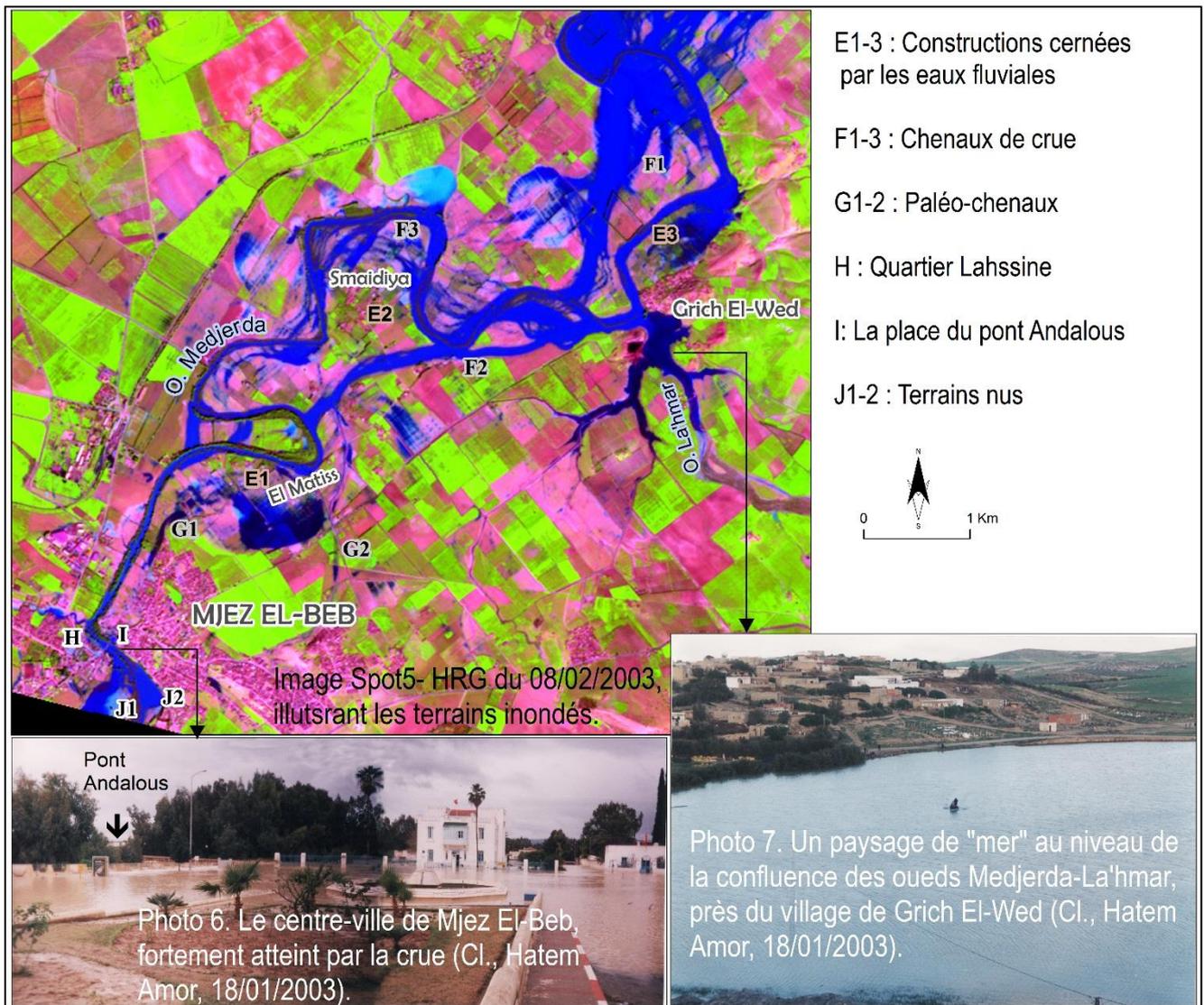


Fig. 100. Inondations et situations d'isolement vécues par les riverains de la Medjerda à Mjez El-Beb.

IX.4. Les inondations majeures de février 2012

L'événement de février 2012 revêt un caractère singulier car c'est la première fois que la région est frappée par un phénomène pluvio-nival de ce genre. Il est question de grandes pluies généralisées et étalées sur plus d'un mois, accompagnées de fortes chutes de neige tombées pendant plusieurs jours consécutifs. Les fortes précipitations neigeuses sont reçues pendant les périodes du 3 au 8 et du 11 au 15 février, touchant plus particulièrement les zones septentrionales. L'épaisseur du manteau neigeux est notable et se situe entre 0,20 et 1,5 m, voire davantage (Rejeb et Ben Hassine, 2012, p. 7 ; DGRE, 2012, p. 37). Or, les premières averses sont

reçues à la fin du mois de janvier (plus de 50 mm entre le 28 et le 31 février) qui accuse des totaux pluviométriques excédentaires avec des rapports à la normale supérieurs à 2 (INM in DGRE, 2012 ; p. 37-38). Après un répit de deux jours, de nouvelles averses se sont abattues de manière continue, du 3 au 23 février, sur presque tout le bassin-versant de la Medjerda. Elles donnent des quantités cumulées souvent comprises entre 85 et 554 mm alors que la moyenne mensuelle est d'environ 50 mm, soit un indice pluviométrique qui va de 1,4 à 4,6 (DGBTH, 2015 ; p. 21). Elles sont aussi dominées par deux épisodes pluvieux (3 au 8 ; 21-22) dont le second, plus arrosé, est à l'origine des inondations enregistrées. Les chutes de pluie se sont encore répétées durant les neuf premiers jours du mois de mars, surtout les 9 et 10, avec une pluviométrie dépassant 30 mm ; le rapport à la normale excède 100 % dans la majorité des postes de mesure (DGBTH, 2015, p. 26). La combinaison des apports pluvieux avec ceux de la fusion nivale amène à une saturation prolongée des sols et au maintien des eaux courantes assez longtemps à un niveau proche du maximum. Au cours de la période du 22 au 28 février, la situation évolue vers un gonflement graduel des eaux fluviales et de celles de la Medjerda en particulier. Ceci est dû en partie aux poussées des eaux des affluents tributaires surtout septentrionaux. Ainsi, une série de grandes crues se déclenchent dont la première est constatée à Ghardimaou, à l'extrémité amont de la vallée principale. Le 22 février à minuit, son débit de pointe atteint et ce, pour la première fois depuis 1973, la valeur de 1500 m³/s, soit un temps de retour estimé à 100 ans. Le 23/02 à 15 h, la crue parvient à Jendouba avec un débit record de l'ordre de 1170 m³/s, débit inégalé aussi depuis la même date et dont la période de retour est évaluée à 150 ans. Après une durée de 16 heures, le 24/02 à 7 h, la crue arrive à Bou-Selem où la Medjerda coule déjà à pleins bords d'autant plus qu'elle est gonflée par les apports importants de l'affluent Bou-Hertma (DGBTH, 2012, p. 68-69 ; Rejeb, 2012, p. 15). Ces apports fluviaux latéraux sont dus aux lâchers du barrage de même nom, situé à 17 km au nord de la ville, à la suite du remplissage de sa retenue et de celle de Beni M'tir, localisée à 8 km plus à l'amont, qui l'alimente. Selon l'avis des hydrologues, ces lâchers d'eau sont nécessaires pour protéger les deux barrages-réservoirs, surtout celui de Bou-Hertma qui reçoit pour la première fois de son histoire de tels apports (DGBTH, 2012, p. 13). Cependant, ils paraissent jouer un rôle remarquable dans la genèse des débordements observés dans l'agglomération de Bou-Selem. De pareilles difficultés de gestion hydraulique sont aussi rencontrées dans la retenue du barrage de Sidi-Selem, situé à 55 km en aval. Ici, le 26 février à 15 h, le plan d'eau atteint le niveau critique de 117 m, soit à 5 m seulement au-dessous de la cote supérieure de la digue

(DGBTH, 2012, p. 31-32). L'ouvrage le plus grand du pays est mis en danger de surverse, voire même de rupture. Pour faire face à cela, et malgré la situation critique en contrebas de la retenue, les responsables prennent la décision d'ouvrir les vannes de crue en plus du déversement incontrôlable de la tour déversante (processus rare fonctionnant uniquement en 2003). D'importants volumes d'eau s'engouffrent alors dans le lit de la Medjerda qui reçoit, en outre, de gros apports issus de son affluent de rive droite, l'oued Siliana situé à une distance de 5,6 km plus en aval. Cet affluent cause lui aussi de sérieux ennuis aux gestionnaires surtout à la suite du remplissage et du déversement des trois barrages-réservoirs établis sur son cours, à savoir ceux de Siliana, R'mil et Lakhmes. Finalement, la montée exceptionnelle des eaux entraîne un peu partout une série de trois à quatre crues dont les plus fortes sont enregistrées les 27-28 février au droit du collecteur principal. Les débits de pointe atteignent, d'ouest en est, 352 m³/s à Slouguia, 318 m³/s à Mjez El-Beb-GP5 et 270 m³/s à El-Hery (Rejeb, 2012, p. 19-20). Ces débits de crue sont faibles en comparaison avec ceux estimés lors des événements passés, mais ils sont largement supérieurs au seuil de débordement qui est équivalent à 200 m³/s. Par conséquent, les eaux débordent du lit mineur et se répandent dans les terrains bas jouxtant le tronçon fluvial compris entre Testour et T'borba. Ici comme ailleurs les illustrations cartographiques de cet événement font défaut mis à part deux cartes, la seconde étant très peu informative, relatives à des champs inondés dans les régions de Slouguia et de Mjez El-Beb, trouvées dans un rapport publié par la direction générale des barrages et des travaux hydrauliques (DGBTH, 2015, p. 77-78). Or, le suivi *in situ* de l'événement en question et surtout le recours à l'imagerie spatiale, inexploitée jusqu'à présent, nous ont permis d'apporter des éléments nouveaux et plus précis à ce sujet. Le travail de terrain a été effectué principalement dans la ville de Bou-Selem, vu l'ampleur des dégâts enregistrés (fig. 101, photos 8 et 9). Il comprend, entre autres, des témoignages de riverains contactés pour des entretiens semi-directifs ainsi que des relevés de laisse de crue et de points de débordement dont les positions ont été mesurées par GPS. Les produits satellitaires sont constitués de deux images optiques Spot 5 et d'une image radar ASAR. Les scènes Spot, l'une en mode multispectral trois bandes et l'autre en mode panchromatique, ont été imagées à une très haute résolution spatiale de 2,5 m (THRS). Elles datent du 24 février 2012 et les deux permettent de couvrir le territoire allant du village de l'Oued Meliz jusqu'au barrage de Sidi-Selem. Elles ont été délivrées par *Airbus Defence and Space* suite à l'acceptation de notre demande justifiée par le CNES au titre du programme ISIS. L'image radar, embrassant pratiquement le même espace, a été acquise le 27 février 2012. Elle a été

prise par le capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) à bord de la plateforme ENVISAT et nous a été transférée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) après soumission d'un projet de recherche. Ses modes de polarisation et d'acquisition sont indiqués par VV et IM (Image Mode) tandis que son domaine spectral est celui de la bande C (5,3 GHz) et sa résolution spatiale est de 30 m (ENVISAT Handbook, 2007 ; Baup *et al.*, 2011). À cela se joignent des documents cartographiques et photographiques variés (cartes topographiques au 1/50 000 et 1/25 000, clichés aériens de 1948 et 1998, photos-satellites récentes de Google Earth) de même que des images issues de médias, essentiellement télévisuelles et collectées sur Internet. La plupart de ces données ont été préalablement mises en forme puis insérées dans un SIG ArcGis. Les résultats obtenus révèlent la gravité et l'ampleur des inondations survenues dans les plaines de Jendouba-Bou Selem et de Mjez El-Beb. Comme en témoignent le bilan affligeant des pertes et des dégâts constatés notamment dans l'agglomération de Bou-Selem, qui s'est soldé par la disparition de trois habitants et l'endommagement de divers biens appartenant à 8000 citoyens. Les vastes étendues d'eau couvrent une superficie d'environ 20 km² et leurs limites sont représentées sur la figure 101. Établie sur la base d'observations directes de terrain, celle-ci montre que la ville a été presque entièrement noyée sous une couche d'eau boueuse, épaisse par endroits de 0,30 à 3 m. Pourtant acquise au lendemain de l'inondation, l'image spot 5 permet de voir encore plus clairement la submersion, particulièrement dans les cités de Hached, Ennour et Snit (fig. 102).

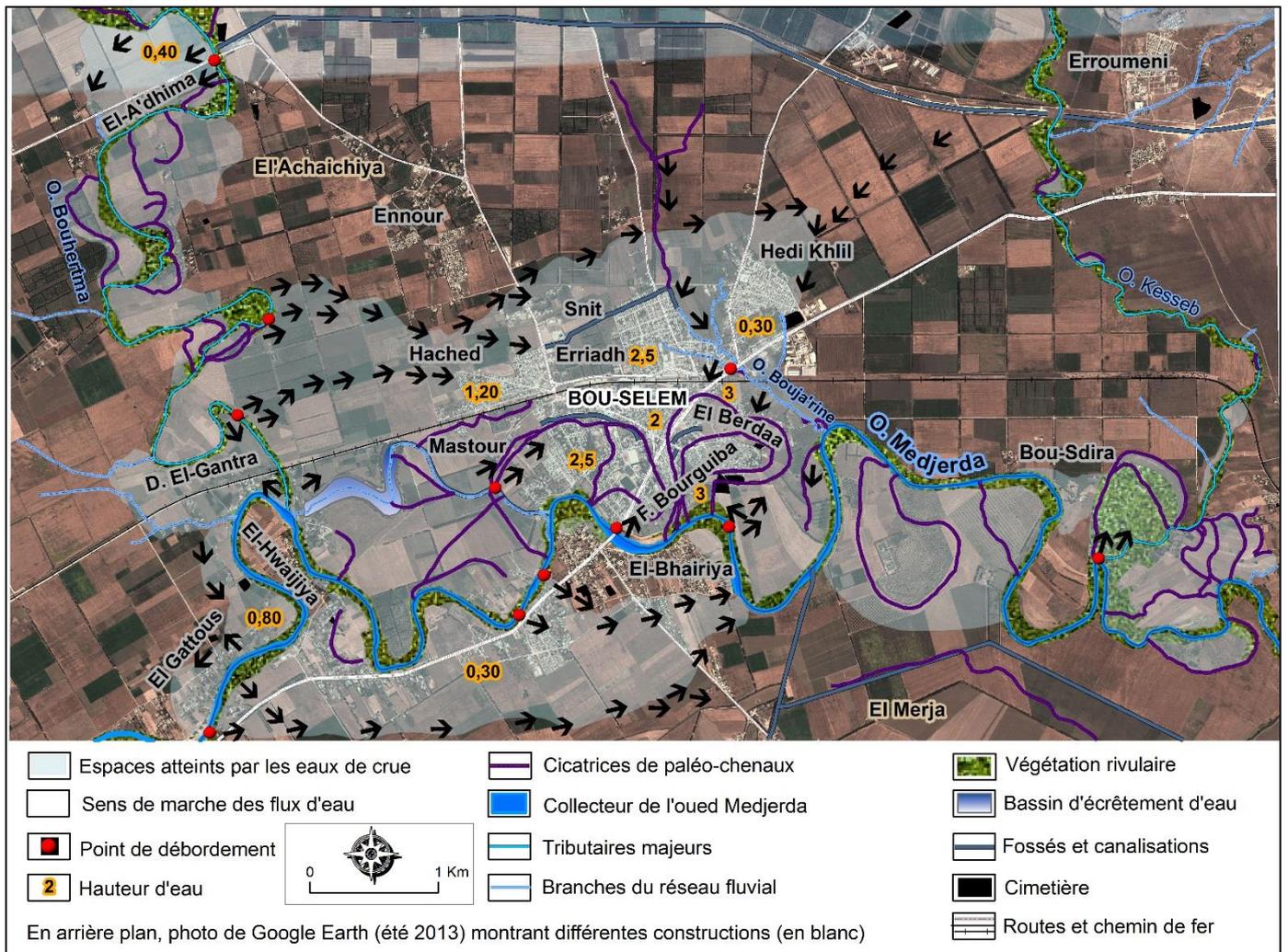


Fig. 101. Limites et étendues des zones inondées le 23 février 2012 dans l'agglomération urbaine de Bou-Selem. Couplage des données de terrain et de SIG.

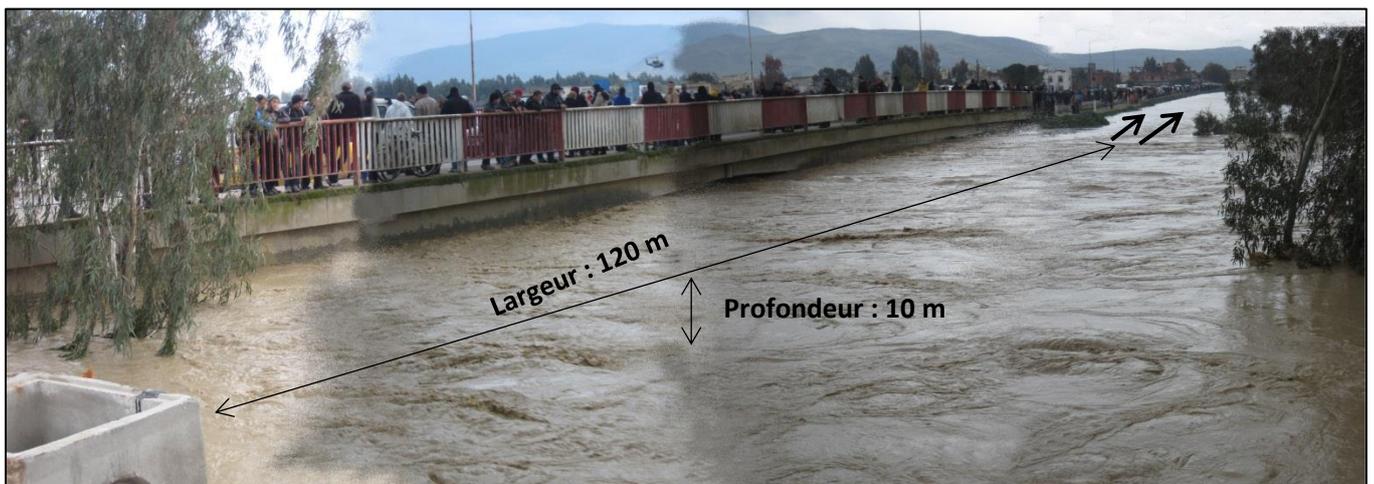
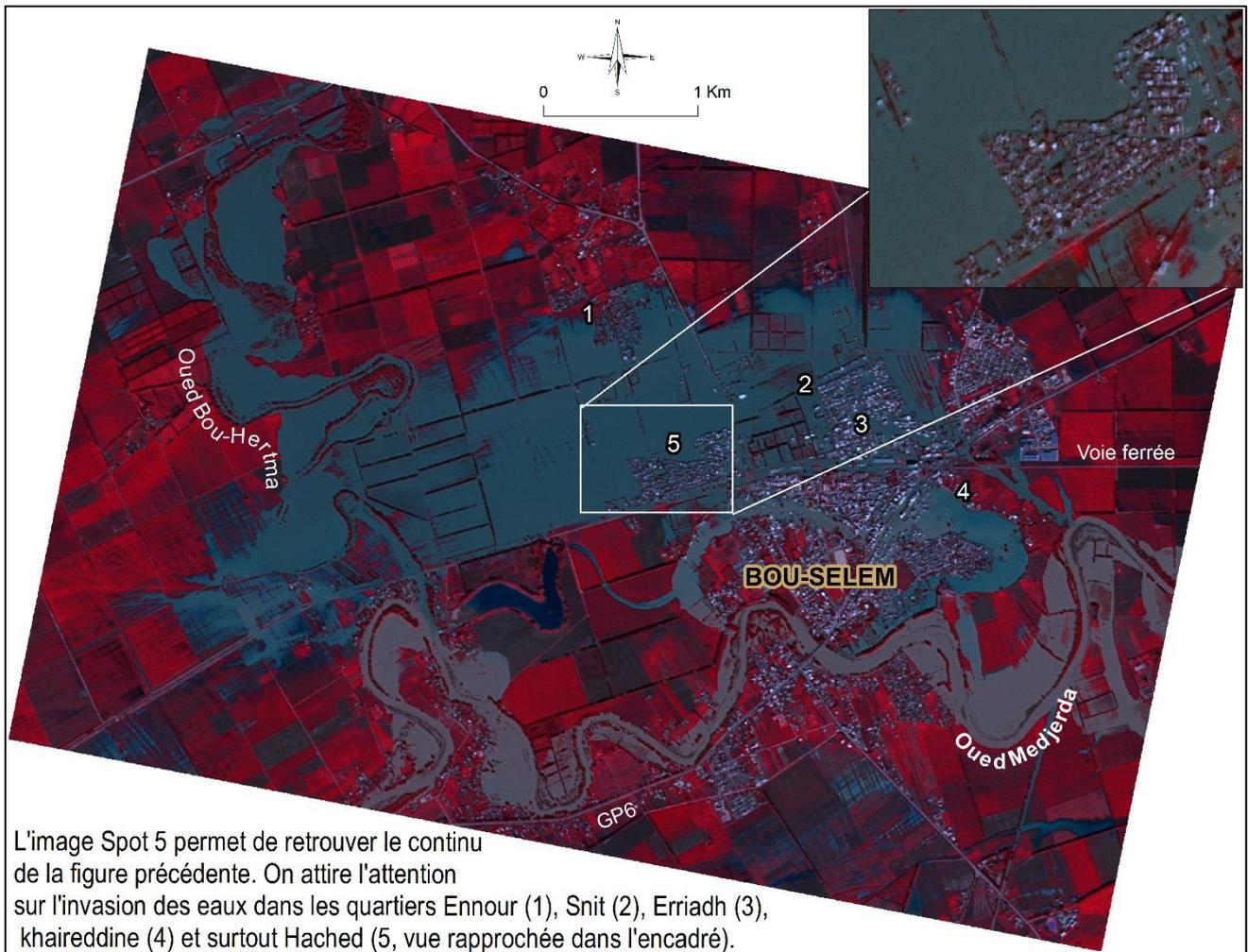


Photo 8. Au premier plan, la Medjerda à pleins bords et débordement des eaux s'étendant à perte de vue en direction du centre-ville. Au second plan, des riverains se rassemblent sur le parapet du pont-route pour observer la montée des eaux. Noter en arrière-plan un hélicoptère venant au secours des sinistrés (cliché : L. Lahmar, 23/2/2012).



Photo 9. Le quartier d'Errab'ani : 1. Entrée d'une maison partiellement murée pour parer à la remontée des eaux submergeant le rez-de-chaussée ; 2. Le propriétaire se voit monter sur un escabeau en bois pour passer au premier étage et rejoindre sa famille (3) déjà réfugiée avec quelques biens sur les toits (cliché : L. Lahmar, 24/2/2012).



L'image Spot 5 permet de retrouver le continu de la figure précédente. On attire l'attention sur l'invasion des eaux dans les quartiers Ennour (1), Snit (2), Erriadh (3), khaireddine (4) et surtout Hached (5, vue rapprochée dans l'encadré).

Fig. 102. Extrait de l'image Spot 5 multibandes (24/2/2012). Composition trichrome des canaux XS1, XS2 et XS3. On y voit l'emprise des eaux de la crue un jour après son passage à Bou-Selem, envahissant plus particulièrement le tissu urbain nord récemment développé.

Les problèmes liés aux eaux d'inondation se sont également posés dans la région d'El-Melga, situé à l'est de la ville de Jendouba à 14 km en amont du secteur précédent. C'est le lieu non seulement de confluence de la branche tributaire de Mellègue avec la vallée de Medjerda mais aussi de concentration des populations riveraines des deux oueds et de passage des voies de circulation (fig. 103). Pendant la crue, les eaux fluviales ont quitté leur lit et envahissent ou cernent les maisons et les champs en bordure, de sorte que des centaines d'habitants sont affectés ou encerclés par les eaux. L'isolement concerne ceux qui occupent les boucles d'anciens méandres ou qui habitent les espaces interfluviaux. L'image Spot 5 panchromatique, prise un jour après la crue (24-02-2012) offre des illustrations expressives du phénomène (fig. 103).

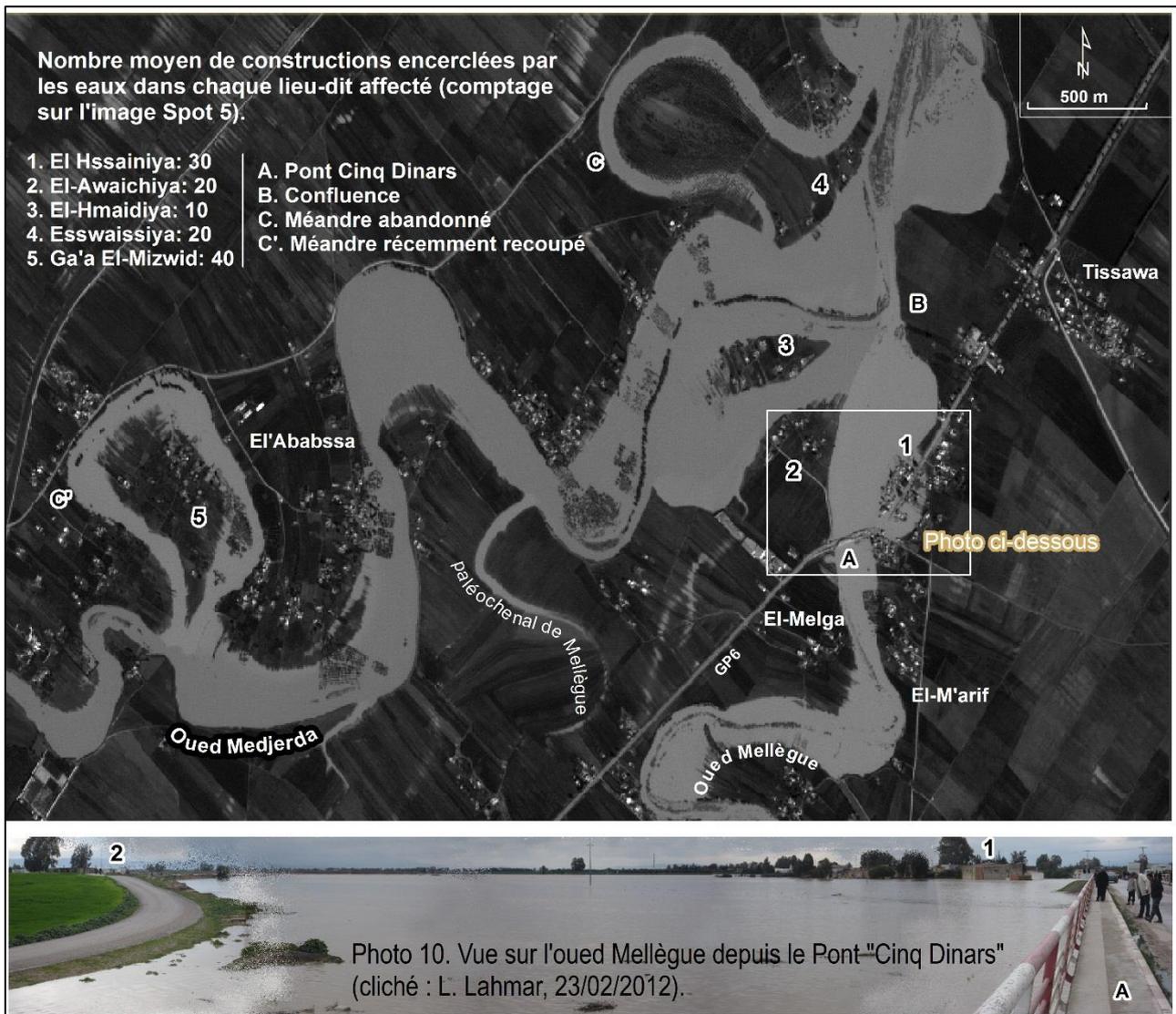


Fig. 103. Extrait de l'image Spot 5 panchromatique (24/2/2012) et photo du paysage inondé, la confluence des oueds de Medjerda-Mellègue. On y aperçoit des terres envahies par les eaux fluviales et, par endroits, des exemples d'isolement de groupes sociaux riverains (1, 2, 3, 4 et 5).

Le troisième et dernier secteur cartographié appartient au territoire de Mjez El-Beb, qui se trouve à environ 120 km en aval des secteurs précités (fig. 104). De par sa position dans la plaine alluviale, ce territoire est sujet à de graves inondations. La morphologie d'ensemble est celle d'un couloir topographique, au fond duquel est inscrite la Medjerda, bordé par des reliefs énergiques. Le système hydraulique est complexe et est centré sur l'ouvrage de Sidi-Selem, le plus grand barrage-réservoir de la Tunisie, situé à près de 20 km en amont. Ce dernier joue un rôle souvent déterminant dans la genèse de l'inondation dans l'agglomération de Mjez El-Beb à cause des volumes d'eau considérables qu'il peut lâcher lors des grandes crues, comme ce fut le cas lors de l'événement majeur de 2012 (cf. *supra*). Concernant les espaces touchés par les eaux d'inondation, il nous a été difficile de nous déplacer et de faire des croquis de localisation sur site. Nous étions en effet occupés à suivre en direct l'évolution de la situation dans la plaine de Jendouba-Bou Selem (voir clichés personnels). Ce hiatus cartographique a été cependant comblé par l'emploi de l'image radar de crue ASAR d'Envisat, acquise le 27 février 2012 (fig. 104). Celle-ci a été prétraitée afin de pouvoir exploiter au mieux son contenu. La phase de prétraitement a consisté essentiellement à effectuer : 1) le géoréférencement, qui permet de donner à l'image-source un système de projection de référence comme UTM/WGS84/32 N (Bergeron, 1992); 2) le calibrage, qui signifie une correction de la radiométrie pour mieux restituer le coefficient de rétrodiffusion radar (Baghdadi *et al.*, 2007); 3) le filtrage, qui vise à réduire le bruit de chatoiement « *speckle* » inhérent au capteur, moyennant le filtre « *Lee* » choisi pour une fenêtre de taille 5*5 (Xin Wang *et al.*, 2012, p. 3). La phase de traitement repose sur l'application d'une classification supervisée des pixels de l'image en classes spectrales homogènes ayant une signification thématique (eau / non eau). Le classificateur utilisé est celui de l'algorithme « *Random Forest* » implémenté dans le logiciel SNAP de l'ESA (<http://step.esa.int/main/download/>) (Mellor *et al.*, 2013, p. 1 et 3 ; Cazals, 2016, p. 3). Cela a abouti finalement à la création d'une image dérivée qui met en évidence, avec une teinte noire, les surfaces en eau. Elles s'étendent sur une superficie de quelque 10 km² composées très souvent des terres agricoles (fig. 104). Le centre de la ville paraît faiblement inondé, mais ceci est peu conforme à la réalité comme l'attestent les photos terrestres et bien d'autres non introduites dans le texte. Les explications sont au moins triples : 1) la date d'acquisition de la scène radar ne correspond pas au pic de la crue ; 2) il faut envisager l'évacuation rapide des eaux à travers les réseaux urbains d'assainissement pluviaux ; 3) les signaux radar sont souvent masqués par le bâti, d'où la perte d'information.

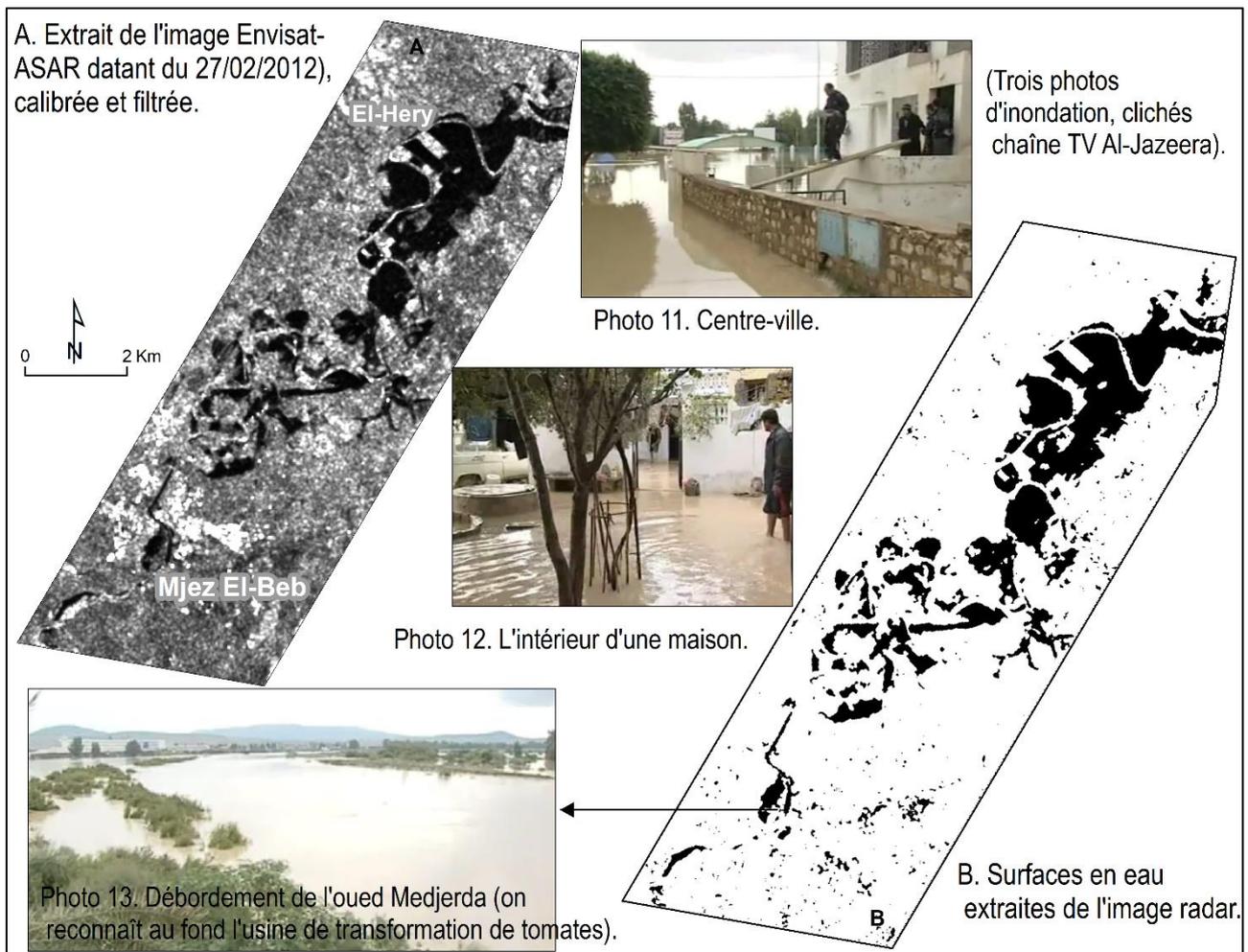


Fig. 104. Classification dirigée des pixels en eau selon l'algorithme « *Random Forest* », réalisée sur l'image Envisat-ASAR (27-02-2012) couvrant la plaine de Mjez El-Beb.

IX.5. Les inondations de février 2015

Au cours des mois de février-mars, des précipitations abondantes et continues sont tombées dans le bassin-versant de la Medjerda, frappant des sols déjà humectés au sortir de l'hiver. Les pluies reçues en février sont excédentaires et représentent plus de deux fois la Normale dans la majorité des stations de mesure. L'excédent pluviométrique apparaît marqué notamment à Jendouba (51,6 mm/154 mm), à Bou-Selem (51 mm/143 mm) et à Bou-Hertma (99,7 mm/236 mm). Des précipitations dont le calcul des périodes de retour donne des valeurs entre 2 et 70 ans (Ajala *et al.*, 2015, p. 5 et 7 ; Rejeb *et al.*, 2015, p.15). En fait, c'est l'épisode pluvieux du 21 au

28 février qui est à l'origine de la crise hydrologique. En 8 jours, il est tombé près de 70 % des précipitations mensuelles totales (Jendouba : 104 mm/154 mm ; Bou-Hertma : 163 mm/236 mm). Les pluies de mars ont été dominées par l'épisode pluvieux du 5 au 9 et sont restées légèrement excédentaires, avec des rapports souvent supérieurs à 100 % (Ajala *et al.*, 2015, p. 7 et 10). Mais leurs effets apparaissent plutôt dans le maintien des eaux circulant dans les oueds à des niveaux inquiétants, et dans l'étalement des durées de stagnation de l'eau au milieu des dépressions. L'abondance pluviométrique, remarquable à la fin du mois de février, s'est traduite aussitôt par une série de crues successives affectant les principaux organismes fluviaux. Les premières crues sont enregistrées à l'amont, au niveau de la station de mesure de Ghardimaou, là où la Medjerda fait son entrée en Tunisie. La plus importante d'entre elles est observée le 27/02 à 6 h, avec un débit maximum de 761 m³/s. Le même jour à 22 h, une crue s'est produite au niveau de la station de Jendouba avec un débit de pointe de 468 m³/s. Elle provoque la submersion ou/et l'isolement de quelques îlots urbains et agglomérations rurales (fig. 105 et photo 14). Mais six heures avant (à 16 h), une autre crue s'est déclenchée, plus en aval, au droit du pont de Bou-Selem, avec un débit maximum de 595 m³/s. Elle est due à la conjonction des apports de la Medjerda et de ceux provenant des lâchers du barrage-réservoir de Bou-Hertma, soumis au processus de déversement. Ainsi, des débordements étendus sont survenus dans la ville et ses environs immédiats (fig. 105 et photo 15). Le 28 février, les volumes écoulés sont parvenus à la retenue de la digue de Sidi-Selem. Ils engendrent une hausse du niveau de l'eau à 115,41 m - le niveau exceptionnel est 119,5 m - alors qu'il était à 108,19 m, lequel est déjà jugé inquiétant (Rejeb *et al.*, p. 23, 2015). En l'occurrence, l'évacuateur de crues (tulipe) se met à déverser, n'empêchant pas pourtant l'eau de monter le 1^{er} mars, à la cote de 116,36 m, équivaut un volume liquide de 722,192 millions de m³, soit presque 70 % de l'apport moyen interannuel. La situation était donc très dangereuse aussi bien dans la retenue du barrage que dans les agglomérations riveraines de la Medjerda. Elle n'a vraiment commencé à changer qu'à la faveur d'une baisse tangible des précipitations pluvieuses. Toutefois, elle est restée préoccupante tout au long du mois de mars en raison de la persistance des lâchers du barrage. Ces lâchers d'eau pratiqués depuis la fin de janvier, tantôt par intermittence, tantôt en continu, sont en effet la cause directe de déclenchement de quatre crues successives. Celles-ci ont été relevées aux stations de Slougua et de Mjez El-Beb où les débits ont atteint la même valeur, soit 215 m³/s. De tels débits sont suffisants pour que le fleuve déborde dans les terrains bas à vocation surtout agricole. Ces derniers n'ont pas fait l'objet d'observations

directes contrairement à ceux localisés dans la plaine de Jendouba-Bou Selem, laquelle a été vue en plus par le satellite radar de Sentinel-1. Lancé le 3 avril 2014, Sentinel-1 est un capteur SAR (Synthetic Aperture Radar) qui opère en bande C (5,4 GHz) et fournit des données avec une résolution spatiale de 5-20 m et un cycle de revisite de 6 jours (Torres *et al.*, 2012 ; Desnos *et al.*, 2015). Le site officiel de mise à disposition des données Sentinel-1 en libre accès est actuellement le *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/>) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Faute de mieux, La scène utilisée a été acquise le 26 février 2015, c'est-à-dire à la veille de la grande inondation. Néanmoins elle est utile pour identifier les terres mouillées et les zones de stagnation des eaux (fig. 105. A). Celle-ci est le résultat de divers traitements appliqués à l'image au moyen du logiciel SNAP (Sentinel-1 Toolbox). La première phase de traitement consiste dans le géoréférencement de l'image-source suivant la projection cartographique UTM/WGS84/zone 32 (epsg : 32632). Vient ensuite la calibration selon la méthode de Gamma. Puis le filtrage basé sur le filtre « *Gamma map* » pour une fenêtre 3*3. Enfin la segmentation par seuillage, qui aboutit à la création d'un masque binaire des pixels en eau (fig. 105. B). L'image binaire obtenue, de même que celle colorée, révèlent l'ampleur des espaces touchés par les eaux pluviales. Ils occupent une superficie d'à peu près 300 km² et peuvent être regroupés en trois ensembles de secteurs. Le premier ensemble se rattache aux étendues marécageuses de l'Antique *Bulla Regia*, le deuxième appartient aux vastes plaines d'El-Merja, d'El-Kodia et de Sidi-Abid et le troisième concerne les environs sud de la ville de Jendouba. Quant aux secteurs urbains et périurbains affectés plutôt par les eaux fluviales lors des crues des 27-28 février, ils sont presque identiques à ceux des événements précédents. En voici deux illustrations photographiques prises dans les quartiers d'Ettatawir et de Diamonta, à Jendouba et à Bou-Selem.

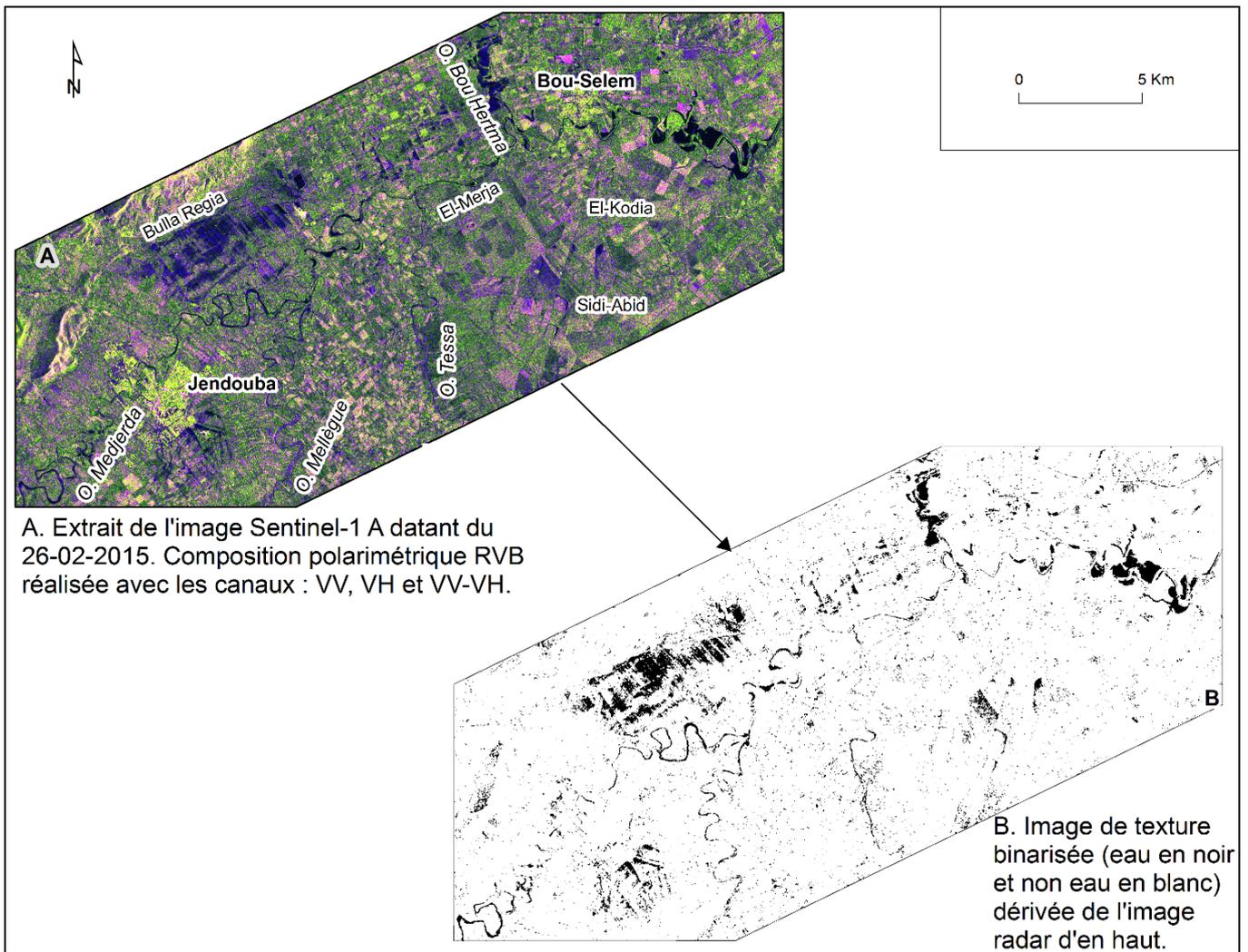


Fig. 105. Les étendues d'eau extraites de l'image Sentinel-1 A (26-02-2015) par création de masque binaire, et photos d'inondation associées.



Photo 14. Photo prise à l'extrémité du quartier d'Ettatawir à Jendouba (cliché : L. Lahmar, 1^{er}/3/2015).



Photo 15. Photo prise en face du quartier de Diamonta à Bou-Selem (cliché : L. Lahmar, 1^{er}/3/2015).

Conclusion du chapitre IX

Ce chapitre analyse les processus pluvio-hydrologiques relatifs à quatre événements d'inondation majeurs survenus dans la partie moyenne de la vallée de la Medjerda. Il apporte de nouveaux éclairages sur les espaces inondables, grâce à l'utilisation conjointe des données inédites de terrain, de SIG et surtout de télédétection satellitaire optique et radar. Les résultats produits sont des cartes et des images satellite traitées (indices spectraux, segmentation...) montrant les surfaces affectées par les eaux pluviales et fluviales lors des événements extrêmes étudiés (1973, 2003, 2012, 2015). Ces derniers sont dus à des grandes averses à épisodes multiples et allongés. Ils sont caractérisés par des pluies soutenues qui sont tombées sur des sols déjà imbibés par les eaux de pluie préparatoires, d'où le gonflement impressionnant des oueds. Les puissantes crues répétées qui se sont produites concourent souvent pour une large part au volume total annuel. Les inondations qui en découlent sont considérables et affectent de nombreuses populations riveraines. Il ressort que les écarts pluviométriques inter-événements sont généralement faibles alors que ceux des débits de débordement sont notables. Ces derniers montrent une tendance décroissante significative. À titre d'exemple, les débits enregistrés à Mjez El-Beb sont passés de 3500 m³/s en 1973, à 730 m³/s en 2003, à 318 m³/s en 2012 et à 215 m³/s en 2015. Cela veut dire que les inondations, ici comme ailleurs, se produisent

aujourd'hui pour des débits médiocres, et pourtant les dégâts sont lourds. Se pose alors la question de savoir quelles pourraient être les conséquences d'un débit comme celui de 1973 qui fut 3500 m³/s ? Cela veut dire aussi que les causes ne sont pas forcément liées à des pluies exceptionnelles et doivent être recherchées plutôt dans les lits fluviaux et les grands ouvrages hydrauliques. En fait, les lâchers d'eau de barrages, évoqués plus haut, paraissent agir sur les débits de crue, et sont souvent responsables de la complication de la situation en aval. Or, ces lâchers d'eau sont indispensables pour la sécurité des barrages-réservoirs qui sont passés plus d'une fois, comme les riverains, près de la catastrophe. Ainsi, les scénarios d'inondation se suivent, se répètent et inspirent des craintes sérieuses pour l'avenir.

Conclusion générale

Le géosystème anthropisé de la moyenne Medjerda constitue un milieu tout à fait favorable au phénomène d'inondation et de stagnation d'eau. Il correspond à une région pluvieuse, de terres basses presque sans pente bordées par des alignements montagneux assez hauts et à versants pentus, de sols alluviaux à structure massive et imperméable, de terrains profondément entaillés par un réseau fluvial dense et puissant, un espace de forte occupation humaine, parfois en zone inondable, et à nombreux aménagements hydro-agricoles quelquefois dangereux. Les risques fluviaux sont ainsi variés et concernent aussi bien le paysage morphologique que les sociétés humaines. Au pied des reliefs limitrophes, l'action des eaux courantes est à l'origine d'un modelé de cônes et glacis avec une prédominance d'accumulation de cônes. Ce sont des cônes de déjection et alluvial d'âge historique puisqu'ils incorporent dès la base des structures archéologiques antiques en place. Au fond des vallées, la Medjerda et ses grands affluents s'enfoncent actuellement dans un système de terrasses et banquettes d'inégal développement. La terrasse historique supérieure est la plus tranchée dans le paysage tant par son épaisseur (4-12 m) que par son étendue (plusieurs kilomètres). Elle renferme des dépôts alluviaux lités appartenant au Pléistocène, à l'Holocène et à l'époque historique en particulier. La terrasse historique inférieure qui s'emboîte dans la précédente est beaucoup moins représentée et apparaît sous forme de lambeau à faciès grossier surtout dans sa partie basale. Le calage chronologique de son dépôt est encore à préciser vu la rareté de matériaux datables, mais l'âge fini-médiévale à moderne est fort probable. Les banquettes alluviales qui s'observent au bord du talweg actuel (moins d'un mètre de hauteur) sont également peu développées. Elles correspondent à des gradins d'accumulation et d'érosion actuels à subactuels, souvent remobilisés à l'occasion de crues majeures. En revanche, les dépôts d'inondation dans les plaines alluviales sont importants et ceux récents sont discernables même à l'échelle décennale. Leur hauteur était, selon les coupes visibles dans certains oueds, de 2 à 6 m plus basse que celle du temps actuel. L'état de certaines ruines antiques enfouies sous les alluvions est révélateur de l'ampleur de la phase de remblaiement qui semble avoir été amorcée à l'Antiquité tardive. Le caractère énergétique des cours d'eau responsables de tel alluvionnement est attesté par la section des vallées qui était plus large que celle d'aujourd'hui alors que le tracé fluvial était moins sinueux. Cela renvoie à la

variabilité de la dynamique fluviale et ses impacts socio-environnementaux au temps des Anciens ainsi qu'aux menaces qui pèsent de nos jours sur le patrimoine archéologique. À l'époque actuelle et récente, l'activité géodynamique est globalement remarquable et se manifeste par un changement de position du lit. Entre 1928 et 2016, environ 77,25 % des distances de migration latérale sont inférieures à 71 m, soit un taux de mobilité latérale en-dessous de 0,80 m/an et une intensité relative faible à moyenne ; tandis que 22,75 % des déplacements sont compris entre 71 et 669 m donnant un taux de mobilité latérale variant de 1,67 à 7,67 m/an et une intensité relative forte à très forte. Elle se manifeste aussi par le phénomène de défluviation, marquée par une bande d'errance comprise entre 984 et 1500 m pour un linéaire fluvial de 6 à 27 km de long, et par celui de recoupements de méandre survenus entre 1972 et 1995. Les recoupements de méandre coïncident avec la phase post-barrages commencée dès le milieu des années cinquante. Leur durée est courte et s'étend de 6 mois à 7 ans, alors que leur vitesse rapide ne reflète pas en réalité une action érosive importante mais plutôt un changement brutal des caractéristiques de l'écoulement lié aux effets de l'endiguement des organismes fluviaux. Les phénomènes de suffosion et de ravinement sont également importants mais celui de recul des berges est le plus dominant. Les taux d'érosion moyens annuels calculés sur deux tronçons fluviaux, situés en amont et en aval de la digue du barrage de Sidi-Salem, pour deux périodes successives (1962-1974 et 1974-2016) sont respectivement de l'ordre de 4,70 et 1,70 m/an et de 18,29 et 2,55 m/an. Les faibles valeurs de la deuxième période d'analyse sont dues aux effets des travaux d'aménagement hydro-agricole et de la colonisation végétale de la bande active. Les remblaiements alluviaux sont particulièrement notables dans les plaines d'inondation fluviales. L'épaisseur moyenne des dépôts par crue est estimée à environ 15 cm entre 2004 et 2015, d'où l'exhaussement continu des fonds. Les dynamiques hydro-morpho-sédimentaires sont souvent ignorées par la population locale qui éprouve lors des crues des situations difficiles. Leur impact sur le patrimoine archéologique est apparent : des constructions antiques tronquées et envoyées suite au recul des berges ; d'autres sont enfouies sous les alluvions à cause des remblaiements. Il est regrettable de voir des monuments comme le beau pont de *Simitthus* livré à la nature ou bien encore les moulins hydrauliques de Testour et de Chemtou, rares au Monde antique, en proie aux actions des eaux et des Hommes. Aujourd'hui, il s'avère que le phénomène d'inondation dans la région est plus pesant qu'on ne le pensait réellement, vu le manque d'informations dans la littérature. Au total, vingt-sept crues et inondations majeures ont survenu entre 1886 et 2015, soit

un écart inter-crue moyen de 4,77 ans. La répartition des dates des événements répertoriés révèle une tendance au regroupement en cinq séries de crues. Contrairement aux trois premières séries, les deux plus récentes (1957-2015) se rapportent à la période post-barrages établis sur les principaux oueds. Autrement, malgré la régulation du régime hydrologique par des barrages écrêteurs, le phénomène d'inondation existe encore et même avec une fréquence élevée surtout entre 2000 et 2015. Au cours de cette période, neuf crues aux conséquences fâcheuses ont eu lieu avec une fréquence d'apparition élevée de 1,66 ans. Outre leur caractère répétitif, les événements pluvio-hydrologiques enregistrés se sont produits dans tous les mois, excepté juillet et août. Les pertes sont toujours considérables tant sur le plan humain avec la mort de plus de 131 personnes (1886-2015) que sur le plan matériel avec des dégâts énormes chiffrés récemment à des dizaines de millions de dinars, d'autres sont inestimables. Le danger de crues règne sur la vie quotidienne des riverains et une sensation d'angoisse et de peur leur saisit à la pensée des crises passées et à venir. Celles de 1973, de 2003, de 2012 et de 2015 sont presque toutes présentes dans les mémoires et dont les séquelles sont encore là sur les ponts et dans les maisons. Sans doute l'Homme incombe une responsabilité essentielle dans le fait d'inondation puisqu'à la quête des sols fertiles, est venu s'installer au voisinage d'oueds redoutables. Mais, la responsabilité incombe aussi aux autorités publiques qui doivent assurer la protection des habitants et leur rendre la vie supportable. Les décideurs et les élus se montrent parfois peu soucieux du degré de dangerosité des inondations comme en témoigne l'absence d'aucun plan de protection ni de gestion de crise. Pourtant le danger est bien réel et les inondations peuvent alourdir le bilan des pertes en vies humaines et des dégâts à moins d'appliquer au plus vite des solutions. Cette étude prétend avoir contribué modestement à l'effort de connaissance de ce problème d'inondation. Mais comme tout travail n'est jamais parfait, certains points traités nous semblent améliorables. Il s'agit en particulier du contexte pluvio-hydrologique par l'intégration de données satellitaires à la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin-versant ainsi que du cadre géomorphologique par le recours aux méthodes de datation radiocarbone et thermoluminescence. Cela ouvre la voie à des perspectives élargies en matière de recherche fondamentale et appliquée. Celle fondamentale pourrait s'attacher à l'idée de reconstituer les événements paléohydrologiques majeurs au cours des deux derniers millénaires à partir de l'étude de carottes sédimentaires prélevées dans les plaines d'inondation. Les inondites méritent à notre avis une étude quantitative et qualitative, par carottage, afin d'établir les séquences lithostratigraphiques des

archives sédimentaires et de dater les remplissages fluviaux. Leur connaissance peut aussi aider à restituer les paléotopographies et à mieux comprendre l'impact de variations climatiques sur les paléoenvironnements. Celle appliquée est tenue à répondre à des demandes sociétales en se penchant sur l'instauration d'une politique de gestion du risque d'inondation. Une telle politique exige l'intégration de plusieurs éléments comme la culture du risque, la synergie d'efforts de l'ensemble de participants, l'analyse de retours d'expérience, les moyens logistiques et les dispositifs juridiques. La gestion de crise étant un phénomène dynamique, il est nécessaire d'associer tous les intervenants (élus, praticiens, acteurs) dans une cellule de crise avec une répartition claire des tâches. Les actions à mener peuvent être structurées en plans d'intervention gradués (PIG) pour chaque ville sinistrée. Il vaut mieux de les mettre à l'épreuve pour s'assurer de leur efficacité en situations dangereuses.

Bibliographie

- Abid H., 1998.** *Méthodes et problématiques de la recherche archéologique. Exemple de la feuille de Medjez El Bab au 1/ 50 000 N° XXVII.* Mém. DEA en Histoire ancienne. 258 p.
- Abid H., 2018.** Les ponts romains dans le bassin du Bagra (l'oued Majrada, en Tunisie). In : *Mélanges en l'honneur de la Mejarda ou l'éternel Bagra.* Université de la Manouba, pp. 98-131.
- Abid M., 2003.** *Gestion de l'alluvionnement dans les retenues des grands barrages tunisiens.* Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques. 13 p.
- Abù-l-'Arab., 1985.** *Tabaqât.* 2^e édition, 312 p.
- Ajala N., Khalfoun N., 2015.** *Crués et inondations dans la haute vallée de la Mejerdah (février-mars 2015).* Dir. Ress. Eau. Tunis, 49 p.
- Allen J.-R.-L., 1965.** A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 5, pp. 89-101.
- Allinne C., 2007.** Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 67-84.
- Aloui S., 2016.** *L'irrigation, le territoire et les enjeux de l'aménagement hydro-agricole dans la plaine de Jendouba.* Thèse de doctorat. Fac. Lettres, Sc. Soc. Sfax, 355 p (en arabe).
- Amoros C., Bravard J.-P., 1985.** L'intégration du temps dans les recherches méthodologiques appliquées à la gestion écologique des vallées fluviales : l'exemple des écosystèmes aquatiques abandonnés par les fleuves. *Revue française des sciences de l'eau*, 4, 4, pp. 349-364.
- Arnaud-Fassetta G., 1997.** Évolution du plancher alluvial du Petit Rhône à l'échelle pluriannuelle (delta du Rhône-France du Sud). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 1997, n° 3, pp. 237-256.
- Arnaud-Fassetta G., 2008.** La géoarchéologie fluviale. Concepts, attendus et méthodes d'étude rétrospectives appliqués à la caractérisation du risque hydrologique en domaine méditerranéen. *ÉchoGéo*, 4, 15 p.
- Arnaud-Fassetta G., 2011.** L'histoire des vallées entre géosciences et géoarchéologie. *Méditerranée*, 117, pp. 25-34.
- Arnaud-Fassetta G., 2013.** Dyke breaching and crevasse-splay sedimentary sequences of the Rhône delta, France, caused by extreme river-flood of December 2003. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 36, pp. 7-26.
- Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2004.** La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropique dans l'évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud. *Méditerranée*, 1-2, pp. 143-156.
- Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Fort M., Plet A., André G., Clément D., Dagan M., Mering C., Quisserne D., Rycx 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, pp. 17-34.
- Ayari K., Djebbi M., Chakroun H., 2016.** Cartographie du risque d'inondation de la ville de Medjez El-Beb par débordement de la Medjerda. *Larhyss Journal*, 25, pp. 285-307.

- Bacha M., 1973.** *Crues de mars 1973. Carte des inondations Testour-Ghardimaou.* Ministère de l'Agriculture. Division des barrages. 1 p.
- Baghdadi N., Aubert M., Cerdan O., Franchistéguy L., Viel C., Martin E., Zribi M., Desprats J.-F., 2007.** Operation mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to the touch basin (France). *Sensors*, 7, pp. 2458-2483.
- Bagnold R.-A., 1960.** Some aspects of the shape of river meanders. Physiographic and hydraulic studies of rivers. *Geological Survey Professional Paper*, 282-E, pp. 135-144.
- Ballais J.-L., 1973.** Les inondations de 1969 en Tunisie méridionale. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord. Alger*, T. 64, fasc. 3 et 4, 31 p.
- Ballais J.-L., 1991.** Les terrasses historiques de Tunisie. *Rev. Z. Geomorph N. F. Suppl.-Bd.* 83, pp. 221-226.
- Ballais J.-L., Garry G., Masson M., 2005.** Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi Méditerranéen français. *C.R., Geoscience*, 337, pp. 1120-1130.
- Balti N., 2000.** *Note sur les inondations du 25 au 30 mai 2000 à Bousalem et Jendouba.* C.R.D.A de Jendouba. Arrond. Ress. Eau, 29 p.
- Balti N., 2003.** Crues du mois de janvier 2003. CRDA de Jendouba, Arrond. Ress. Eau, 14 p.
- Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du territoire., 2003.** Rapport technique sur les inondations survenues à Bou-Selem le 12 janvier 2003. Tunis, 21 p (en arabe).
- Bannour H., Bonvallet J., 1988.** Néotectonique et géomorphologie. Les dépôts quaternaires de la vallée de la Medjerda dans la "zone des diapirs", témoins de déformations quaternaires continues. *Méditerranée*, 2, pp. 7-11.
- Baulig H., 1970.** *Vocabulaire Franco-Anglo-Allemand de géomorphologie.* Publ. Fac. Lettres. Strasbourg, Tome IV, 230 p.
- Baup F., Mouglin E., De Rosnay P., Hiernaux P., Frappart F., Frison R.-L., Zribi M., Viarre J., 2011.** Mapping surface soil moisture over the Gourma mesoscale site (Mali) by using ENVISAT ASAR data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, pp. 603-616.
- Belhedi A., 2005.** Différenciation et recomposition de l'espace urbain en Tunisie. *Cahiers du GREMAMO*, 18. Paris VII, 2005, pp. 21-46.
- Bellil M., 1978.** *Étude de la température et de quelques phénomènes climatiques particuliers dans la haute vallée de la Medjerda et ses régions de bordure.* Mém. C.A.R. Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 273 p.
- Ben Ayed N., 1986.** *Évolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de Tunisie du début du Mésozoïque à l'Actuel.* Thèse de Sciences. Univ. Paris-Sud Orsay, 327 p.
- Ben Boubaker H., 2003.** Apports pluviométriques et types de flux de surface en Tunisie du Nord. *ENS Éditions*, pp. 79-89.
- Ben Ghazi A., 2003.** *Le bassin-versant de l'oued Tessa (Haut-Tell, Tunisie). Étude morphologique des héritages quaternaires.* Thèse de doctorat, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis., 303 p.
- Ben Hassine H., Rejeb M., 2003.** *Crues et inondations dans le bassin versant de la moyenne Mejerda (janvier et février 2003).* Direction Générale des Ressources en Eau, 79 p.
- Ben Oueddou H., Kallel R., Mamou H., 1990.** Les pluies exceptionnelles de janvier 1990 en Tunisie. Les conséquences hydrologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques. *C.R. Acad. Sc., Paris*, pp. 1375-1382.
- Benzarti Z., 1994.** Les variations interannuelles de la pluviométrie en Tunisie. *In : La variation du climat et de l'homme en Tunisie.* Université de Tunis I, Vol., 3, pp. 63-83.
- Berbergruger A., 1857.** *Itinéraires archéologiques en Tunisie.* *Revue africaine*, 4, 392 p.

- Bergaoui Z.-K., 1989.** Occurrence des sécheresses dans le bassin de la Medjerda (Tunisie). *Revue des sciences de l'eau*, 2, 3, pp. 429-447.
- Berger J.-F., Bravard J.-P., Brochier J.-L., Franc O., Salavador P.-G., Vérot-Bourrély A., 2008.** La Géo-archéologie fluviale dans la vallée du Rhône (Sysse-Donzière), bilan sommaire de 25 ans de recherche. *Actes du XXX^e colloque international de l'A.F.E.A.F.*, co-organisé avec l'A.P.R.A. B (Saint-Romain-en-Gal, 26-28 mai 2006), pp. 27-37.
- Bergeron M., 1992.** *Vocabulaire de la géomatique*. Office de la langue franç., Québec, 41 p.
- Beschaouch A., 1976.** Sur la localisation d'Abitina, la cité des célèbres martyrs africains. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 2, pp. 255-266.
- Beschaouch A., 1986.** De l'Africa latino-chrétienne à l'Ifriqiya arabo-musulmane : question de toponymie. *Académie des Inscriptions et Belles-lettres*, 3, pp. 530-549.
- Beschaouch A., 1993.** Note liminaire : énigmes à Chemtou. *In : Simitthus*, Band I., pp. 13-14.
- Bkhairi A., 2012.** Suffosion et érosion hydrique en milieux semi-arides, le cas des Hautes Steppes tunisiennes (Tunisie centrale). *Physio-Géo - Géographie physique et environnement*, VI, pp. 1-22.
- Bomer B., Naoui L., 1990.** L'impact de la crue et de l'inondation de fin de mars 1973 sur le lit fluvial et la plaine alluviale de la basse Mejerda. *Bull., Assoc., Géogr., Franç., Paris*, 1, pp. 41-46.
- Bonn F., Rochon G., 1992.** *Précis de télédétection. Principes et méthodes. Volume 1*. UREF. 457 p.
- Bonniard F., 1934.** *La Tunisie du Nord. Le tell septentrional. Étude de géographie régionale*. Librairie orientaliste, Paul Gueuthner, Paris, 534 p.
- Bonvallot J., 1979.** Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médenine (Tunisie du Sud) au cours des pluies exceptionnelles de mars 1979. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Sci. Hum. Vol.*, XVI, pp. 233-249.
- Boujarra A., Ktita H., 2009.** Les facteurs de l'amplification de l'inondation de la ville de Tataouine le 24 septembre 1995 (Sud-Est Tunisien). *Actes du colloque international : risques naturels en méditerranée occidentale*, France, pp. 195-206.
- Bourgou M., 1993.** Le bassin-versant du Kébir-Miliane (Tunisie Nord-orientale). Étude géomorphologique. *Pub. Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis*, Série 2, Géogr., Vol. 18, 435 p.
- Bourgou M., Oueslati A., 1984.** Les conséquences morphologiques des inondations d'octobre 1982 dans le grand Sfax. *Rev., Tun., de Geogr.*, 12, pp. 157-170.
- Bourgou M., Oueslati A., 1987.** Les dépôts historiques de la vallée du Kébir-Miliane (N-E de la Tunisie). *Méditerranée*, 60, 1, pp. 43-49.
- Bousnina A., 1986.** Variabilité des pluies en Tunisie. *Pub. Fac. Sc. Hum. Et Soc. Tunis.*, Sér. Géogr., 22, 308 p.
- Brahim F., 2005.** Le Sahel central et méridional (Tunisie orientale) : géomorphologie et dynamique récente du milieu naturel. Thèse de doctorat. Publ. Fac. Lettres. Sc. Hum. Sousse, 302 p.
- Brahim F., 2018.** Villes et risques d'inondation dans le Sahel tunisien : les enseignements des inondations de l'automne 2016. *Villes, milieux et territoires en Tunisie (hommage au Pr. Ridha Lamine)*. Éditions : Fac. Lettres. Sc. Hum. Sousse, pp. 219-246.
- Bravard J.-P., 1982.** À propos de quelques formes fluviales de la vallée du Haut-Rhône français. *Revue de Géographie de Lyon*, 1, pp. 39-48.
- Bravard J.-P., 2004.** Le risque d'inondation dans le bassin du haut Rhône. Quelques concepts revisités dans une perspective géohistorique. *Fleuve et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*, pp. 397-408.

- Bravard J.-P., Petit F., 1997.** *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial.* Armand Colin / Masson. Paris, 222 p.
- Brice J.C., Blodgett J.-C., 1978.** *Countermeasures for hydraulic problems at bridges.* Vol., I. Analysis and Assessment. Geological Survey, 169 p.
- Buishand T.-A., 1984.** Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 73, pp. 51-69.
- Burnouf J., Carcaud N., Garcin M., 2009.** Nouvelle histoire pour la Loire entre nature et société. *Géosciences*, BRGM, 209, pp. 72-79.
- Burrollet P.-F., 1953.** Méandres anciens et nouveaux dans la région de Souk el Arba. *Bull. Soc. Sc. Nat. de Tunisie*, 6, 5 p.
- Cagnat R., Saladin H., 1894.** *Voyage en Tunisie.* Paris, librairie Hachette et Cie, 419 p.
- Caillat P., 1882.** Le plan des ruines de Chemtou. In : *Description des Antiquités de la régence de Tunis. Monuments antérieurs à la conquête arabe*, Fasc. 2. Saladin H., p. 10 et 29.
- Carcaud N., 2016.** L'hydrosystème et le changement : étude de cas dans le bassin de la Loire. *BSGLg*, 67, pp. 209-222.
- Carton L., 1891.** Essai de topographie archéologique sur la région de Souk-el-Arba. *Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques*, Paris, E. Leroux, pp. 3-41.
- Carton L., 1895.** *Découvertes épigraphiques et archéologiques faites en Tunisie (région de Dougga).* Bibliothèque numérique Gallica, 425 p.
- Carton L., 1912.** *Le Nord-Ouest de la Tunisie, ruines romaines, forêts, montagnes, colonisation.* Guide illustré, 33 p.
- Castany G., 1954.** Les grands traits structuraux de la Tunisie. *Bull. Soc. Géol. France*, 6, pp. 151-173.
- Cazals C., Rapinel S., Frison P.-L., Bonis A., Mercier G., Mallet C., Corgne S., Rudent J.-P., 2016.** Mapping and characterization of hydrological dynamics in a coastal marsh using high temporal resolution Sentinel-1A images. *Remote sens.*, 8, 570, 17 p.
- Chamley H., Deconinck J.-F., 2011.** *Bases de sédimentologie.* Dunod. Paris, 213 p.
- Chaouali M., 2008.** L'espace urbain de la moyenne Medjerda et du haut-Tell à l'époque historique antique. *Revue : La vie culturelle*, 112, Tunisie, pp. 130-136 (en arabe).
- Cherif A., 2008.** Mobilisation et transfert de l'eau. In : *Atlas de l'eau en Tunisie.* Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis. Unité de Recherche "GREVACHOT", pp. 94-97.
- Cherif A., Kassah A., 1991.** Aménagement des campagnes tunisiennes. Enjeux et contradictions. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 4, pp. 289-297.
- Cherni S., Khelifi S., Louati M.-H., 2010.** Suivi de l'envasement de la retenue du barrage de Nebeur sur l'oued Mellegue (Le Kef). *Actes des 17^{èmes} Journées Scientifiques sur les Résultats de la Recherche Agricoles*, 16 et 17 décembre 2010, pp. 754-766.
- Chorowicz J., Deroin J.-P., 2003.** *La télédétection et la cartographie géomorphologique.* Imprimé en France par Dupli-Print, 143 p.
- Chouari W., 2009.** Environnement et risques naturels dans le grand Tunis : approche cartographique. Thèse de doctorat. Université Paris.Diderot (Paris 7), 408 p.
- Claude J., Pontanier R., 1971.** *Quelques données sur les crues, les modifications morphologiques et l'évolution des eaux et des alluvions du bassin Lebben-Ouadrane après les pluies de l'automne de l'automne de 1969.* Dir. Ress. Eau et en Sol, 69 p.
- Claude J., Francillon G., Loyer Y.-J., 1977.** Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973. *Cahier ORSTOM, série hydrologie.* Vol. XIV, n° 1, 1977, pp. 37-109.

- Claude J., Loyer J.-L., 1982.** *Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973 en Tunisie : aspects quantitatifs et qualitatifs du transport et du dépôt.* ORSTOM-DRES, Tunis, pp. 211-218.
- Crutzen P.-J., 2002.** Geology of mankind. *Nature*, 415, p. 23.
- Dabas A., Flamant C., 2002.** Les instruments de télédétection au sol. *Rev. La Météorologie*, 39, pp. 76-82.
- Dallel J., 2008.** *Les événements pluviométriques exceptionnels en Tunisie : recherche d'une téléconnexion avec les oscillations Nord Atlantique et étude d'impacts hydrologiques.* Thèse de doctorat, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 338 p.
- Daoud A., 2013.** Retour d'expérience sur les inondations dans l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) de 1982 à 2009 : de la prévention à la territorialisation du risque. *Revue Géographique de l'Est*, 43, 1-2, 14 p.
- Daoud A., 1982.** À propos des pluies exceptionnelles du mois d'octobre 1982 à Sfax. *Rev., Tun., Géogr.*, 21/22, pp. 11-31 (en arabe).
- De Césarée P., 1990.** *La guerre contre les Vandales. Guerres de justinien.* Livres III et IV. Traduit et commenté par Denis Roques. Paris. Les belles-Lettres, 286 p.
- Desmos Y.-L., Regner P., Delwart S., Engdahl M., Benveniste J., Fourmelis M., Pinnock S., 2015.** The European Space Agency. EO missions and their exploitation for land science and applications. *European Space Agency ASRIN/ESTEC/HAR WELL*, 119 p.
- DGBTH., 2012.** *Rapport du comité d'évaluation de la gestion des barrages et des établissements hydrauliques et des oueds dans le Nord-Ouest en février 2012.* Direction Générale des Barrages et des Travaux Hydrauliques, 87 p (en arabe).
- DGBTH., 2015.** *Les crues de février et mars 2012 à l'aval du barrage de Sidi-Selem.* DGRE, Tunis, 112 p (en arabe).
- Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques., 2015.** *Rapport sur les inondations à l'aval du barrage de Sidi-Selem*, 112 p.
- Djaïd H., Talbi M., Dachraoui F., Dhouib A., M'rabet M.-A., Mahfoudh F., 2008.** Le Moyen Age (27 - 982 H. / 647 - 1574). *Histoire générale de la Tunisie.* Tome II. Sud Éditions, Tunis, 433 p.
- Djebbi M., Marzouki A., Daouthi S., M'Rabet K., 2006.** Numerical model of Medjerda flooding downstream of Sidi-Selem dam. *Rev. Environment and Water*, 6 p.
- Djebbi M., 2012.** Delineation of the flood prone zones along the Medjerda river downstream of Sidi-Selem dam in Tunisia. *Journal of sustainable watershed science and management*, 1, 2, pp. 46-52.
- Dridi L., 2015.** *Les villages et les sociétés villageoises en Ifriqiya au haut Moyen Age (IIe – V^e s. H. / VIIIe – XI^e s. J.C.). Approche historique et archéologique.* Thèse de doctorat soutenue en 2008. Publ. Fac. Lettres. Sc. Hum. Kairouan, 2015, 479 p.
- Fadhlaoui S., 2017.** Héritages holocènes et dynamiques morphologiques du bassin versant du Massengh et des confluences avec les oueds Sbiba et Hathob (Dorsale tunisienne – Tunisie du Centre-ouest). Thèse de doctorat. Université de Paris Sorbone IV, 297 p.
- Faust D., Zielhofer C., Escudero R.-B., Diaz Del Olmo F., 2004.** High-resolution fluvial record of late Holocene geomorphic change in northern Tunisia: Climatic or human impact? *Quaternary Science Reviews*, 23, pp. 1757-1775.
- Fehri N., Mathlouthi S., 2008.** Extension urbaine et risque d'inondation sur le piémont est du Jbel Ennahli (Ariana-Tunisie). In : *Actes du septième colloque du départ. Géographie.* Fac. Lettres. Sc. Hum. Manouba. *Villes : dynamiques, climat et environnement.*, pp. 313-334.

- Fehri N., Samaali H., Abaza K., 2009.** Les inondations catastrophiques du 13 octobre 2007 dans le secteur de Sabbalet Ben Ammar entre aléa climatique et responsabilité anthropique (Grand Tunis - Tunisie). *Rev. Tun. géogr.*, 40, pp. 31-55.
- Fehri N., 2014.** L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion. *Physio-Géo. Géographie Physique et Environnement*, 8, pp. 149-175.
- Fehri N., 2018.** Apport de la géoarchéologie et des SIG à l'étude de la dynamique fluviale de la Medjerda dans la plaine de Medjez El-Bab depuis l'époque romaine. In : *Mélanges en l'honneur de la Mejerda ou l'éternel Bagrada*. Université de la Manouba, pp. 53-97.
- Fort M., Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Plet A., André G., Mering C., 2001.** Impacts hydromorphologiques des fortes précipitations des 12-13 novembre 1999 sur la retombée méridionale de la montagne noire : l'exemple de l'Argent double (Aude). *Actes du colloque Médi-Terra*, 26-28 juin 2000. Presses universitaires de Perpignan, pp. 41-52.
- Fouache É., 2010.** L'approche géoarchéologique. *Travaux de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée*, 56, pp. 17-30.
- Gao B.-C., 2006.** NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.*, 58, pp. 257-266.
- Gauckler P., 1898.** *Enquêtes sur les installations hydrauliques romaines en Tunisie*. Tunis, imprimerie rapide (Louis Nicolas et Cie), 118 p.
- Gauckler P., 1899.** *Travaux d'eau des Romains*. Bibliothèque nationale de Tunisie, Tunis, pp. 111-203.
- Gautier E. 1994.** Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine. L'exemple de Buëch (Alpes du sud). *Rev. géogr., Lyon*, 69,1, pp. 57-62.
- George P., 1970.** *Dictionnaire de la géographie*. Presses universitaires de France, 4^e édition, 510 p.
- George P., Verger F., 2004.** *Dictionnaire de la géographie*. Presses universitaires de France, 8^e édition, 462 p.
- Ghanmi M., 1980.** *Étude géologique du Djebel Kebbouch (Tunisie septentrionale)*. Thèse de 3^e cycle, Univ. Paul-Sabatier Toulouse, 141 p.
- Gharbi M., 2016.** *Étude des crues et du transport sédimentaire associé. Application au bassin versant de la Medjerda*. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 164 p.
- Ghorbel A., 2000.** *Crue des 26 et 27 mai 2000*. Dir. Gén. Ress. Eau, 28 p.
- Ghorbel A., 2003.** *Crues et inondations dans le bassin versant de la Mejerda (janvier et février 2003)*. Rapport de synthèse. DRE, Tunis, 20 p.
- Ghottis C., Sainfeld P., 1955.** *Carte géologique de la Tunisie, échelle 1/50 000, feuille n° 32 de Ghardimaou*, note explicative, Tunis, 27 p.
- Gilbert G.-K., 1914.** *The transportation of debris by running water*. Washington, Government Printing Office, 263 p.
- Ginestous G., 1927.** *Le régime des pluies en Tunisie pendant la période 1901-1925*. Archives Générales, 224 p.
- Girard M.-C., Schvartz C., Jabiol B., 2011.** *Étude des sols. Description, cartographie, utilisation*. Dumont, Paris, 404 p.
- Golven J.-C., 2013.** La représentation des villes antiques de Tunisie. In : *La Tunisie antique et islamique*. Édition Errance, Paris, pp. 112-121.
- Gottis C. H., Sainfeld P., 1955.** *Carte géologique de la Tunisie, échelle 1/50 000, feuille n° 31 de Ghardimaou*. Notice explicative, Tunis, 27 p.

- Griira M., 2015.** Le franchissement des cours d'eau en Afrique Proconsulaire. Notes préliminaires sur les ponts de la voie Carthage - *Theveste*. In : *Actes du deuxième colloque international : le réseau routier dans le Maghreb antique et médiéval, 2015*. Université de Sousse, pp. 103-128.
- Guellala R., Inoubli M.-H., Alouani R., Manaa M., Amiri F., 2005.** Caractérisation des réservoirs aquifères de la haute vallée de la Medjerda, Tunisie. *Africa Geoscience Review*, 12, 2, pp. 141-156.
- Guellouz A., Masmoudi A., Smida M., Saadaoui A., 2010.** *Les temps modernes (941 – 1247 H. / 1534 – 1881). Histoire générale de la Tunisie*. Tome III. Sud Éditions, Tunis, 495 p.
- Guérin V., 1862.** *Voyage archéologique dans la régence de Tunis*. Tome second. Paris, 395 p.
- Habel A., 1912.** *Mettons en valeur l'Afrique du Nord*. Bibliothèque numérique Gallica, 191 p.
- Hammami S., 2010.** Hydrodynamique fluviale de la Medjerda. Mém. Master. École nationale d'ingénieurs de Tunis, 100 p.
- Hamrouni A., 1997.** *Encyclopédie des villes tunisiennes*. Média Com, 1^{ère} édition, 196 p (en arabe).
- Hamza A., 1993.** Les conséquences géomorphologiques des inondations de janvier 1990 en Tunisie centrale et méridionale. *Actes du 2^{ème} congrès des Géographes Africains (Rabat et Agadir)*, pp. 113-129.
- Hamza A., Methlouthi S., Lebdi E., Zenzem A., Dassi K., Mechi B., Boujarra A., 1991.** Impact morphologique des inondations de janvier 1990 sur la région de Maknessy (Tunisie centrale). *Rev. Géographie et développement*, 11, pp. 7-29.
- Hanqiu X., 2006.** Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing.*, 27,14, pp. 3025-3033.
- Henia L., 1980.** *Les précipitations pluvieuses dans la Tunisie tellienne*. Publications de l'Université de Tunis, 14, 263 p.
- Henia L., 1993.** *Climat et bilans de l'eau en Tunisie. Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Pub. Univ. Tunis, 1, 391 p.
- Hickin E.-J., 1974.** The development of meanders in natural river-channels. *American Journal of Science*, 274, pp. 414-442.
- Hickin E.-J., Nanson G.-C., 1984.** Lateral migration rates of river bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 11, pp. 1557-1567.
- Henry J.-B., Fellah K., Clandillon S., Allenbach B., De Frairpoint P., 2002.** Earth observation and case-based systems for floods risk management. *Geoscience and remote sensing symposium*, 2002, IGRSS., 3, pp. 1496-1498.
- Hlaoui Z., 2008.** *Les pluies quotidiennes en Tunisie*. Édition, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 410 p (en arabe).
- Hmercha H., 2016.** *Les risques d'inondation dans le bassin de Sfax*. Thèse de doctorat. Fac. Lettres. Sc. Hum. Sfax. Tunisie., 291 p.
- Hostache R., Puech C., Raclot D., 2007.** Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellitaires Radar. *Rev. Cybergeog : European Journal of geography*, 15 p.
- Hubert P., Carbonnel J.-P., Chaouche A., 1989.** Segmentation des séries hydro pluviométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, pp. 349-367.
- Inglada J., 2015.** *Cours de cartographie thématique*. M2-SIA, France, 55 p.
- INS., 1984.** *Recensements Généraux de la Population et des Logements*.
- INS., 2004.** *Recensement de la Population et de l'Habitat*.

- INS., 2014.** *Jendouba à travers le Recensement Général de la Population et de l'Habitat.*
- Institut National Agronomique de Tunisie., 2004.** *Étude des risques d'inondations sur l'oued Medjerda. Les crues de janvier-février 2003. La campagne topographique de juin 2003 et les périmètres inondés de janvier 2004.* INAT / ESIER / DGBGTH / DGRE / CRDA (s) Beja et Manouba, 62 p.
- Jaziri B., 2009.** *"Le bio et le barrage". Végétation riveraine et aménagements hydrauliques : eaux libres / eaux contraintes. Structures, fonctionnalités, représentations dans trois cours d'eau de la Tunisie septentrionale.* Thèse de doctorat en géographie physique, École Normale Supérieure Lettres et Sciences humaines, Lyon, 306 p.
- Jauzein A., 1967.** Contribution à l'étude géologique des confins de la Dorsale tunisienne (Tunisie septentrionale). *Annales des Mines et de la géologie*, 22, 475 p.
- Jendoubi S., 2000.** *Le bassin-versant de l'oued Siliana (Haut-Tell, Tunisie). Étude du modelé quaternaire.* Thèse de doctorat, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 331 p.
- Jones L.-S., Schumm S.-A., 1999.** Causes of avulsion: an overview. *Fluvial sedimentology VI*, pp. 169-178.
- Kassab A., 1970.** Les basses terrasses de la Medjerda dans la plaine de Testour-Slougua. *Rev. Tun. Sc. Soc.*, 7, pp. 119-157.
- Kassab A., 1979.** *L'évolution de la vie rurale dans les régions de la moyenne Medjerda et de Beja-Mateur.* PUT, Tunis, 675 p.
- Kassab F., 1979.** *Les très fortes pluies en Tunisie.* Pub. Univ. Tunis, 224 p.
- Kassab F., 1996.** *La sécheresse en Tunisie : cas de l'année agricole 1993-1994.* In : *Variabilité du climat et stratégies d'adaptation humaines en Tunisie.* Université de Tunis I, 6, pp. 203-230.
- Khanoussi M., 1988.** Disp (Ensator) M (Armorum) N (Umidicorum). *Rev. Africa.*, Tome X., Tunis, pp. 208-211.
- Khanoussi M., 1991.** Nouveaux documents sur la présence militaire dans la colonie julienne augustéenne de Simitthus (Chemtou, Tunisie). *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 4, pp. 825-839.
- Khanoussi M., 2008.** Chemtou et carrières de marbre numidique. *Revue : La vie culturelle*, 192, pp. 103-109 (en arabe).
- Khanoussi M., 2013.** Les carrières impériales de marbre numidique (marmor numidicum) de Chintou. In : *La Tunisie antique et islamique.* Éditions Errance, Paris, pp. 140-143.
- Kingumbi A., 2006.** *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale.* Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, 199 p.
- Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges J., Hubert P., Kallel R., 2001.** Étude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. *IRD*, Montpellier, pp. 341-350.
- Kondolf M., 1997.** Hungry water: Effects on dams and gravel mining of river channels. *Environmental Management*, 21, 4, pp. 533-551.
- Kouadio B.-H., Koumé K.-F., Saley B.-M., Biémi J., Ibrahima T., 2007.** Insécurité climatique et géorisques en côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la côte d'Ivoire). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 18, 1, pp. 29-37.
- Kundzewicz Z.-W., Robsen A., 2000.** *Detecting trend and other changes in hydrological data. WCDMP – 45. WMO / TD – No. 1013.* World meteorological organization, 158 p.
- Lagasse P.-F., Spitz W.-J., Zevenbergen L.-W., Zachmann D.-W., 2004.** *Handbook for predicting stream meander migration.* NCHRP, Report 533, Washington, D.C., 66 p.

- Lahmar L., 2005.** *Occupation du sol et risque d'inondation dans la plaine de Jendouba-Bou Salem.* Mém. de master, FLAH de la Manouba, 111 p.
- Lahmar L., 2009.** Les inondations et leur impact sur le paysage morphologique : le cas dans la plaine de Jendouba-Bou Salem (Nord-Ouest de la Tunisie). *Ol' Man River: Geo-archaeological aspects of rivers and river plains.* Archaeological reports Ghent university, 5, pp. 509-518.
- Lahmar L., 2019.** Caractérisation et cartographie des espaces inondés à la suite des pluies exceptionnelles de décembre 2016 en Tunisie centre-orientale : apport de la télédétection radar Sentinel-1B. *Rev. Tun. Géogr.*, 49-50, pp. 61-78.
- Lamoine L., Cébeillac-Gervasoni M., 2007.** Le pont dans l'Antiquité romaine à travers les témoignages épigraphiques. Continuité du cheminement et permanence du pouvoir. À propos de l'inscription A É, 1975, 134 (Tibre, confluence du Fossé Galeria). Siècles. *Cahiers du Centre d'histoire " Espace et cultures"*, 25, pp. 15-33.
- Lee A.-F.-S., Heghinian S.-R., 1977.** A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 4, pp. 503-506.
- Leopold L.-B., Bagnold R.-A., Wolman M.-G., Brush L.-M., 1960.** Flow resistance in sinuous or irregular channels. *Geological Survey Professional Paper*, 282-D, pp. 111-134.
- Leopold L.-B., Collins J.-N., Collins L.-M., 1993.** Hydrology of some tidal channels in estuarine marshland near San Fransisco. *CATENA.*, 20, pp. 469-493.
- Lespez L., 2007.** Dynamiques holocènes de systèmes fluviaux en Grèce du Nord : une approche comparative et multi-scalaire des interactions entre Nature et Société. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 49-66.
- Leveau P., 2005.** L'archéologie du paysage et l'Antiquité classique. Agri Centuriati. *An International Journal of Landscape Archaeology*, 2, pp. 9-24.
- Levêque C., Muxart T., Abbadie L., Weill A., Van der Leeuw S., 2003.** L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieus. *In : Quelles natures voulons-nous ?* Stedi, Paris, pp. 110-129.
- Macaire J.-J., 1990.** L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels : de la géodynamique à la chronostratigraphie. *Quaternaire*, 1, pp. 41-49.
- Malavoi R., Bravard J.-P., 2010.** *Éléments d'hydromorphologie fluviale.* Office national de l'eau et des milieux aquatiques. ONEMA, Paris, 223 p.
- Mcfeters S.-K., 1996.** The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *In : J. Remote Sens.*, 17, pp. 1425-1432.
- Meddi H., Meddi M., 2007.** Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Geographia Technica*, 2, pp. 49-55.
- Meddi H., Meddi M., 2009.** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 20, 1, pp. 57-65.
- Mehdouani M., 2014.** *Étude de l'érosion hydrique dans le Sahel septentrional et central (Tunisie orientale).* Thèse de doctorat, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 274 p.
- Mehdouani M., 2020.** Contribution à l'étude des inondations du 22 septembre 2018 dans la région du Cap Bon (Tunisie nord-orientale) : exemples dans les zones les plus touchées. *Rev. Tun. géogr.*, 52-53, pp. 167-198.
- Mellor A., Haywood A., Stone C., Jones S., 2013.** The performance of random forests in a operational setting for large area sclerophyll forest classification. *Remote sens.*, 5, pp. 2838-2856.
- Ministère de l'Agriculture., 1973.** *Rapport sur la crue de la Medjerdah du 27 au 29 mars 1973.* Direction EGTH. Division des barrages. Tunis., 14 p.

- Ministère de l'Équipement., 2012.** *Atlas numérique du gouvernorat de Jendouba*. Direction générale de l'aménagement du territoire (Dgat), 112 p.
- Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du territoire., 2010.** *Schéma directeur d'aménagement de la région économique du Nord-Ouest. Atlas cartographique*, 61 p.
- Miossec A., 1975.** Les pluies exceptionnelles de mars 1973 en Tunisie. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 428, 11 p.
- Mjejri Z., 2007.** *La rive gauche de l'oued Raghay entre Bled Taref et Chemtou (Tunisie nord-occidentale). Étude géomorphologique*. Mém. Master, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 119 p.
- Monchicourt C.-H., 1913.** *La région du Haut-Tell en Tunisie (Le Kef, Tébourouk, Mactar, Thala). Essai de monographie géographique*. Thèse pour le doctorat ès Lettres, Fac. Lettres. Univ. Paris, 487 p.
- Murgatroyd A.-L., Ternan J.-L., 1983.** The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, pp. 357-369.
- Muzy A., 2005.** *Hydrologie générale*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 111 p.
- Naoui L., 1995.** *Le lit fluvial et la vallée alluviale de la Medjerda (Tunisie). Étude de dynamique et de géomorphologie fluviales*. Thèse de doctorat, Univ. Paris X-Nanterre, 249 p.
- Nicholson S.-E., Kim J., Hoopingarner J., 1988.** *Atlas of African rainfall and its interannual variability*. Department of Meteorology, Florida state University, Tallahassee, USA, 237 p.
- Noureddine A., 1979.** *Évolution économique, méthodes sociales et luttes politiques en Tunisie dans les années trente*. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Univ. Paris VII, 323 p.
- Observatoire National de l'Agriculture., 2018.** *ONAGRI vigilance. Disponibilité de l'eau : problèmes de l'envasement des barrages*, pp. 5-10.
- ORSTOM., 1973.** *Les crues de mars 1973 dans le bassin de la Medjerdah, documents photographiques*. Ministère de l'Agriculture. Mission ORSTOM en Tunisie, 117 p.
- Oueslati A., 1993.** *Les côtes de la Tunisie. Recherches sur leur évolution au Quaternaire*. Publ. Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis. 402 p.
- Oueslati A., 1999.** *Les inondations en Tunisie*. Les presses d'ORBIS, 206 p.
- Oueslati A., 2005.** Sur l'évolution du paysage géomorphologique du fond des vallées depuis l'Antiquité romaine : exemples dans le bassin-versant de l'oued Majerda. *Rev. Tun. Géogr.*, 36, Alif Éditions, pp. 101-170.
- Ould Bagga M.-A., 2003.** *Évolution Tectono-sédimentaire et analyse structurale d'un segment des maghrébides orientales. La région de Ghardimaou-Fernana (Tunisie Nord occidentale)*. Thèse de doctorat, Fac. Sc. Tunis, 507 p.
- Pardé M., 1954.** Sur la genèse des méandres et sur les embarras de la dynamique fluviale. *Géocarrefour*, 29, 1, pp. 29-42.
- Pardé M., 1930.** Les inondations désastreuses de mars 1930. *Annales de Géographie*, 39, 219, pp. 244-248.
- Paskoff R., 1985.** *Géographie de l'environnement. Problèmes d'utilisation des ressources et d'adaptation aux contraintes des milieux naturels. Exemples tunisiens*. Publications de l'Université de Tunis, 227 p.
- Pellegrin J.-C., Salomon J.-N., 2001.** Hydrocompaction, dissolution, suffosion et soutirage. Contribution à la formation des dépressions fermées. *Rev. KARSTOLOGIA*, n° 37, 1/2001, pp. 54-56.
- Petit F., 1991.** L'influence des plantations de résineux en fond de vallée sur l'évolution géomorphologique de rivières de Haute-Belgique. In : *Actes du colloque international : Impacts liés aux travaux d'aménagement sur les cours d'eau. Évaluation, méthodes, aide à la décision*. Belgique, pp. 341-352.

- Pettit A.-W., 1979.** A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 2, pp. 126-135.
- Peysonnell J.-A., 1838.** *Voyages dans les régences de Tunis et d'Alger*. Tome premier. Paris, Bibliothèque Gallica (BNF), 485 p.
- Piégay H., 1996.** La forêt d'inondation de cinq rivières du bassin rhodanien : de la notion de patrimoine écologique à celle d'"espace tampon". In : *Annales de Géographie*, 1996. T. 105, 590, pp. 347-368.
- Poncet J., 1959.** L'évolution géographique du peuplement tunisien à l'époque récente. *Annales de géogr.*, 68, 367, pp. 247-253.
- Poncet J., 1970.** La "catastrophe" climatique de l'automne 1969 en Tunisie. *Annales de Géographie*, 79, 435, pp. 581-595.
- Puech C., Raclot D., Maurel P., 2003.** Intérêt des images à très haute résolution spatiale pour évaluer le risque d'inondation. *Rev. Ingénieries*. N° spécial, 2003, pp. 83-96.
- Rakob F., 1993.** *Simitthus. I. Die Steinbrüche und Die Antike stadt*. Verlag Philipp von zabern, Mainz Am Rhein, 103 p.
- Rejeb M., 2012.** *Crués et inondations de la Medjerda (février-mars 2012)*. Rapport de synthèse. Dir. Gén. Ress. Eau, Tunis, 36 p.
- Rejeb M., Ben Hassine H., 2012.** *Note sommaire sur la prévision de l'apport de la fonte de neige au bassin Bouhertma durant la période du 14 au 20 février 2012*. Ministère de l'Agriculture. Direction Générale des Ressources en Eau. Tunis, 12 p.
- Rejeb M., Lazrak A., Frij H., 2015.** *La crue de la Medjerda (février-mars 2015) du barrage Sidi-Selem à la mer*. Direction Générale des Ressources en Eau. Tunis, 81 p.
- Riahi H., 2018.** Patrimoine, territoires ruraux et développement local dans les plaines de la basse-vallée de la Mejerda. Le cas de Mjez-El-Bab et de Testour. In : *Mélanges en l'honneur de la Mejerda ou l'éternel Bagra*. Université de la Manouba, pp. 132-157.
- Robin M., 1998.** *La télédétection. Des satellites aux systèmes d'informations géographiques*. Éditions Nathan, 1995, mise à jour, 1998, 319 p.
- Rodier J.-A., Colombani J., Claude J., Kallel R., 1981.** *Le bassin de la Medjerda : Monographies hydrologiques*. ORSTOM., 6, Paris, 451 p.
- Romdhan H., 2005.** *Le modelé de la vallée de la Mejerda de Bou Salem à Testour*. Mém. Master, Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, 99 p.
- Rouvier H., 1977.** Géologie de l'Extrême Nord tunisien, tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrême orientale de la chaîne nord-maghrébine. *Annales des Mines et de la géologie*, 29, 427 p.
- Saadaoui A., 1982.** *Les calamités et les catastrophes naturelles dans le Maghreb médiéval (du milieu du XI^e siècle au milieu du XV^e siècle)*. C.A.R., Fac. Lettres. Sc. Hum. Tunis, 165 p (en arabe).
- Saadaoui M., Ben Mansour H., 2003.** *Crués et inondations dans la haute vallée de la Medjerda. Crués de janvier-février 2003*. Dir. Gén. Ress. Eau, 66 p.
- Sakka M., Boughrara L., 2008.** Pluies journalières maximales selon différentes périodes de retour. In : *Atlas de l'eau en Tunisie*. Publ. Fac. Sc. Hum. Soc. Tunis, pp. 22-23.
- Saladin H., 1893.** *Description des antiquités de la régence de Tunis : monuments antérieurs à la conquête arabe*. Fascicule II. Paris, Ernest Leroux Éditeur, 188 p.
- Salama P., 1951.** *Les voies romaines de l'Afrique du Nord*. Imprimerie officielle du gouvernement général de l'Algérie, 142 p.

- Schumann G., Hostache R., Puech C., Hoffmann L., Matgen P., Pappenberger F., Pfister L., 2007.** High-resolution 3-D flood information from radar imagery for flood hazard management. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing.*, 45, 6, pp. 1715-1725.
- Schumm S.-A., 1963.** Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. *Geological society of America bulletin.*, 4, pp. 1089-1100.
- Schumm S.-A., 1985.** Patterns of alluvial rivers. *Rev. Earth Planet. Sci.*, 13, pp. 5-27.
- Sharpenseel H.-W., Zakosek H., 1979.** Phasen der Bodenbildung in Tunesien (vorabuntersuchungen). *Zeitschr. Geomorphol.*, 33, pp. 118-126.
- Shaw M.-D., 1743.** *Voyages de Monsr. Shaw, M.D., dans plusieurs provinces de la barbarie et du levant contenant des observations géographiques, physiques, philosophiques et mêlées sur les royaumes d'Alger et de Tunis, sur la Syrie, l'Egypte et l'Arabie Pétrée.* Tome premier. Bibliothèque Gallica (BNF), Paris, 415 p.
- Simon A., Bennett S.-J., Neary V.-S., 2004.** Riparian vegetation and fluvial geomorphology: problems and opportunities. *American Geophysical Union*, 10 p.
- Slim H., 2008.** Le génie romain : version africaine. *Rev. GEO.* Prisma Presse, 2008, pp. 23-25.
- Cherif. A., 1994.** Politique de l'eau et aménagement des campagnes. *Cahiers de la Méditerranée*, 49, 1, pp. 83-104.
- Slim H., Mahjoubi A., Belkhoja K., Ennabli A., 2010.** *L'Antiquité. Histoire générale de la Tunisie.* Tome 1. Sud Éditions, Tunis, 460 p.
- Solignac M., 1927.** *Étude géologique de la Tunisie septentrionale.* Thèse de doctorat, Université de Lyon, 1927, 756 p.
- Steffen W., Grinevald J., Crutzen P., McNeill J., 2011.** The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 369, pp. 842-867.
- Steinmann S., Bartels G., 1982.** Quartärgeomorphologische beobachtungen aus Nord-und süd Tunesien. *Catena*, 9, pp. 95-108.
- Thorne C.-R., 1991.** Bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi rivers, USA. *Hydrology for the Water Management of Large River Basins*, 201, pp. 301-313.
- Thorne C.-R., 1997.** Channel types and morphological classification. In: *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management.* Wiley, Chichester, pp. 175-222.
- Tissot C., 1881.** *Le bassin du Bagra et la voie romaine de Carthage à Hippone par Bulla Regia.* Imprimerie Nationale, Paris, 116 p.
- Tissot C., 1884.** *Exploration scientifique de la Tunisie. Géographie comparée de la province romaine d'Afrique, tome premier.* Imprimerie Nationale, Paris, 741 p.
- Tissot C., 1888.** *Exploration scientifique de la Tunisie. Géographie comparée de la province romaine d'Afrique, tome second.* Imprimerie Nationale, Paris, 868 p.
- Torres R., Snoeij P., Davidson M., Bibby D., Lockos S., 2012.** The Sentinel-1 mission and its application capabilities. *Geoscience and remote sensing symposium (IGARSS)*, 4 p.
- Trabelsi B., 2008.** Echec du projet morisque à Mjaz Al-Bab : une ville face à la stratégie d'une commune. *La Revue historique maghrébiennne*, 132, pp. 48-67.
- Tricart J., 1958.** La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye et la Cerveyrette. *Rev. Géogr. Alpine*, 46, 4 pp. 565-627.
- Tricart J., 1977.** Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. *Annales de Géogr.*, 86, 473, pp. 1-54.
- Violard E., 1906.** *La Tunisie du Nord. Les contrôles civils de Souk-El-Arba, Bêjà, Tunis, Bizerte et Grombalia. Rapport à M. le Président Général S. Pichon.* Imprimerie moderne (J. ORLIAC), Tunis, 402 p.

- Wade S., Rudent J.-P., Ba K., Ndoye B., 2008.** Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : applications à l'étude des inondations urbaines de Saint Louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à Nioro-Du-Rip (Sénégal). *Rev. Télédétection*, 8, 3, pp. 203-210.
- Wang X., Ge L., Li X., 2012.** Evaluation of fitters of ENVISAT ASAR speckle suppression in pasture area. *ISPRS Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, I-7, pp. 341-346.
- Yesou H., Allenbach B., Andreoli R., Battiston S., Bestault C., Clandillon S., Fella K., Meyer C., Tholey N., De Fraipont P., 2007.** Synergy of high SAR and optical data for flood monitoring: the 2005-2006 Central European floods gained experience. *In: Envisat symposium 2007*. Montreux, Switzerland, 6 p.
- Yesou H., Li J., Malosti R., Andreoli R., Huang S., Xin J., Cattaneo F. 2008.** Near real time flood monitoring in R.P. China during the 2005 and 2006 flood and typhoons seasons based on ENVISAT ASAR medium and high resolution images. *Beijing, P.R, china*, 6 p.
- Zahar Y., 1997.** *Éléments d'hydrologie pour l'aménagement. Modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie centrale*. Publ. Fac. Lettres. Manouba. Série Géogr., 5, 287 p.
- Zahar Y., Ghorbel A., Albergel J., 2008.** Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi-Selem dam (Tunisia). *Journal of Hydrology*, 351, pp. 318-330.
- Zargouni F., 1978.** Analyse structurale de la chaîne de Lansarine (zone de diapirs, atlas tunisien). *Bull. Soc. Sc. Nat. Tunisie*, 13, pp. 97-104.
- Zerai K., 2006.** *Les environnements holocènes actuels dans le bassin versant de l'oued Sbeitla (Tunisie centrale)*. Thèse de doctorat, Université Paris VII-Denis Diderot, 333 p.
- Zielhofer C., Faust D., Diaz Del Olmo F., 2002.** Sedimentation and soil formation phases in the Ghardimaou basin (northern Tunisia) during the Holocene. *Quaternary International*, 93-94, pp. 109-125.
- Zielhofer C., Faust D., 2003.** Paleoenvironment and morphodynamics in the mid-Medjerda floodplain (northern Tunisia) between 12,000 BP and 2,000 BP. Geoarchaeological and geomorphological findings. *Alluvial archaeology in Europe*. Balkema, Rotterdam, pp. 203-216.
- Zielhofer C., Faust D., Escudero R.-B., Diaz Del Olmo F., Kadereit A., Moldenhauer K.-M., Porras A., 2004.** Centennial-scale late Pleistocene to mid-Holocene synthetic profile of the Medjerda valley, northern Tunisia. *The Holocene*, 14, 6, pp. 851-861.
- Zielhofer C., Faust D., Diaz Del Olmo F., Escudero R.-B., 2005.** Fluvial record of late Pleistocene and Holocene geomorphic change in Northern Tunisia – Global, regional or local climatic causes? *Pages News. Post Global changes*, 13, 1, pp. 13-14.
- Zielhofer C., Faust D., Linstädter J., 2008.** Late Pleistocene and Holocene alluvial archives in the Southwestern Mediterranean: changes in fluvial dynamics and post human response. *Quaternary International*, 181, pp. 39-54.
- Zimmerman R.-C., Goodlett J.-C., Comer G.-H., 1967.** The influence of vegetation on channel form of small streams. *In: International Association of Scientific hydrology. Symposium on river morphology*. Wallingford, England, pp. 255-275.

Table des figures

Fig. 1. Images hypsométriques en équidensités colorées montrant les reliefs du bassin-versant de la vallée de la Medjerda et de sa partie moyenne, objet de l'étude.	14
.....	
Fig. 2. Sectorisation du cours moyen de la vallée de la Medjerda (4 secteurs).	16
.....	
Fig. 3. Cadre orohydrographique du secteur de Ghardimaou-Oued Meliz-Sidi Meskine (S1).	17
.....	
Fig. 4. Contexte orohydrographique du secteur de Jendouba- Bou Selem-Mestouta (S2).	21
.....	
Fig. 5. Cadre topographique et hydrologique du secteur du barrage de Sidi-Selem (S3).	26
.....	
Fig. 6. Localisation et grandes lignes du paysage géomorphologique de Testour à T'borba (S4).	29
.....	
Fig. 7. Coupes géologiques à travers la vallée moyenne de l'oued Medjerda.	35
.....	
Fig. 8. Carte des affleurements lithostratigraphiques du bassin fluvial de la moyenne Medjerda.	40
.....	
Fig. 9. Les principaux axes et accidents structuraux de la moyenne vallée de la Medjerda.	41
.....	
Fig. 10. Dispositif hydrographique du tronçon moyen de la vallée de la Medjerda.	43
.....	
Fig. 11. Localisation des postes pluviométriques et données d'intensité journalière de pluie pour les périodes 1928-1958 et 1980-2009.	48
.....	
Fig. 12. Quelques interfaces des programmes informatiques utilisés.	49
.....	
Fig. 13. Distribution des hauteurs pluviométriques annuelles pour la période 1980-2009. Les diagrammes en barre expriment le pourcentage saisonnal des moyennes annuelles au cours de la même période.	50
.....	
Fig. 14. La variabilité absolue des pluies est généralement proportionnelle aux totaux moyens annuels. Des exceptions existent, néanmoins, comme cela est montré dans l'encadré.	51
.....	
Fig. 15. Les durées de la saison pluvieuse sont très dissymétriques par rapport à la médiane.	54
.....	
Fig. 16. Répartition des intensités journalières pluviométriques pour la période 1928-1958 (I, II, III) et la période 1980-2009 (1, 2, 3).	55
.....	
Fig. 17. Indice standardisé de précipitations et décomposition des séries en séquences humides (couleur bleu) et en séquences sèches (couleur jaune).	59
.....	
Fig. 18. Les indices de pluviosité et de l'écart à la moyenne ; les couleurs bleu et jaune signifient respectivement une séquence humide et sèche.	60
.....	
Fig. 19. Présentation de quelques ruptures pluviométriques détectées par les tests statistiques	64
.....	

Fig. 20. Distribution des inondations enregistrées sur les périodes à tendances humide (flèche vers le haut) et sèche (flèche vers le bas).	66
Fig. 21. Photo aérienne de 1974 montrant l'ancien cours de la Medjerda, passant au cœur de la ville de Bou-Selem, avant d'être envahi, aujourd'hui totalement, par le bâti.	69
Fig. 22. Extension spatiale de l'agglomération de Jendouba durant la période 1948-2012, et problèmes d'inondation et de stagnation des eaux dans les terres déprimées.	72
Fig. 23. Processus de suburbanisation dans la ville de Jendouba aux dépens des sections d'oueds abandonnés comme celui de Mellègue.	73
Fig. 24. Extension spatiale de la ville de Mjez El-Beb (1948-2013), parfois au détriment des sections naturellement inondables des oueds.	75
Fig. 25. Les ouvrages de grande et moyenne hydraulique ainsi que les terroirs irrigués appartenant à la partie centrale de la vallée de la Medjerda.	76
Fig. 26. Schéma topologique du système hydraulique interconnecté du Nord de la Tunisie. Certains noms de barrages figurant au texte sont mis en surbrillance (d'après Cherif, 2008, p. 94).	77
Fig. 27. Synthèse stratigraphique synthétique des dépôts accumulés dans les plaines de la moyenne vallée de l'oued Medjerda (Zielhofer <i>et al.</i> , 2005).	84
Fig. 28. Évolution de la position du chenal de la Medjerda au cours de l'Holocène (Zielhofer et Faust, 2003).	87
Fig. 29. Modelé caractéristique des cônes alluviaux occupant la bordure septentrionale de l'oued Erraghai.	93
Fig. 30. Coupe stratigraphique le long de l'oued Essoufi, 700 m en aval du pont-route reliant Ghardimaou à El-Galaa.	95
Fig. 31. Croquis morphologique dans le secteur de Erraghai-Wirghech.	96
Fig. 32. Coupe à travers l'axe du méandre de l'oued El-Melah au lieu-dit Gueltet El' Allouch à 350 m en amont du pont-route reliant Jendouba-Wirghech.	98
Fig. 33. Coupe stratigraphique dans la boucle du méandre de l'oued Medjerda entre le théâtre romain et le village d'El-Abeidiya.	99
Fig. 34. Coupe stratigraphique à travers le méandre des oueds El-Meleh et El-Khouitra, 60 m en amont de leur confluence avec le drain de la Medjerda.	101
Fig. 35. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued Meliz à environ 800 m au sud du village d'El Mdefa'a.	103
Fig. 36. Matériel céramique recueilli dans l'oued Meliz.	104
Fig. 37. Croquis morphologique du secteur de Chemtou-Edkhailiya.	105
Fig. 38. Croquis morphologique dans le secteur de Testour-Slouguia.	109

Fig. 39. Croquis géomorphologique et paysage fluvial dans le secteur de Mjez El-Beb.	110
Fig. 40. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued El-Hammem, à quelques 300 m en aval du pont Werghich-Ghardimaou.	114
Fig. 41. Coupe dans la berge droite d'oued Medjerda à Douar Guessi près de Ghardimaou.	116
Fig. 42. Matériel céramique récolté, puis identifié et daté par M. Moncef Ben Moussa.	117
Fig. 43. Coupes stratigraphiques perpendiculaires à l'axe d'écoulement des oueds de la Medjerda-El-Meleh et données archéologiques associées.	119
Fig. 44. Reconstitution de l'évolution du paysage fluvial de l'actuelle Chemtou depuis l'Antiquité romaine.	121
Fig. 45. Coupe transversale à vallée de l'oued Tibar, 500 m en amont de la digue du barrage collinaire.	124
Fig. 46. Matériel céramique récolté, puis identifié et daté par M. Moncef Ben Moussa.	125
Fig. 47. Essai de restitution de l'état du paysage fluvial de l'antique <i>Membressa</i> depuis l'Antiquité romaine.	128
Fig. 48. Localisation de quelques éléments du paysage fluvial de <i>Membressa</i> , l'actuelle Mjez El-Beb.	131
Fig. 49. Spatialisation de la mobilité latérale de l'axe fluvial de l'oued Medjerda à l'amont du barrage-réservoir de Sidi-Selem (entre environ 1934-2016) et appréciation de son intensité.	137
Fig. 50. Spatialisation de la mobilité latérale de l'axe fluvial de l'oued Medjerda à l'aval du barrage-réservoir de Sidi-Selem, entre 1922 et 2016, et appréciation de son intensité.	138
Fig. 51. Carte morphodynamique du secteur de Jendouba-El Melga et exemple de défluviation.	140
Fig. 52. Des formes de perturbation sociétales : isolement des groupes sociaux et suspension des activités quotidiennes.	141
Fig. 53. Emprise de l'inondation de 2015 dans l'espace de divagation de l'oued Medjerda à la ville, fortement urbanisée, de Bou-Selem.	143
Fig. 54. Carte hydromorphodynamique de la région de Mjez El-Beb et exemple de défluviation.	145
Fig. 55. Illustrations montrant l'état de l'espace fluvial de l'agglomération de Mjez El-Beb lors des crues.	146
Fig. 56. Schémas et photos montrant les processus de recouplement de méandre dans la moyenne vallée de la Medjerda.	147
Fig. 57. Interfaces du logiciel <i>ArcView-3.2</i> et du programme <i>Reach Data Dialog</i> utilisés pour l'étude morphométrique des méandres.	148
Fig. 58. États successifs du recouplement de méandre de Ga'a El-Mizoued à Jendouba.	150
Fig. 59. Recouplement par tangence du méandre d'oued Tessa à Echwalbiya.	152

Fig. 60. Vision diachronique de d'évolution du recouplement de méandre à la confluence des oueds Medjerda- Kesseb.	154
Fig. 61. Stades d'évolution divers du recouplement du méandre de l'oued Medjerda à l'aval de l'agglomération de Mjez El-Beb.	156
Fig. 62. Image Radar Sentinel 1A acquise le 26-02-2015 montrant des situations de recouplement par débordement de l'oued Medjerda (Sidi-Smail, Mestouta, Slougua).	157
Fig. 63. Illustrations des mécanismes d'érosion ravinatoire.	161
Fig. 64. Illustrations des processus actifs de l'érosion ravinatoire.	162
Fig. 65. Diffractogramme aux Rayons X de l'échantillon 1 levé au droit de la berge gauche de l'oued Medjerda au voisinage du site archéologique de Borj Helal à Hakim nord (x : 468171 ; y : 4036721).	163
Fig. 66. Chenaux fluviaux enserrés étroitement de ripisylve localement touffue et recouvrement végétal des berges limitant l'action d'érosion latérale.	165
Fig. 67. Mesures des rayons de courbure et calculs des indices de maturité dans le secteur d'El Melga-Bou Selem.	167
Fig. 68. Évolution de la géométrie en plan de l'oued Medjerda et Intensité de la dynamique d'érosion fluviale dans le secteur d'Oued Meliz-Chemtou.	169
Fig. 69. Colonisation végétale des anciens chenaux de 1962 et de 1974 (se référer à la fig. 68).	169
Fig. 70. Évolution de la géométrie en plan de l'oued Medjerda et Intensité de la dynamique d'érosion fluviale dans le secteur de Testour-Slougua.	171
Fig. 71. Conquête des anciens lits de la Medjerda par la ripisylve (se reporter aussi à la fig. 70).	171
Fig. 72. Manifestations de la suffosion affectant les berges de la Medjerda à Sidi-Meskine (Jendouba).	173
Fig. 73. L'érosion ravinatoire dans la région d'étude : processus, manifestations, déterminants et impacts environnementaux.	175
Fig. 74. Actions d'extraction et de transport de sable dans différents oueds (les lettres indiquent de l'amont vers l'aval).	177
Fig. 75. Série de photographies commentées révélant les processus d'évolution du paysage fluvial, immédiatement en amont du pont abandonné de la ville de Bou-Selem.	180
Fig. 76. Sélection de photos commentées illustrant les mécanismes de changement du paysage fluvial, immédiatement en amont du pont moderne de la ville de Mjez El-Beb.	181
Fig. 77. Aspects des dépôts accumulés par l'oued Medjerda et leur impact sur les cultures, par suite de la crue d'avril 2009 dans le secteur d'El-Kodia à Bou-Selem (x : 501196 ; y : 4049249).	182
Fig. 78. Vision diachronique (2004-2017) de la progression des atterrissements sur la rive droite de l'oued Mellègue, au droit de son pont « Cinq dinars » à Jendouba (les flèches permettent de reconnaître le lieu).	183

Fig. 79. Photos d'atterrissement de la Medjerda dans les secteurs urbains de Bou-Selem et de Mjez El-Beb.	184
Fig. 80. Localisation des sites des vestiges archéologiques étudiés.	185
Fig. 81. Dégradation des vestiges archéologiques jouxtant l'oued Ejjord à Eddora (Ghardimaou) sous l'effet des crues.	187
Fig. 82. Disparition des ruines de l'oued El-Hammem sous l'action conjuguée de l'Homme et de l'eau.	188
Fig. 83. Des vestiges anciens sur l'oued El-Hammem, livrés au caprice de la nature, sont en voie de disparition.	189
Fig. 84. Des vestiges du pont antique de l'oued El-Meleh à Chemtou soumis à l'action conjuguée de l'eau et de l'Homme.	190
Fig. 85. Le pont-barrage monumental de la ville antique de Chemtou à travers les âges.	192
Fig. 86. État des ruines du pont-barrage romain à Testour.	193
Fig. 87. Le paysage géoarchéologique et ses formes de dégradation dans le secteur de Henchir El-B'harine à Mjez El-Beb.	194
Fig. 88. Les crues dévastatrices survenues dans la moyenne vallée de la Medjerda. Résultats obtenus à partir du dépouillement des archives.	200
Fig. 89. Distribution des crues et tendance au regroupement en séries.	201
Fig. 90. Illustrations de quelques inondations intervenues dans la ville de Jendouba.	202
Fig. 91. Photos montrant la portée des inondations dans la ville de Bou-Selem.	203
Fig. 92. La ville de Mjez El-Beb : le même endroit (repère du pont indiqué par une flèche) montré sur un peu plus d'un siècle (1907-2011).	204
Fig. 93. Exemples de témoignages trouvés dans les archives renseignant sur les inondations enregistrées dans la première moitié du vingtième siècle.	206
Fig. 94. Des illustrations sur les préparatifs et les interventions des secours dans la ville de Bou-Selem.	208
Fig. 95. Images montrant la nature des dommages.	210
Fig. 96. Quelques situations navrantes vécues par la population de Jendouba, de Bou-Selem et de Mjez El-Beb à l'occasion des inondations.	213
Fig. 97. Carte des zones inondées par la crue de mars 1973 dans la ma moyenne Medjerda et photos d'illustration.	233
Fig. 98. Extraction des surfaces en eau par le calcul de l'indice d'eau (MNDWI), lors de la crue de janvier-février 2003 dans la plaine de Jendouba-Bou Selem.	236
Fig. 99. Calculs d'indice d'eau à partir des images Landsat7-ETM+ et Spot5 correspondant à la crue de janvier-février 2003 dans la région de Mjez El-Beb.	238

Fig. 100. Inondations et situations d'isolement vécues par les riverains de la Medjerda à Mjez El- Beb.	239
Fig. 101. Limites et étendues des zones inondées le 23 février 2012 dans l'agglomération urbaine de Bou-Selem. Couplage des données de terrain et de SIG.	243
Fig. 102. Extrait de l'image Spot 5 multibandes (du 24/02/2012). Composition trichrome des canaux XS1, XS2 et XS3. On y voit l'emprise des eaux de la crue un jour après son passage à Bou-Selem, envahissant plus particulièrement le tissu urbain nord récemment développé.	244
Fig. 103. Extrait de l'image Spot 5 panchromatique (24/02/2012) et photo du paysage inondé, la confluence des oueds de Medjerda-Mellègue. On y aperçoit des terres envahies par les eaux fluviales et, par endroits, des exemples d'isolement de groupes sociaux riverains (1, 2, 3, 4 et 5).	245
Fig. 104. Classification dirigée des pixels en eau selon l'algorithme « <i>Random Forest</i> » réalisée sur l'image Envisat-ASAR (27-02-2012) couvrant la plaine de Mjez El-Beb.	247
Fig. 105. Les étendues d'eau extraites de l'image Sentinel-1 A (26-02-2015) par création de masque binaire et photos d'inondation associées.	250

Table des photos

Chapitres 1, 2 et 3

Photo 1 (A sur fig. 3). Vue depuis la berge droite du cours aval de l'oued Meliz en regardant vers le relief dominant de Guern El-Khrarib et de Esra (x : 462077 ; y : 4032724). Elle montre une vaste plaine presque sans pente, mis à part des anciens talus, exploitée en céréales jusqu'aux pieds des versants ravinés où l'on reconnaît un silo à l'arrière- plan.	18
Photo 2 (B sur fig. 3). Une vue de versant à versant à travers la vallée de la Medjerda à Ghardimaou, prise depuis le versant sud de Jbel El'Hafer à Kef Edhba'a à 1,5 km de douar Edkhailiya (x : 455468 ; y : 4041466).	19
Photo 3 (C sur fig. 3). Vue prise depuis des ruines archéologiques sur la rive gauche de l'oued El-Hammem à El'Hfeya 2 (x : 451521 ; y : 4039987) en direction du village de Werghich (El-Guel'a) au nord.	20
Photo 4 (A sur fig. 4). Vue sur la rive droite de l'oued Mellègue depuis le fond de son lit, à 900 m à l'Est de Sidi-Ameur en face de la localité d'Errhaimiya (x : 485575 ; y : 4038054). Au dernier plan, le chaînon montagneux de Bou Rokba-Dawwess, sous forme de deux alignements, domine nettement la large dépression de Ain El Karima-El'itha.	23
Photo 5 (B sur fig. 4). Vue en légère plongée depuis l'ancien pont de la Medjerda à Sidi-Smail, montrant le paysage géographique de la rive droite (x : 509703 ; y : 4050249). Noter l'aspect imposant du relief montagneux en bordure sud de la vallée malgré la modestie des altitudes.	23
Photo 6 (C sur fig. 4). Vue en direction du nord de la ville de Jendouba depuis Sidi Dhwawa (x : 481122 ; y : 4041365), montrant l'aspect montagneux des hauteurs, parallèlement alignées, lié à la raideur des pentes contrastant avec la platitude de la surface alluviale.	24
Photo 7 (D sur fig. 4). Exemple de reliefs en crêtes allongées et à caractère volumineux au Nord-est de l'oued Bou-Hertma.	25
Photo 8 (E sur fig. 4). Exemple de topographie collinaire, aux formes adoucies, dans la région d'Erroumeni, située à 5 km au nord-est de la ville de Bou-Selem.	25
Photo 9 (A sur fig. 5). Vue sur la retenue de Sidi-Selem, immédiatement en aval de sa digue.	27
Photo 10 (B sur fig. 5). Vue sur le barrage de Sidi-Selem et son voisinage depuis la route reliant le village d'Oued Ezzerga à la ville de Jendouba.	28
Photo 11 (A sur fig. 6). Vue sur le méandre hypertrophié de la Medjerda au lieu-dit Eddeghra (x : 550495 ; y : 4050172), dominé par un relief très proche de l'oued et peu élevé mais pentu et fort.	30
Photo 12 (B sur fig. 6). Vue sur le cours aval de l'oued Siliana, l'affluent le plus grand du secteur d'étude, à 4 km avant sa rencontre avec la Medjerda (x : 538843 ; y : 4041358). Noter, d'une part, l'ampleur de la section du cours d'eau qui n'apparaît ici que partiellement et d'autre part, l'imprudence et l'insouciance de l'homme vis-à-vis des risques d'inondation et d'érosion.	31

Photo 13 (C sur fig. 6). Exemple de relief collinaire et montagneux à différentes positions bordant l'oued Medjerda, et terres agricoles, en contrebas, se composant de plantations d'oliviers, d'arbres fruitiers et d'artichauts (vue depuis le versant nord de Kalaat Eddemous au lieu-dit El-Ma'hfoura, x : 568006 ; y : 4069831).

..... 31
 Photo 14 (D sur fig. 6). Vue sur la vaste boucle de méandre façonné par l'oued Medjerda à Testour, passant vraiment au pied du versant sud de Jbel El-Hendi, haut de 273 m (x : 538472 ; y : 4046613).

..... 32
 Photo 15 (E sur fig. 6). Vue depuis le sommet d'Erragouba Ettouila vers le barrage de dérivation de La'roussia établi sur l'oued Medjerda (x : 566555 ; y : 4074318). Au premier plan, un versant sud peu pentu et assez couvert par la végétation mais découpé par des entailles encaissées dans des affleurements triasiques. Au second plan, la topographie relativement régulière de la plaine et mise en valeur agricole du territoire par des groupes humains.

..... 33
 Photo 16. Complexe triasique formé d'argiles bariolées, de dolomies grises et de gypses à stratifications entrecroisées. Vue sur le versant sud de K^{at} Ettouila, à 8 km en amont de la ville de T'borba (x : 567274 ; y : 4074129).

..... 37
 Photo 17. Formation quaternaire montrant une superposition de croûte calcaire dure sur un encroûtement pulvérulent. Vue dans le cours aval de l'oued Mellègue au lieu-dit El-Ghraba, au sud de la ville de Jendouba (x : 478774 ; y : 4028780).

..... 38
 Photo 18. Exemple de dépôt de plaine fait, très souvent, de couches alluviales à dominante fine d'âge holocènes-historiques, et reposant sur des formations argilo-sableuses de couleur rosâtre attribuées au Pléistocène. Vue sur la rive gauche de l'oued El-Meleh, haute de 12 m, à Chemtou à l'Ouest de Jendouba (x : 461356 ; y : 4038327).

..... 39
 Photo 19. Exemple de versant découpé par un système de ravins ramifiés et actifs. Vue sur la rive droite de l'oued Meliz, à environ 1 km en amont du pont du village.

..... 42
 Photo 20. L'un des méandres hypertrophiés de l'oued Medjerda, vu à Eddeghra El-Kbira à Mjez El-Beb (x : 550495 ; y : 4050172).

..... 44
 Photo 21. L'une des sections de l'oued Mellègue, large de 240 m et profonde du côté de la berge droite de 20 m environ, vu à l'*imada* d'El-M'alla au Sud de Jendouba (x : 478718 ; y : 4029164).

..... 45
 Photos 22, 23, 24. Photos illustrant les principales imprudences commises par l'homme dans le cadre de l'urbanisation, conduisant à l'aggravation et même au déclenchement du risque d'inondation.

..... 70
 Photo 25. Constructions et canalisations des eaux pluviales au quartier d'Ezghaddiya, sérieusement atteintes par les eaux de crue de l'oued Medjerda en mai 2009.

..... 71
 Photo 26. La retenue du barrage de Bou-Hertma étant pleine, surverse sur le seuil de surface.

..... 78
 Photos 27 et 28. Deux photos prises, en 1905 et en 2009, immédiatement en aval du pont de Zghaddiya à Jendouba (x : 479097 ; y : 4040204). Elles montrent que le lit moyen de la Medjerda est devenu étroit, suite à son envahissement par la végétation (cliché de gauche : trouvé sur le site internet www.delcampe.net).

..... 79

Chapitre 4.

Photo 1. Cône de déjection et alluvial antique dégagé en terrasse, vue sur la berge droite de l'oued El-Hammem.

..... 93

Photo 2. Cône alluvial récent de l'oued La'achar dans le piémont sud de Jbel El'Hafer.

..... 93

Photo 3. Entaille dans le corps du cône d'El-Azezba au pied de Jbel Mergueb.	93
Photo 4. Cône alluvial distal de l'oued El-Henja. Noter les formes de paléo-creux liées à des chenaux méandriformes.	93
Photo 5. La vallée de l'oued Essoufi : vue depuis le piémont sud de Jbel Grouine.	95
Photo 6. Zoom sur la coupe.	95
Photo 7. Entaille de la coupe.	98
Photo 8. Terrasse historique supérieure et terrasse historique inférieure.	98
Photo 9. Vestiges d'une route ancienne taillées dans le talus supérieur de la terrasse historique inférieure (photo prise en regardant le village d'El-Abeidiya au sud).	99
Photo 10. Zoom sur les vestiges de la route.	99
Photo 11. Vue à travers l'oued permettant de retrouver certains éléments de la coupe.	101
Photo 12. Vue de face de la coupe.	101
Photo 13. Objets archéologiques associés à la terrasse.	101
Photos 14 et 15. Vue de face (gauche) et en travers (droite) de l'oued Meliz.	103
Photo 16. Niveaux de terrasses alluviales (3 et 4 de la fig. 2).	103
Photo 17. Vue sur l'étendue de la nappe alluviale de la terrasse historique supérieure de l'oued Bou-Hertma, à la hauteur de Sidi Mohammed Ben Salah.	106
Photo 18. Le dispositif de terrasses historiques de l'oued Kesseb à quelque 2,5 km en amont de sa confluence avec l'artère principale de la Medjerda.	106
Photo 19. Le paysage fluvial de la vallée de Tessa au lieu-dit Eryebna.	107
Photos 20, 21 et 22. Les modelés fluviaux dans la région de Testour.	108
Photo 23. Sidi Ali-Ben Selem.	109
Photo 24. Le lit de la Medjerda à la traversée de la ville de Mjez El-Beb.	110

Chapitre 5

Photo 1. Berge droite de l'oued El-Hammem.	114
Photo 2. Zoom sur la structure archéologique.	114
Photo 3. Des pans de murs entiers tombés en gravats dans le chenal.	114
Photo 4. Vue permettant de retrouver quelques éléments de la coupe.	116
Photo 5. Vue de face montrant des ruines taillées en talus de berge.	116

Photo 6. Partie d'un mur ancien visible dans la moitié supérieure de la coupe.	116
Photo 7. Berge gauche de l'affluent d'El-Meleh.	119
Photo 8. Berge gauche de l'oued Medjerda.	119
Photo 9. Lit de l'oued Tibar, en regardant vers l'amont.	124
Photo 10. Structure archéologique antique.	124
Photo 11. Des restes de la porte monumentale, situés au droit de l'école primaire d'Errhiba.	131

Chapitre 6

Photo 1. Ouled Manna'a à Hakim nord, Jendouba.	137
Photo 2. À 4 km à l'aval de Sidi-Meskine.	137
Photo 3. Au niveau du pont-route de Bou-Salem.	137
Photo 4. Vue sur la Medjerda depuis le versant est de Jbel Aroussia.	138
Photo 5. Lit de la Medjerda au droit du pont-route de la ville de Mjez El-Beb.	138
Photo 6. Espace de divagation externe de la Medjerda, vue depuis l'ancien talus en regardant vers le talweg actuel à Sidi Aguil.	138
Photo 7. L'oued Medjerda, de 11 m de profondeur, à son comble au droit du pont-route de Jendouba.	141
Photo 8. Le pont d'El-Gantra El-Ka'hla à Zghaddiya hors service lors des crues.	141
Photo 9. Route barrée au niveau de l'oued Bajer.	141
Photo 10. La route GP6 coupée à El Melga-El M'arif.	141
Photo 11. Le lit de l'ancien cours de la Medjerda, au quartier Ennozha, exploité comme station de transport collectif rural.	143
Photo 12. Le paléolit de la Medjerda au quartier Diamonta, réactivé à l'occasion de l'inondation de 2015.	143
Photo 13. Traces d'eau, de boue, et présence de secours dans le quartier de Ben Hssine, le lendemain de l'inondation de 2011.	146
Photo 14. Le lit actuel de la Medjerda, localisé à 1 km à l'aval de Mjez El-Beb, coulant presque au ras du sol.	146
Photo 15. L'espace de mobilité de la Medjerda submergé par de l'eau. Vue depuis la route menant au village de Grich El-Wed.	146
Photo 16. Traces du chenal de crue passant au-dessus de la rive convexe.	147
Photo 17. Bras mort en eau du méandre abandonné de la Medjerda à Ga'a El-Mizoued.	150

Photo 18. Vue prise au droit de la boucle du méandre abandonné de l'oued Tessa. Noter aussi les déchets ménagers masquant le talus.	152
Photo 19. Vue prise en regardant du nord vers le sud de la boucle de méandre abandonné de l'oued Medjerda.	154
Photo 20. Vue prise à la hauteur du lieu de recouplement et du méandre de la Medjerda à Mjez La'hjar.	156

Chapitre 7

Photo 1. Situation de la première rangée du champ d'oliviers jouxtant la rive droite de l'oued Essoufi à El-Mrassen, devenue presque collée au sommet de la berge.	161
Photo 2. Déchaussement des plantations riveraines sous l'effet du retrait de la berge droite du cours aval d'El-Hammem à Werghich.	161
Photo 3. Ruines antiques défoncées par les eaux de l'oued Bou-Sbi'a, affluent du cours aval de l'oued Meliz.	161
Photo 4. Trois gabions en grillages et pierres sèches hors de service suite à l'élargissement du lit de l'oued Siliana, localisé à 600 m en amont de sa confluence avec l'oued Medjerda.	161
Photo 5. Portion de la paroi sur le point de s'effondrer et chaos de matériaux d'anciennes chutes. Vue sur la Medjerda à douar Ouled Ammar, à 3,5 km en aval de Ghardimaou.	162
Photo 6. Paquet terreux affecté par une fente béante sur la berge droite de l'oued El-Meleh, 500 m environ de sa confluence avec l'oued El-Khouitra à Chemtou.	162
Photo 7. Fragment de terre en voie de détachement, et fente de retrait en cours de formation. Vue sur la berge droite de la Medjerda à 2 km en aval de Sidi-Meskine.	162
Photo 8. Fentes longitudinales pratiquées au bord du lit de la Medjerda à Ejjrif, 8 km en amont de la ville de Jendouba.	162
Photo 9. Rupture d'une masse terreuse le long de la berge droite de l'oued Mellègue à El-Melga, 7 km en aval de Jendouba.	162
Photo 10. Fentes de cisaillement visibles sur la berge droite de l'oued Medjerda, 1,7 km en amont de la ville de Testour.	162
Photo 11. Méandre concave de l'oued Medjerda au lieu-dit d'El-Khadhra à Jendouba.	165
Photo 12. Cours aval de l'oued Tessa au niveau du pont-route GP5.	165
Photo 13. Oued Medjerda vu à Sidi Bou-Hawel, 4 km en amont de Sidi-Smail.	165
Photo 14. Cours aval de l'oued Siliana, 3 km avant sa confluence avec la Medjerda.	165
Photo 15. Systèmes de trous de suffosion dont certains ont déjà donné naissance à des cicatrices d'arrachement de pans et au ravinement.	173
Photo 16. Formes d'érosion marquant la berge droite de la Medjerda 5 km à l'aval de Sidi-Meskine, et travaux de lutte anti-érosive par plantation de cactus épineux.	173

Photo 17. Trou de suffosion perçant le sommet de la berge droite de la Medjerda, 8 km à l'aval de Sidi-Meskine, et favorisant le recul d'une tête d'une ravine.	173
Photo 18. Terres fortement affectées par un ravinement profond et dense rappelant les badlands. Vue sur la rive gauche de l'oued Medjerda à Swaidiya, 7 km à l'est de Chemtou.	174
Photo 19. Partie centrale du talus transformé en sentier marqué par le passage répété du bétail. Noter aussi le système de ravinement évoluant par recul de tête, ainsi que l'étalement des cultures jusqu'au sommet de la berge. Vue de l'oued Medjerda à Sidi Ali-Ben Selem en regardant, au sud, vers la ville de Testour.	174
Photo 20. Motopompe implantée sur une base rectangulaire au pied du talus et menue de tuyaux en caoutchouc pour l'irrigation. Berge gauche de l'oued El-Meleh à Chemtou.	175
Photo 21. Paysage de ravinement généralisé dans un champs d'oliviers, situé sur la rive droite de l'oued Medjerda à Chemtou.	175
Photo 22. Série d'entailles métriques échançant le front de la berge droite de l'oued Meliz, 700 m au sud de douar El-Mdefe'a.	175
Photo 23. Formation de ravins par recul de tête à partir de la berge gauche de l'oued Bou-Hertma, à la suite du débordement de la crue d'avril 2009.	175
Photo 24. Mobilité verticale du lit de l'oued Meliz et développement des profils en gradins.	176
Photo 25. L'oued Medjerda à Chemtou.	177
Photo 26. L'oued Meliz à 2,5 km à l'amont du pont de même nom.	177
Photo 27. L'oued Mellègue à Err'haimiya.	177
Photo 28. L'oued Tessa à Ettrakhna.	177
Photo 29. Vue de l'oued Tessa depuis le marabout de Sidi Abid.	177
Photo 30. Lit de l'oued Tessa à 200 m de la photo 25.	177
Photo 31. Près de la confluence de l'oued Medjerda avec l'oued Siliana.	177
Photo 32. Carte postale, datée du 08-04-1911, donnant une vue orientée Nord-Sud du lit de l'oued Medjerda au droit de son pont abandonné à Souk-El-Khemis l'actuelle Bou-Selem.	180
Photo 33. Photo du même lieu prise après deux mois de la crue de janvier 2004. Mise en place d'une importante accumulation de charge de fond, et rétrécissement du chenal d'écoulement des eaux.	180
Photo 34. Photo prise au moment de la crue du 05 mai 2009. Noter la bifurcation et la création d'un nouveau chenal au pied de la berge droite, également la formation d'un banc médian.	180
Photo 35. Situation en 2011 : réincision du chenal récent et dégagement du talus du banc médian parsemés de végétation.	180

Photos 36 et 37. Le même endroit revu en 2017, en regardant vers le sud (photo de gauche) et vers le nord (photo de droite). Nouvelle configuration du profil fluvial : concentration des eaux d'écoulement dans un chenal unique passant au milieu du lit, formation de gradins d'accumulation à couverture végétale de part et d'autre du talweg (37), et disparition du banc médian (36) déjà vu en 2009 et en 2011.

.....	180
Photo 38. Vue de l'amont en direction du Nord, sur le lit large de l'oued Medjerda à Mjez El-Beb (1910 environ) et état des arches de son pont moderne.	
.....	181
Photo 39. Photo illustrant le même endroit vu en 1924. Situation presque pareille à la précédente hormis le surcreusement du chenal d'écoulement attesté par l'exhumation des avant-becs des piles.	
.....	181
Photo 40. Situation après la grande crue de 1973 (l'hôtel de Membressa, indiqué par une flèche noire, servira de repère pour reconnaître le lieu sur cette photo et les trois suivantes). Noter le comblement du lit fluvial par des dépôts de fin de crues.	
.....	181
Photo 41. Photo prise en 2000 révélant un changement sensible du profil en travers de l'oued : rétrécissement du chenal d'écoulement, formation de bourrelets de berge gauche provoquant un relèvement du fond, et présence d'une végétation rivulaire.	
.....	181
Photo 42. Photo datée de 2003 montrant en particulier un développement notable de la végétation de part et d'autre du lit mineur.	
.....	181
Photo 43. Photo prise en 2017 indiquant un envahissement de la bande active par une végétation dominée par un peuplement de <i>Tamarix africana</i> , au point de masquer certaines arches du pont.	
.....	181
Photo 44. Dépôt d'alluvions de 20 cm d'épaisseur et de 16 ha de superficie, formé lors de la crue d'avril 2009. Vue sur la rive droite de l'oued Medjerda, 600 m en aval de son ancienne confluence avec l'oued Kesseb.	
.....	182
Photo 45. Atterrissement sur une surface cultivée en blé déjà dur, et dégradation des récoltes (photo prise à proximité du lieu précédent).	
.....	182
Photo 46. État en 2004.	
.....	183
Photo 47. État en 2009.	
.....	183
Photo 48. État en 2013.	
.....	183
Photo 49. État en 2017.	
.....	183
Photo 50. La cour d'une maison à Bou-Selem comblé de matériaux terreux, provenant de l'oued Medjerda lors de sa crue en janvier 2004.	
.....	184
Photo 51. L'avenue du Grand Maghreb à Mjez El-Beb jonché de boues et d'immondices, à la suite de la crue de l'oued Medjerda en novembre 2011.	
.....	184
Photo 52. Un abondant matériel antique repéré au pied de la berge gauche de l'oued Ejjordf.	
.....	187
Photo 52.a. Parmi les ruines, on reconnaît : un <i>meta</i> (1), un élément se seuil (2), un contrepoids (3), un tronçon de fût brisé (4).	
.....	187
Photo 53. Photo prise en 2006 en face de la berge gauche de l'oued El-Hammem, montrant les fondements d'une ancienne construction exhumée par l'action érosive des eaux de crue.	
.....	188

Photo 54. Trois ans après (2009), la partie supérieure de la même construction est enlevée, probablement par un bulldozer dont la trace, en creux, de la pelle est désormais devenue un point de déversement d'ordures ménagères.	188
Photo 55. Deux ans après (2011), au même site, on était témoin de la disparition totale des ruines, par suite des travaux de nivellement du fond de l'oued par un bulldozer afin de mettre en place un ouvrage en gabion pour protéger la route passant à côté.	188
Photo 56. Photo prise par Mjeiri en 2006 sur l'oued El-Hammem, révélant des "pans de murs antiques basculés" dans le chenal d'écoulement.	189
Photo 57. Le même endroit revu par nous-même en 2009. Il s'agit d'un mur antique en place, de 3,70 m de hauteur, formé de moellons non équarris liés par un mortier beige. Par comparaison avec la photo de 2009, il ne subsiste plus qu'un seul fragment (1) du mur par les trois fragments (1, 2, 3) vus auparavant.	189
Photo 58. En 2011, trois nouveaux morceaux (4, 5, 6) arrachés du même mur s'ajoutent au fond du lit. Le mur lui-même, étant fortement tronqué par les eaux, ne tardera pas longtemps à disparaître.	189
Photo 59. Ruines du pont, jeté sur l'oued El-Meleh, défoncées par les eaux de stagnation et d'écoulement.	190
Photo 60. Morceau du monument touché par les actes de pillage, comme le laissent deviner les trous creusés et les déchets de sachets brûlés par des chercheurs de trésors.	190
Photo 61. État du pont de Trajan à l'époque actuelle.	192
Photo 62. Les vestiges du pont et du moulin hydraulique antiques de <i>Tichilla</i> (Testour), localisés au pied de la berge droite de l'oued Medjerda.	193
Photo 63. Le reste de la culée du pont jonché d'ordures ménagères.	193
Photo 64. Construction moderne inachevée au sein du site.	194
Photo 65. Structures anciennes envahies par les alluvions et les cactus.	194
Photo 66. Amas de pierres de construction recouvrant le sol.	194
Photo 67. Bassin de stockage des margines d'olives près du site antique.	194

Chapitre 8

Photo 1. La catastrophe de 1973 : envahissement des eaux de l'oued Medjerda des trottoirs et des voies urbaines.	202
Photo 2. L'événement de 2009 : des maisons au quartier Timiriya encerclées par les eaux ; les propriétaires étant forcés de se réfugier sur les toits.	202
Photo 3. La crue de 2012 : un atelier de marbre au quartier d'El-Hwailiya presque entièrement submergé.	202
Photo 4. La catastrophe de 2003 : le quartier de Diamonta noyé sous une épaisse couche d'eau et de boue.	203
Photo 5. L'événement de 2009 : le lit de la Medjerda à pleins bords.	203

Photo 6. La crue de 2012 : vue d'en face du quartier d'El-Khlij cerné par les eaux.	203
Photo 7. L'inondation de 2015 : submersion du quartier de Fattouma Bourguiba.	203
Photo 8. La grande crue de 1907 : le pont "Andalou" submergé. Au premier plan, des spectateurs massés le long de la rive droite de l'oued Medjerda.	204
Photo 9. L'inondation de 1940 : vue d'avion montrant l'ampleur des espaces inondés.	204
Photo 10. La crise de 1969 : des eaux coulant à pleins bords touchant la partie supérieure du pont.	204
Photo 11. La catastrophe de 1973 : une prise de vue selon un angle pareil à celui de 1907. Au second plan, des opérations de sauvetage par hélicoptère.	204
Photo 12. L'événement majeur de 2003 : en contrebas du pont, le premier étage du café de <i>Membressa</i> étant sous l'eau.	204
Photo 13. La crue de 2011 : des débordements gênants privant des écoliers de se rendre en classe et des ouvriers d'aller au travail.	204
Photo 14. Une foule de riverains suivaient les progrès de la crue au droit du pont-route GP6. À un certain niveau critique repéré par eux-mêmes sur les piliers, ils savaient d'avance que le débordement aurait lieu.	208
Photo 15. Constructions de murets devant les boutiques pour parer à l'intrusion des eaux débordantes.	208
Photo 16. Des véhicules de la protection civile devant la municipalité de la ville portant, entre autres, des canots de sauvetage.	208
Photo 17. Des opérations d'évacuation au quartier Khaireddine conduites par des unités de l'Armée nationale.	208
Photo 18. Le pont romain de Chemtou ruiné sous l'effet des crues répétées de l'oued Medjerda.	210
Photo 19. Environ 16 ha de céréales perdues par asphyxie dans le petit village d'El-Melga à Jendouba.	210
Photo 20. Une maison au quartier Fattouma Bourguiba (Bou-Selem) qui baigne dans l'eau. Sur le toit, quelques biens mobiliers sauvés à temps !	210
Photo 21. Des édifices à Mjez El-Beb envahis par les eaux boueuses.	210
Photo 22. Des maisons à Timiriya (Jendouba) entièrement encerclées par les eaux.	213
Photo 23. Une habitante à Zghaddiya (Jendouba), indiquant les traces de quelques inondations survenues.	213
Photo 24. Des citoyens du quartier Mastour (Bou-Selem) annonçant la sortie des eaux fluviales dont la trace est visible.	213
Photo 25. Des citoyens du quartier d'El-Hwailiya (Jendouba) chassés de chez eux.	213
Photo 26. Mjez El-Beb en 1969.	213
Photo 27. Mjez El-Beb en 1973.	213
Photo 28. Mjez El-Beb en 2003.	213

Photo 29. Mjez El-Beb en 2011.	213
--------------------------------	-----

Chapitre 9

Photos 1 et 2. Vue par avion (en haut) de la Medjerda en crue, et vue au sol d'un camion militaire paralysé par les eaux d'inondation.	233
Photo 3. Mjez El-Beb : "Un hélicoptère récupérant un homme (suspendu au filin) au cours d'une tentative de sauvetage d'une personne bloquée à l'intérieur d'une maison".	233
Photos 4 et 5. L'ancien pont de Slouguia sur l'oued Medjerda (ci-dessus) fut littéralement emporté par les flots d'eau. Il n'en subsista qu'un fragment du pilier latéral, témoin de sa position ancienne.	233
Photo 6. Le centre-ville de Mjez El-Beb, fortement atteint par la crue.	239
Photo 7. Un paysage de "mer" au niveau de la confluence des oueds Medjerda-La'hmar près du village de Grich El-Wed.	239
Photo 8. Au premier plan, la Medjerda à pleins bords et débordement des eaux s'étendant à perte de vue en direction du centre-ville. Au second plan, des riverains se rassemblent sur le parapet du pont-route pour observer la montée des eaux. Noter en arrière-plan un hélicoptère venant au secours des sinistrés.	243
Photo 9. Le quartier d'Errab'ani : 1. Entrée d'une maison partiellement murée pour parer à la remontée des eaux submergeant le rez-de-chaussée ; 2. Le propriétaire se voit monter sur un escabeau en bois pour passer au premier étage et rejoindre sa famille (3) déjà réfugiée avec quelques biens sur les toits.	244
Photo 10. Vue sur l'oued Mellègue depuis le Pont "Cinq Dinars".	245
Photo 11. Centre-ville.	247
Photo 12. L'intérieur d'une maison.	247
Photo 13. Débordement de l'oued Medjerda (on reconnaît au fond l'usine de transformation de tomates).	247
Photo 14. Photo prise à l'extrémité du quartier d'Ettatawir à Jendouba.	250
Photo 15. Photo prise en face du quartier de Diamonta à Bou-Selem.	251

Table des tableaux

Tab. 1. Les intensités journalières de pluie pour la période 1928-1958.	48
Tab. 2. Les intensités journalières de pluie pour la période 1980-2009.	48
Tab. 3. Pluviosité par saison entre 1980 et 2009.	50
Tab. 4. Volumes précipités pour la période 1980-2009.	51
Tab. 5. Distribution des jours pluvieux et des volumes précipités pour la période 1980-2009.	53
Tab. 6. Proportion des années à tendance humide et sèche.	58
Tab. 7. Tests statistiques et années de rupture dans les séries pluviométriques étudiées.	62
Tab. 8. Calculs des paramètres morphométriques du méandre de la Medjerda à Hinchir Eschât à Jendouba.	149
Tab. 9. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Tessa à Jendouba-Bou Selem.	151
Tab. 10. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Medjerda à Bou-Selem.	153
Tab. 11. Résultats de calculs des variables morphométriques du méandre de l'oued Medjerda à Mjez La'hjar.	155
Tab. 12. Données chiffrées sur la couverture végétale rivulaire de la Medjerda, entre Ghardimaou et barrage Laroussia (obtenues grâce à l'exploitation des photos satellites à haute résolution de Google Earth datant de 2016 environ).	164
Tab. 13. Mesures des rayons de courbure dans le secteur d'El Melga-Bou Selem.	167
Tab. 14. Liste des grandes crues enregistrées, écarts inter-crue et tendance au regroupement en séries.	200
Tab. 15. Périodisation des crues.	200
Tab. 16-29. Répertoire détaillé de toutes les grandes crues et dégâts enregistrés dans la moyenne vallée de la Medjerda depuis l'Antiquité romaine.	215-228
Tab. 30. Principales Caractéristiques des produits satellitaires utilisés.	231

Table des matières

Sommaire	7
Introduction générale	8
Première partie. Le système fluvial de la Medjerda : un milieu favorable au risque d'inondation	12
Introduction	13
Chapitre I. L'eau, la roche, le relief	14
I.1. Des plaines plates et étendues encadrées par des alignements montagneux assez hauts et exigus à versants souvent pentus	15
I.1.1. Le secteur compris entre Ghardimaou et Sidi-Meskine (S1)	16
I.1.1.1. La rive droite	17
I.1.1.2. La rive gauche	18
I.1.2. Le secteur compris entre Jendouba et Mestouta à l'amont du barrage-réservoir de Sidi-Selem (S2)	20
I.1.2.1. La rive droite	21
I.1.2.2. La rive gauche	24
I.1.3. Le secteur de part et d'autre de la retenue de Sidi Selem (S3)	25
I.1.3.1. La rive droite	26
I.1.3.2. La rive gauche	27
I.1.4. Le secteur compris entre la ville de Testour et la ville de T'borba (S4)	28
I.1.4.1. La rive droite	30
I.1.4.2. La rive gauche	31

Conclusions	33
I.2. Des formations géologiques jeunes et tendres	34
I.2.1. Une extension réduite des affleurements résistants	34
I.2.2. Une étendue notable des affleurements mixtes	36
I.2.3. Une extension considérable des formations tendres	37
Conclusions	39
I.3. Un réseau fluvial dense, hiérarchisé, et puissant	42
I.3.1. Dans les reliefs locaux, un chevelu hydrographique développé et convergent	42
I.3.2. Dans les plaines, un système de vallée larges et confluentes	44
Conclusions	45
I.4. Des pluies ordinaires mais persistantes et capricieuses : les enseignements de plus de cent ans de recul	46
I.4.1. Données, méthodes et outils	46
I.4.1.1. Les archives pluviométriques	46
I.4.1.2. Les moyens statistiques et géostatistiques	47
I.4.1.3. Les programmes de traitements de données et de SIG	48
I.4.2. Les caractères de pluie	49
I.4.2.1. La variabilité des pluies annuelles et saisonnières	49
I.4.2.1.1. Les moyennes pluviométriques annuelles	50
I.4.2.1.2. Les moyennes pluviométriques saisonnières	52
Conclusions	52
I.4.2.2. Variabilité de la saison pluvieuse et tendances d'évolution des intensités journalières	52
I.4.2.2.1. La variabilité de la saison pluvieuse	52
I.4.2.2.2. Les intensités journalières de pluies : répartition et tendances d'évolution	54
I.A. Répartition des intensités	56
I.A.1. Les intensités de pluies inférieures à 10 mm	56
I.A.2. Les intensités de pluies comprises entre 10 et 30 mm	56

I.A.3. Les intensités de pluies supérieures à 30 mm	57
Conclusions	57
I.4.3. Essai de restitution des épisodes pluvieux et non pluvieux et leur corrélation avec l'aléa inondation	57
I.4.3.1. Une alternance de séquences humides et sèches	57
I.4.3.1.1. Indice standardisé de précipitations	58
I.4.3.1.2. Indice de l'écart à la moyenne	60
I.4.3.1.3. Indice de pluviosité	60
I.4.3.2. De nombreuses années de rupture	61
I.4.3.2.1. Les tests statistiques de détection de ruptures	61
I.4.3.3. Essai de reconstitution	62
Conclusions	65
I.4.3.4. L'aléa pluvieux et l'aléa inondation : essai de corrélation	65
Conclusions	66
Conclusion du chapitre I	67
Chapitre II. Le bâti, le barrage	68
II.1. Une occupation humaine dense et continue sur des terres inondables	69
II.1.1. Cas de l'agglomération urbaine de Jendouba	71
II.1.2. Cas de l'agglomération urbaine de Mjez El-Beb	74
II.2. La politique des barrages et les risques associés	76
Conclusion du chapitre II	79
Deuxième partie. Le risque fluvial dans les fonds de vallée de la Medjerda, un phénomène ancien : approche géoarchéologique	81
Introduction	82
Chapitre III. L'histoire de la mise en place des plaines alluviales à partir des travaux antérieurs	82

III.1. Les études morphostratigraphiques	82
.....	
III.1.1. Le Pléistocène terminal	83
.....	
III.1.2. L'Holocène antéhistorique	84
.....	
III.1.3. L'Holocène historique	85
.....	
III.1.3.1. L'époque punico-romaine	85
.....	
III.1.3.2. La période fini et post-romaine	85
.....	
Conclusions	87
.....	
III.2. Les études géomorphologiques	88
.....	
Conclusions	89
.....	
III.3. Synthèse et essai d'intercorrélation des recherches produites en Tunisie sur la dynamique fluviale	89
.....	
Conclusion du chapitre III	90
.....	
Chapitre IV. Évolution géomorphologique des paysages fluviaux au cours des temps historiques	91
.....	
IV.1. Tronçon I (vallée supérieure)	92
.....	
IV.1.1. Caractéristiques (secteur compris entre Bled Zitoun et Edkhailiya)	92
.....	
IV.1.2. Coupe stratigraphique dans le cours moyen de l'oued Essoufi au pied de Jbel Grouine	94
.....	
IV.1.3. Croquis géomorphologique dans le secteur de Erraghai-Wirghech	96
.....	
IV.1.4. Coupe stratigraphique dans le méandre de l'oued El-Melah au lieu-dit Gueltet El 'Allouch	97
.....	
IV.1.5. Coupe stratigraphique au niveau du site archéologique de Chemtou	98
.....	
IV.1.6. Coupe stratigraphique au niveau de la confluence des oueds El Melah-El Khouitra	100
.....	
IV.1.7. Coupe stratigraphique à travers le méandre de l'oued Meliz à environ 800 m au sud du village d'El Mdefa'a	102
.....	
IV.1.8. Croquis géomorphologique du secteur de Chemtou-Edkhailiya	105
.....	
IV.2. Tronçon II (vallée médiane)	106
.....	

IV.2.1. Dispositifs alluviaux dans la région nord de Bou-Selem	106
IV.2.1.1. Vallée de l'oued Bou-Hertma	106
IV.2.1.2. Vallée de l'oued Kesseb	106
IV.2.3. Dispositifs alluviaux dans la vallée de l'oued Tessa	107
IV.3. Tronçon III (vallée inférieure)	107
IV.3.1. Secteur de Testour-Slougua	107
IV.3.2. Secteur de Mjez El-Beb et ses environs	110
Conclusion du chapitre IV	111
Chapitre V. La géoarchéologie fluviale, comme outil de caractérisation de la dynamique fluviale historique et des interactions milieux-sociétés	112
V.1. Le cours moyen de l'oued El-Hammem à Werghich	113
V.2. Le secteur compris entre la ville de Ghardimaou et le marabout de Sidi Embarek	115
V.3. Le site archéologique de Chemtou	117
V.4 Le tronçon moyen de l'oued Tibar	123
V.5. La cité de Membressa, l'actuelle Mjez El-Beb	125
Conclusion du chapitre V	131
Troisième partie. Morphodynamique actuelle et risque fluvial : approche géomatique et de terrain	133
Introduction	134
Chapitre VI. Des modifications parfois importantes dans le dessin des tracés fluviaux	135
VI.1. Changements de tracé des cours d'eau	135
VI.1.1. Divagations	135
VI.1.2. Défluviations (avulsions)	138
VI.1.2.1. La défluviations de Mellègue à Jendouba-El Melga	139

VI.1.2.2. La défluviation de la Medjerda à Bou-Selem	141
VI.1.2.3. La défluviation de la Medjerda à Mjez El-Beb	144
VI.2. Recoupements de méandre	146
VI.2.1. Recoupements par chenal de chute	148
VI.2.1.1. Le recouplement du méandre de l'oued Medjerda à Hinchir Eschât ou Ga'a El-Mizoued (Jendouba)	148
VI.2.1.2. Le recouplement du méandre de l'oued Tessa à El-Merja	150
VI.2.1.3. Le recouplement du méandre de l'oued Medjerda à Sidi-Ali Jbini	152
VI.2.1.4. Le recouplement du méandre de l'oued Medjerda à Mjez La'hjar	154
VI.2.2. Recoupements par débordement ou submersion	157
Conclusion du chapitre VI	157
Chapitre VII. Dynamique érosive et sédimentaire actuelle et vulnérabilité des vestiges archéologiques face aux aléas naturels et humains	159
VII.1. Processus et manifestations de l'érosion hydrique	159
VII.1.1. Prédominance des formes d'érosion liées à l'attaque latérale	160
VII.1.1.1. Le sapement latéral des berges : analyse synchronique	160
VII.1.1.2. Le recul des berges : étude comparative et diachronique	166
VII.1.2. Des formes d'érosion linéaire et une tendance générale à l'enfoncement des talwegs	172
VII.1.2.1. Suffosion et dynamique des berges	172
VII.1.2.2. Dégradation par ravinement	173
VII.1.2.3. Incision des talwegs	176
VII.2. Les remblaiements alluviaux récents des fonds de vallée et leur impact sur les paysages fluviaux	178
VII.2.1. Dynamique de remblaiement interne au lit fluvial et évolution paysagère	178
VII.2.2. Ampleur des atterrissements dans la plaine d'inondation	182
Conclusions	184
VII.3. Des ruines archéologiques en danger	185

VII.3.1. Les ruines archéologiques dans l'oued Ejzorj à Ghardimaou	185
VII.3.2. Les ruines de l'oued El-Hammem à l'antique Thuburnica (Sidi-Ali Belgacem)	187
VII.3.3. L'ancien pont de l'oued El-Meleh à Simitthus	189
VII.3.4. Le pont-barrage romain de l'antique Simitthus	191
VII.3.5. Le pont-barrage de l'antique Tichilla	192
VII.3.6. Le site archéologique de l'ancienne Abitina	193
Conclusions	195
Conclusion du chapitre VII	195

Quatrième partie. Le risque d'inondation dans le bassin moyen de la Medjerda aujourd'hui : un phénomène nettement plus fréquent et menaçant que par le passé

..... 197

Introduction

..... 198

Chapitre VIII. Témoignages des archives sur les inondations

..... 198

VIII.1. De fréquents et dangereux débordements

..... 199

VIII.2. Des pertes en vies humaines sévères et méconnues

..... 207

VIII.3. Des dégâts matériels lourds

..... 209

VIII.4. Des effets pernicioeux tangibles

..... 211

Conclusion du chapitre VIII

..... 214

Chapitre IX. Couplage des données de terrain, SIG et télédétection pour l'analyse et la cartographie des inondations récentes majeures

..... 229

IX.1. Données et méthodes

..... 230

IX.1.1. La recherche sur le terrain

..... 230

IX.1.2. La télédétection spatiale optique et radar

..... 230

IX.2. L'inondation catastrophique de mars 1973

..... 231

IX.3. Les grandes inondations de janvier 2003

..... 234

IX.4. Les inondations majeures de février 2012

..... 239

IX.5. Les inondations de février 2015	247
.....	
Conclusion du chapitre IX	251
.....	
Conclusion générale	253
.....	
Bibliographie	257
.....	
Table des figures	270
.....	
Table des photos	276
.....	
Table des tableaux	286
.....	
Table des matières	287
.....	