



HAL
open science

Application des méthodes géoarchéologiques à la reconstitution des dynamiques environnementales et de leurs interactions avec les sociétés durant l'Antiquité: cas de la plaine de Gharb et du territoire de Volubilis (Maroc)

Stéphane Desruelles, Cyril Castanet, Aomar Akerraz, M'Hamed Alilou, Rachid Arharbi, Véronique Brouquier-Reddé, Jean-philippe Degeai, Agnès Gauthier, Hélène Geroyannis, Éliane Lenoir, et al.

► To cite this version:

Stéphane Desruelles, Cyril Castanet, Aomar Akerraz, M'Hamed Alilou, Rachid Arharbi, et al.. Application des méthodes géoarchéologiques à la reconstitution des dynamiques environnementales et de leurs interactions avec les sociétés durant l'Antiquité: cas de la plaine de Gharb et du territoire de Volubilis (Maroc). Véronique Brouquier-Reddé, Frédéric Hurlet éd. L'eau dans les villes du Maghreb et leur territoire à l'époque romaine, Mémoires (54), Ausonius Editions, pp.103-118, 2018, 9782356132307. halshs-02068624

HAL Id: halshs-02068624

<https://shs.hal.science/halshs-02068624>

Submitted on 20 Mar 2023

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.

Application des méthodes géoarchéologiques à la reconstitution des dynamiques environnementales et de leurs interactions avec les sociétés durant l'Antiquité : cas de la plaine du Gharb et du territoire de *Volubilis* (Maroc)

*Stéphane Desruelles, Cyril Castanet, Aomar Akerraz, M'hamed Alilou, Rachid Arharbi,
Véronique Brouquier-Reddé, Jean-Philippe Degeai, Agnès Gauthier, Hélène Geroyannis,
Éliane Lenoir, Françoise Pirot, Rachid Ragala, Vincent Robert**

Le principal objectif du programme *EauMaghreb*¹ était de comprendre la gestion de l'eau dans des espaces urbains et ruraux au Maroc, en Tunisie et en Algérie, durant l'Antiquité. Au nord-ouest du Maroc, une étude géoarchéologique a été menée de 2008 à 2012 dans le bassin-versant de l'oued Sebou, en particulier sur le territoire de *Volubilis* et dans la plaine du Gharb. Dans ces deux zones, de nombreux indices et vestiges témoignent d'une prise en considération des dynamiques hydrologiques et environnementales par les sociétés. Ces éléments anthropiques, postérieurs au VI^e siècle a.C., sont l'objet de recherches de prospection et de fouilles depuis le début du XX^e siècle. En plus de cette richesse de la documentation archéologique et historique, ces deux secteurs se caractérisent par des dynamiques, des contraintes et des potentialités environnementales différentes : à *Volubilis* et dans sa région, il s'agit surtout de restituer l'approvisionnement et la gestion de l'eau, alors que les sites du Gharb sont davantage concernés par les risques d'origine fluviale (inondation, mobilité des lits fluviaux, ...). Compte tenu de ces problématiques, les travaux accomplis s'articulaient autour des thèmes suivants :

- reconstitution des réseaux hydrographiques et des paysages façonnés par les dynamiques hydrologiques, dans l'objectif notamment d'aider à la restitution et à la compréhension de la distribution des sites et des voies de communication dans l'Antiquité ;
- influence des dynamiques hydrosédimentaires sur l'évolution de l'environnement des établissements antiques. Ces paramètres ont probablement eu des conséquences sur l'occupation humaine et l'aménagement des secteurs d'étude pendant l'Antiquité. Après leur abandon, les dynamiques hydrosédimentaires ont dû provoquer l'érosion et/ou la fossilisation de certains d'entre eux ;
- alimentation en eau des habitats pour établir la relation entre les ressources naturelles et les aménagements hydrauliques.

Une approche et des méthodes géoarchéologiques ont été développées sur ces deux zones, associant des géographes, des historiens et des archéologues. La recherche a été réalisée en étroite collaboration avec l'INSAP² et les conservations des sites de *Banasa* et de *Volubilis*, en partenariat avec les plates-formes techniques (sédimentologie, chimie, géodésie) du Laboratoire

1. Projet financé par l'Agence nationale française de la recherche (ANR-07-BLAN-10372) et coordonné par F. Baratte (université Paris-Sorbonne) en liaison avec les responsables scientifiques V. Brouquier-Reddé (CNRS - ENS - PSL), S. Desruelles (université Paris-Sorbonne) et F. Hurllet (université de Nantes, puis Paris Nanterre).
2. Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine (Rabat, Maroc).

de Géographie Physique : Environnements Quaternaires et Actuels (UMR 8591³), le Centre d'Études de l'Inde et de l'Asie du Sud (UMR 8564⁴) et le Centre d'Analyse et de Mathématiques Sociales (UMR 8557⁵).

Après l'exposé du modèle conceptuel⁶ sont présentés, ici, le contexte des deux secteurs étudiés ainsi que les méthodes mises en œuvre. Les résultats sont l'objet de plusieurs contributions⁷.

CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE, HISTORIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE

Les deux secteurs choisis se situent dans des positions différentes du bassin-versant du Sebou (fig. 1). Ce bassin de 40 000 km² forme une cuvette entre le Rif au nord, le Moyen Atlas et la Méseta au sud, le couloir Fès-Taza à l'est et l'océan Atlantique à l'ouest. Le territoire de *Volubilis* est situé en amont, à environ 100 km de l'embouchure de l'oued Sebou ; il est principalement traversé par les oueds Khoumane et Rdom. Celui-ci se jette dans le Gharb, basse plaine de l'oued Sebou, où aboutissent aussi les oueds Ouerrha et Beht.

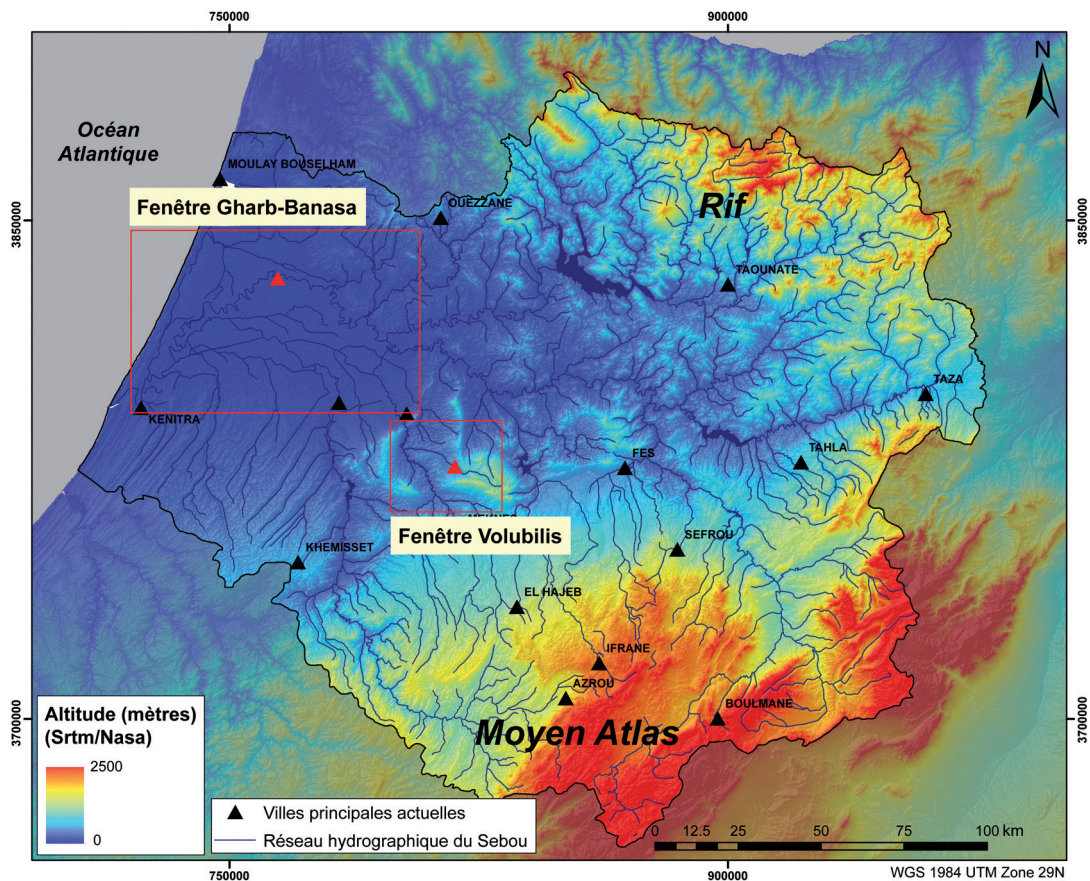


Fig. 1. Localisation des deux fenêtres d'études (*Volubilis* et *Gharb-Banasa*) ouvertes dans le bassin-versant de l'oued Sebou (Maroc). Fond : Hydrographie actuelle et contours du bassin-versant de l'oued Sebou sur le Modèle Numérique de Terrain (*EauMaghreb*).

3. Centre National de la Recherche Scientifique, universités Panthéon-Sorbonne et Paris-Est-Créteil-Val-de-Marne.
4. Centre National de la Recherche Scientifique, École des hautes Études en Sciences Sociales.
5. Centre National de la Recherche Scientifique, École des hautes Études en Sciences Sociales.
6. Voir dans ce volume la contribution de Pirot *et al.*, supra 85-101.
7. Voir les présentations des résultats dans ce volume, Castanet *et al.*, infra 121-151 ; Akerraz *et al.*, infra 397-418.

Banasa et la plaine du Gharb

La plaine du Gharb est bordée vers le nord et l'est par des collines marneuses et caillouteuses (miocènes et plio-quadernaires), vers le sud par la formation de la Maâmora (Quaternaire et Villafranchien) et vers l'ouest par des cordons littoraux et les merjas côtières (plio-quadernaires et holocènes, fig. 2, 3 et 4). Son altitude est comprise entre 0 et 30 m au-dessus du niveau marin actuel. La superficie de cette vaste plaine est de l'ordre de 3 000 km². Le modelé y est composé des levées naturelles de l'oued Sebou et de ses principaux affluents (oueds Ouerrha, Beht et Rdom) dominant de 5 à 7 m des zones basses plus humides (merjas).

Dans cette basse plaine faiblement pentue (1/10 000), le chenal de l'oued Sebou adopte un style fluvial à méandres. Les flux hydrosédimentaires au sein de la plaine du Gharb résultent du drainage et de l'érosion des formations du bassin-versant de l'oued Sebou, sous contrôle climatique et anthropique. La variabilité saisonnière du débit et interannuelle du module est importante, car le fleuve est sous l'influence d'un climat méditerranéen de nuance océanique⁸. En conséquence, la plaine est exposée à des inondations fréquentes et de grande extension, comme ce fut par exemple le cas en février et mars 2009 et 2010. Les risques d'origine fluviale tiennent également aux mobilités verticale et horizontale des lits fluviaux, résultant des recouvrements des méandres ou des avulsions. Cette dynamique de l'hydrosystème fluvial fut, avec ses rythmes saisonniers, interannuels, pluri-décennaux et pluriséculaires, un facteur primordial de l'évolution paléogéographique de la plaine du Gharb avant, pendant et après les occupations antiques.

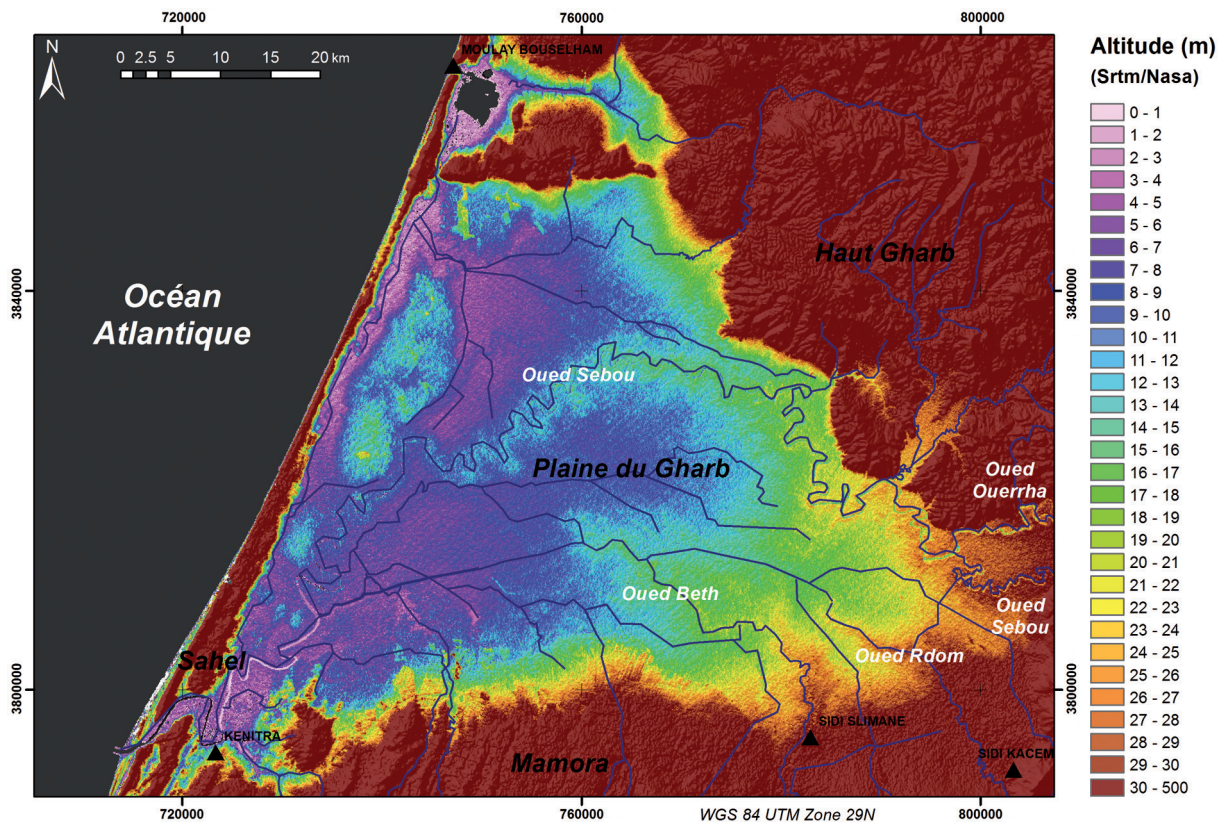


Fig. 2. Relief et hydrographie actuelle de la plaine du Gharb (fenêtre Gharb-Banasa).
Fond : Modèle numérique de Terrain (SRTM/NASA).

8. Le Coz 1964.

eaux souterraine et superficielle confèrent une bonne qualité agronomique aux sols développés, en particulier au niveau des secteurs naturellement mieux drainés où se trouvent les “mtills” et les “dhess”.

L’anthropisation de ce vaste espace de 80 km de longueur et 45 km de largeur est pluriséculaire. Depuis l’époque préhistorique, et dès le VI^e siècle a.C., pendant la période maurétanienne puis l’époque romaine, toute la plaine du Gharb est occupée le long des levées et aux marges nord et sud. Les centres urbains sont établis sur la rive des oueds principaux. Non loin de l’embouchure et sur la rive gauche du Sebou, navigable dans l’Antiquité¹¹, *Thamusida* est un centre maurétanien avant de devenir un camp et une ville romaine¹². En amont et sur la même rive, l’établissement maurétanien connu pour ses productions de céramique¹³ qui deviendra la colonie romaine de *Banasa*, est implanté sur la levée de berge naturelle de l’oued à une centaine de mètres du chenal. Au cœur de la plaine, Rirha, occupée aux époques maurétanienne et romaine, est établie sur un méandre de la rive droite de l’oued Beht¹⁴. Au sud, sur la rive gauche du Rdom, le site de Sidi Saïd recèle les vestiges d’un établissement maurétanien, puis ceux d’une ville et d’un camp d’époque romaine¹⁵. Après la réduction de la province romaine de Maurétanie tingitane à la fin du III^e siècle aux territoires limités au sud par l’oued Loukkos, les cités du Gharb déclinent ou sont abandonnées. Elles sont réoccupées à l’époque médiévale.

Les établissements ruraux antiques, jusqu’alors connus par les prospections, occupent les levées des oueds Sebou et Beht, ou ont pu être repérés en fonction de certains critères : points élevés de la plaine dont la cote est supérieure à 5 m NGM, *tumuli*, marabouts et tradition orale. Au nord-ouest, l’agglomération antique de l’oued Bqader est installée sur les anciennes levées du Beht peu élevées.

Volubilis et sa région

Le territoire de *Volubilis* présente des paysages caractéristiques des rides pré-rifaines et de leurs marges. Il est dominé par des massifs montagneux culminant aux alentours de 750 m à 1 000 m. Ces jebels, comme le Zerhoun, le Tselfat et le Kafs, qui se distinguent par des versants rocheux généralement escarpés, sont structurés par des calcaires, parfois marneux et gréseux, du Jurassique (fig. 5). Les calcaires dolomitiques du Bajocien supérieur et les calcaires gréseux du Bajocien inférieur forment, lorsqu’ils sont recoupés par des failles, des parois rocheuses subverticales. En dessous, des tabliers d’éboulis façonnent des versants au profil régularisé à environ 35°.

En contrebas, entre 500 m et 370 m environ, les pieds de versants concaves correspondent à des glacis d’érosion façonnés dans les marnes, les formations marno-calcaires et surtout les marnes sableuses miocènes. Dans le détail, ces glacis sont disséqués par un réseau relativement dense de ravins dans lesquels s’écoulent des ruisseaux intermittents. Les interfluves arrondis forment de petites collines. Les mouvements de solifluxion et de glissements rotationnels du terrain sont fréquents dans ces secteurs, notamment sur les pentes peu couvertes de végétation, par exemple la céréaliculture. Des colluvions empâtent les bas de versant et adoucissent les pentes. Celles-ci sont très faibles (inférieures à 5°) au contact avec le plateau.

Entre ces unités de relief, la dépression de *Volubilis*¹⁶ est occupée par le plateau du Bled el Gaâda, dont l’origine géologique est en lien avec le plateau du Saïs de Meknès¹⁷. Il s’agit d’une surface plane et uniforme, légèrement inclinée, constituée de sables, de cailloutis et de conglomérats continentaux plio-villafranchiens recouverts d’une croûte calcaire qui tend à protéger la surface tabulaire de l’érosion. Les bordures nord et ouest du plateau sont sculptées dans les marnes sableuses miocènes. Elles présentent donc de nombreux points communs avec la morphologie des glacis situés plus haut dans le relief : des versants disséqués par un réseau hydrographique relativement dense, avec des interfluves arrondis et des mouvements de terrain modelant leur surface.

11. Plin., *Nat.*, 5,5 : *amnis Sububus, praeter Banasam coloniam defluens, magnificus et nauigabilis.*

12. Callu *et al.* 1965 ; Rebuffat *et al.* 1970 ; Rebuffat, dir. 1977 ; Akerraz & Papi, dir. 2008 ; Akerraz *et al.* 2009 ; Eid. 2013.

13. Arharbi *et al.* 2006 ; Arharbi & Lenoir É. 2011.

14. Euzennat 1989, 177-180 ; Callegarin *et al.* 2011, 25-29 ; Callegarin *et al.*, dir. 2016 ; voir dans ce volume infra 163-192.

15. Euzennat 1989, 195-199. L’établissement maurétanien est attesté par la découverte d’un mur en briques crues en 2011, présentée au colloque TerMaghreb, Meknès, 2014, 28 (http://www.archeo.ens.fr/IMG/pdf/termaghreb_meknes_2014_fascicule.pdf).

16. Bargach 2011.

17. Ahmamou 1987.

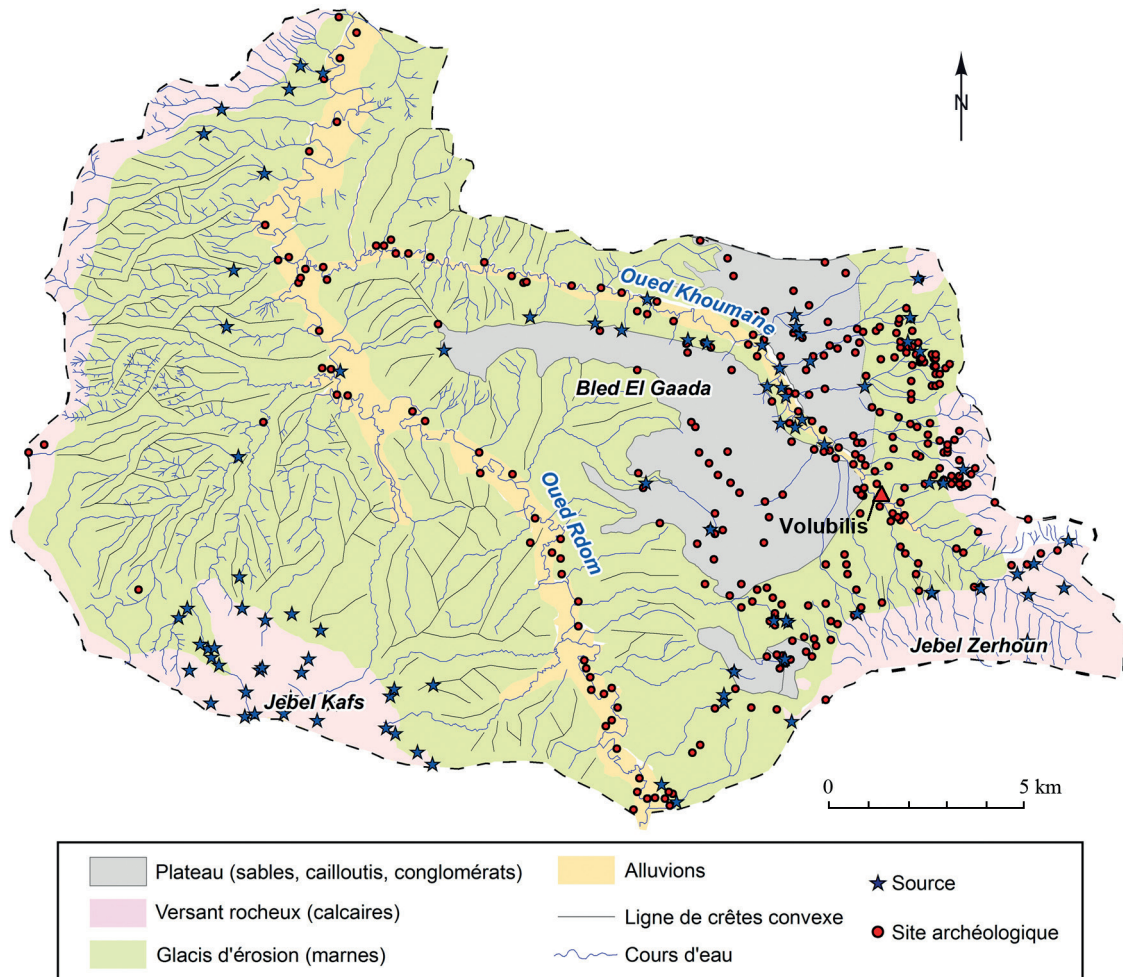


Fig. 5. Grandes unités géomorphologiques du territoire de *Volubilis*, dans le bassin-versant du Rdom (*EauMaghreb*).

Le nord-est de ce plateau est tranché par la vallée de l'oued Khoumane, relativement large (de 150 m en moyenne) et encaissée d'environ 80 m. C'est un affluent du Rdom dont la vallée, large de 450 m en moyenne, limite l'ouest du plateau. Plusieurs niveaux de terrasses s'y développent. Dans la section aval de cette vallée du Khoumane, un niveau tensiftien¹⁸ (équivalant au Riss) domine des alluvions "modernes". Plus à l'ouest, dans la vallée du Rdom, il existe, selon la carte géologique, quatre niveaux de terrasses au-dessus des alluvions modernes : les terrasses du Soltanien ainsi que celles du Tensiftien, de l'Amérien et du Salétien.

Ce territoire s'est structuré autour de *Volubilis*, qui s'est essentiellement développée à partir des II^e-I^{er} siècle a.C., sur un lieu occupé dès le Néolithique. La ville a commencé à décliner à la fin du III^e siècle p.C. La cité romaine aurait compté entre 10 000 et 12 000 habitants à son apogée¹⁹. Le site, partiellement fouillé depuis 1915, a été intégré au patrimoine mondial de l'humanité par l'UNESCO. De nombreux vestiges d'ouvrages hydrauliques d'époque romaine, bien conservés²⁰, y sont visibles, notamment un aqueduc²¹ datant de la seconde moitié du I^{er} siècle p.C.

18. Bendkik 2004.

19. Thouvenot 1949, 23. Le chiffre a été repris par Étienne 1960 (165 n. 5).

20. Lenoir É. 2009.

21. Étienne 1960, 17-23 ; voir dans ce volume la contribution de Akerraz *et al.*, infra 397-418.

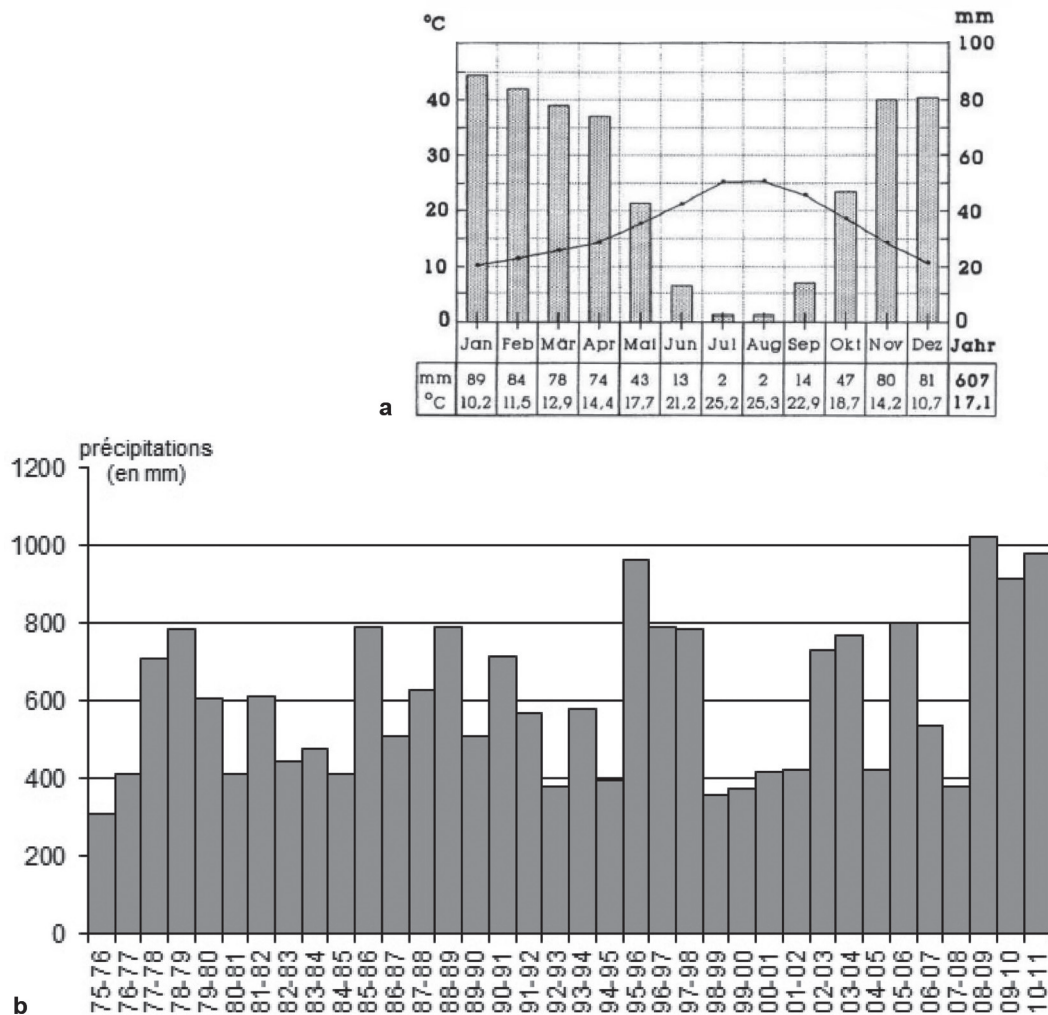


Fig. 6. Variabilité climatique du territoire de Volubilis.
a. Précipitations et températures mensuelles à Meknès (Sträber 1991) ;
b. Précipitations annuelles à Moulay Idriss (station météorologique du Centre des travaux agricoles, Moulay Idriss).

Aux environs de *Volubilis*, l'occupation rurale est bien attestée dès le 1^{er} siècle a.C. Elle devient plus dense pendant la période provinciale romaine (320 établissements agricoles recensés) et diminue dès l'abandon du sud de la province à la fin du III^e siècle p.C. Le dispositif militaire romain (trente ouvrages défensifs) s'organise autour de trois camps (Aïn Schkor, *Tocolosida* et Sidi Moussa Bou Fri)²² et des tours de guet contrôlent le territoire du jebel Bou Draa jusqu'au plateau du Saïs.

Les sites (établissements ruraux, exploitations agricoles, camps) sont généralement implantés dans les parties basses des glacis d'érosion, au contact avec le plateau (cas de *Volubilis*, notamment) à proximité de sources, sur le plateau et le long des vallées, et sur des terrasses quaternaires anciennes ou en bordure de plateau dominant la vallée.

Au sujet de l'approvisionnement en eau, la principale contrainte climatique de ce secteur est liée à l'irrégularité pluviométrique saisonnière et interannuelle. Il tombe en moyenne 600 mm/an²³, mais la pluviométrie est quasiment nulle en juillet et en août. D'une année sur l'autre, celle-ci peut varier du simple au triple (fig. 6).

22. Lenoir M. 2011, 271-278.

23. Despois & Raynal 1967 ; Troin 2002.

OBJECTIFS ET MÉTHODES

Des objectifs différents entre les deux fenêtres d'étude

L'étude vise à déterminer les modalités et les rythmes d'évolution géomorphologique, notamment ceux des réseaux hydrographiques et les dépôts fluviatiles du Sebou et de ses affluents. Dans le Gharb, comme à *Volubilis*, ces éléments ont été identifiés comme les principaux facteurs de changement du relief depuis les époques maurétanienne et romaine. Ces recherches doivent amener à définir les paramètres impliqués dans cette évolution. À *Volubilis* et dans ses environs proches, l'objectif est d'identifier ses sources d'approvisionnement en eau. Dans la plaine du Gharb, il s'agit de reconstituer la paléogéographie, l'évolution des risques d'origine fluviale et la taphonomie des gisements à l'échelle des territoires.

Si ces recherches ont été accomplies sur deux villes (*Banasa* et *Volubilis*) choisies en réponse à des problématiques et des questionnements archéologiques, la mise en relation de ces deux fenêtres d'étude situées dans le même bassin-versant (celui du Sebou) est pertinente pour l'examen des dynamiques géomorphologiques de manière multiscalaire (espace et temps). Elle permet d'obtenir des informations sur l'origine des dépôts et des dynamiques hydrosédimentaires dans le Gharb. Le territoire de *Volubilis* constitue un des secteurs amont, en tête de bassin-versant, dont les dynamiques et l'évolution ont des répercussions sur celles du Gharb. Cependant, étant donné que cette influence se mélange à celle de nombreux autres affluents du Sebou, elle joue probablement un rôle très limité sur la morphologie et l'hydrologie de la plaine du Gharb.

Pour atteindre ces objectifs, une approche géoarchéologique a été mise en œuvre. Ce type d'approche a longtemps été considéré comme l'application à l'archéologie des méthodes et techniques utilisées en géologie. Développée par les préhistoriens, les géologues et les quaternaristes, la géoarchéologie visait essentiellement à reconstituer des cadres chronostratigraphique et climatique du Quaternaire²⁴. Dans les années 1970, sous l'impulsion notamment de l'université de Cambridge et de C. Vita-Finzi²⁵, mais aussi de la "new geography", puis de la "new archaeology", cette pratique s'est ouverte à la "relation homme/milieu", au "territoire anthropisé", à "l'archéologie du paysage" et à l'Holocène²⁶. Cette approche se traduit par une collaboration entre spécialistes des sciences humaines (historiens, anthropologues, archéologues...) et spécialistes des sciences naturelles et de laboratoire (géologues, quaternaristes, sédimentologues, micromorphologues, géochronologues, botanistes, palynologues, archéozoologues, malacologues...). L'irruption de ces techniques explique que la géoarchéologie soit souvent définie²⁷ comme "l'application des méthodes de laboratoire issues de la géologie et de la Préhistoire à l'archéologie". Dans le cadre du programme *EauMaghreb*, nous développons une approche qui s'inspire de la définition proposée par É. Fouache²⁸ considérant la géoarchéologie comme "l'application des méthodes issues de la géographie et des géosciences à la reconstitution, dans une perspective archéologique, des paléo-environnements et des dynamiques paysagères".

Une approche spatiale, régressive, diachronique et interdisciplinaire

Différentes échelles spatiales ont été prises en compte. L'étude menée à l'échelle régionale vise à identifier les dynamiques paysagères, à restituer l'évolution géomorphologique du territoire et à repérer des paléoformes de relief. À l'échelle locale (intrasite archéologique, carottage ou coupe sédimentaire), elle doit notamment permettre d'obtenir des données chronostratigraphiques et de restituer la géométrie et le fonctionnement d'un aménagement ou d'une dynamique environnementale. La géomatique facilite l'intégration de ces échelles spatiales emboîtées, la synthèse et la modélisation des données ponctuelles et régionales²⁹ (surfaciées). Une démarche régressive et diachronique a été mise en œuvre. Les dynamiques actuelles ont été examinées pour comprendre le fonctionnement du milieu "naturel", considéré comme un système associant des éléments biotiques, abiotiques et anthropiques en interactions permanentes. Ces informations, croisées notamment aux données chronostratigraphiques et archéologiques, aident à restituer les paléoenvironnements et la

24. Berger *et al.* 2000.

25. Vita-Finzi 1969.

26. Fouache 2010.

27. Rapp & Hill 1998.

28. Fouache 2010.

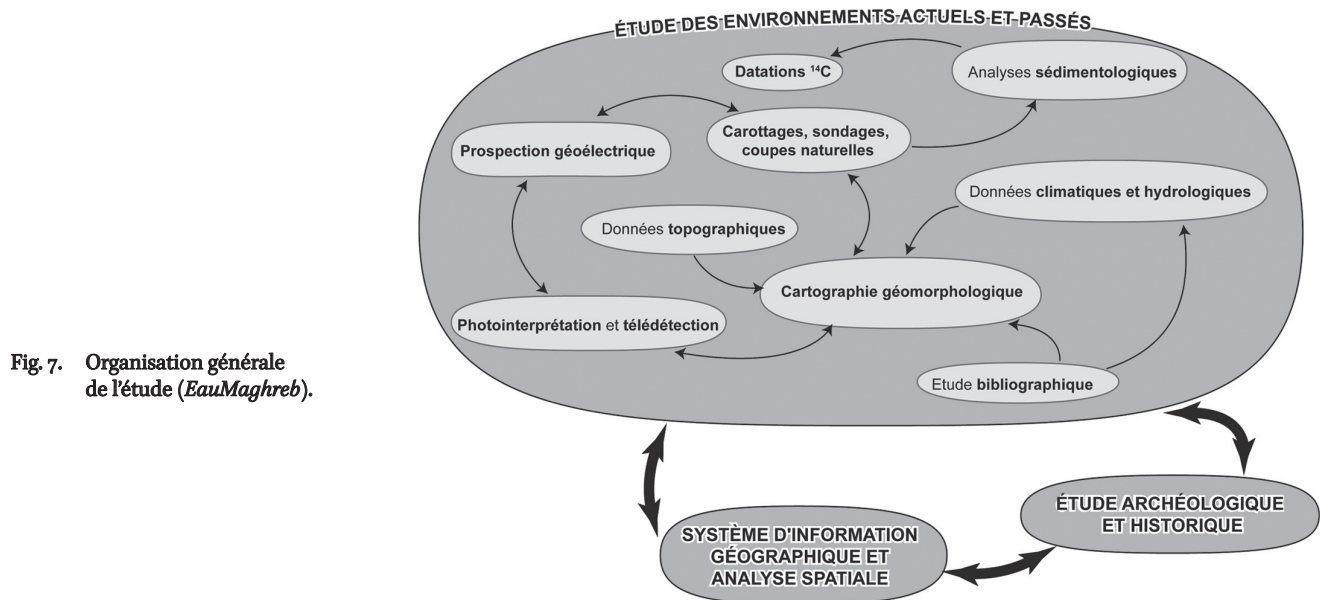
29. Ghilardi & Desruelles 2008.

paléogéographie de l'espace examiné. Cette démarche concerne des périodes durant lesquelles le territoire était anthropisé, mais aussi des époques durant lesquelles l'impact des sociétés sur le milieu était faible, voire nul, afin de mieux identifier l'influence de forçages "naturels" (climatiques, géologiques...) sur le milieu physique. L'étude environnementale a donc été réalisée à différentes échelles temporelles, généralement au sein du Quaternaire et particulièrement durant l'Holocène.

Les méthodes mises en œuvre

Étude géomorphologique

• Cartographie géomorphologique



Élément essentiel de notre approche, la cartographie géomorphologique définit des grandes unités morphologiques, en fonction des dynamiques et de la temporalité. Cela amène, d'une part à identifier des secteurs mobiles (au regard des dynamiques géomorphologiques) et des secteurs plus stables à l'échelle des temps instantanés et/ou historiques et/ou quaternaires. Par ailleurs, la cartographie géomorphologique doit aboutir à la définition de zones à potentiels archéologiques différents et enfin à indiquer des zones où les sites ont pu être érodés, ou au contraire fossilisés, depuis leur abandon.

La cartographie géomorphologique constitue une démarche et un document de base à l'échantillonnage. Elle sert à délimiter des secteurs plus restreints d'investigations géomorphologiques plus approfondies, notamment en définissant des implantations de carottage ou de sondage. À la fin des travaux, cette carte complétée par des éléments de la carte archéologique constitue un document de synthèse géoarchéologique (fig. 7). Dans le cas de l'enquête accomplie au Maroc, la carte géomorphologique a été élaborée à partir de l'analyse de photographies aériennes et d'images satellitaires, de données topographiques (cartes topographiques, données altimétriques numériques telles que le GDEM ASTER³⁰, relevés au GPS différentiel), de données géologiques (cartes³¹, travaux de recherche...), d'observations de terrain et de laboratoire (géochronologie). Elle a été réalisée au moyen d'un Système d'Information Géographique, en vue d'accomplir une modélisation spatiale et des restitutions paléogéographiques et paléoenvironnementales en deux ou trois dimensions.

30. Le Global Digital Elevation Model (GDEM) est un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) issu du programme Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) associant le ministère de la recherche japonais (MITI) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

31. Faugères 1978.

· Étude des archives sédimentaires

L'objectif est de distinguer des corps sédimentaires, de définir leur nature et leur modalité de mise en place, de les mettre en relation dans l'espace (transfert amont-aval des flux) et d'en établir la chronologie. Des datations, notamment par le radiocarbone (^{14}C), ont permis d'obtenir une chronologie absolue. Les données stratigraphiques ont été croisées entre elles, ainsi qu'avec des structures archéologiques identifiées et datées pour établir des chronologies relatives.

L'étude des archives sédimentaires s'est appuyée sur une stratégie d'échantillonnage, dont le maillage a été défini en fonction de la problématique géoarchéologique, mais aussi des contraintes temporelles, matérielles et de l'accessibilité au terrain (difficulté de franchissement de certains oueds, notamment). Les prélèvements ont été réalisés, pour la plupart, le long de transects (profils longitudinaux et transversaux) définis en fonction de la géométrie des unités morphosédimentaires (fig. 8) et des artefacts archéologiques. Pour compléter cet échantillonnage, des prélèvements ponctuels ont été effectués en fonction de données archéologiques et parfois de la présence de coupes naturelles, créées par le sapement de berges, notamment (fig. 9 et 10). Les archives sédimentaires ont donc été observées à partir des stratigraphies visibles sur ces coupes, mais aussi grâce à des carottages (hors-sites archéologiques) et à des sondages (en général intra-sites archéologiques).

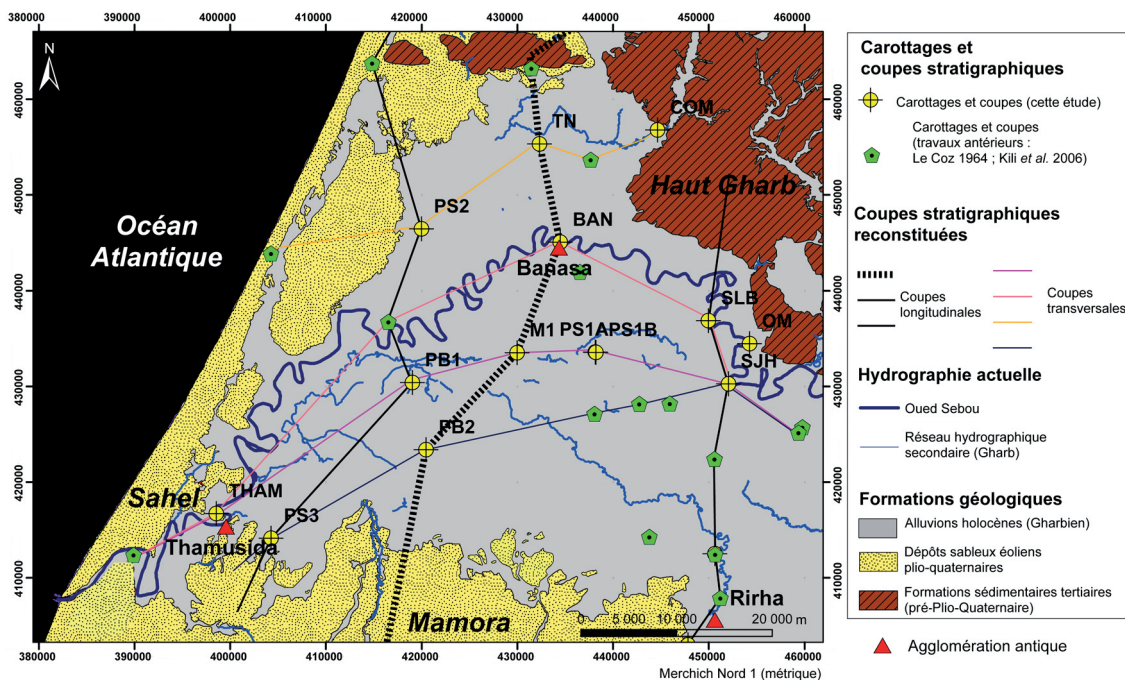


Fig. 8. Localisation des principaux carottages et coupes réalisés dans la plaine du Gharb. Les principales coupes stratigraphiques, reconstituées à partir de ces observations et des travaux antérieurs, sont indiquées (*EauMaghreb*).

Les échantillons ont été l'objet d'analyses sédimentologiques. La granulométrie, qui indique la répartition et la fréquence des particules des sédiments en fonction de leur taille, a aidé à déterminer le mode de transport et les conditions de dépôts sédimentaires. Les recherches menées notamment dans les plaines alluviales³² et en particulier les secteurs deltaïques³³, soulignent l'importance des analyses granulométriques – éventuellement associées à des identifications malacologiques – dans les études paléoenvironnementales. En complément, des analyses de susceptibilité magnétique ont été accomplies pour obtenir des données sur des changements environnementaux importants. Cette méthode peut aussi distinguer les apports

32. Castanet *et al.* 2015.

33. Ghilardi 2007.

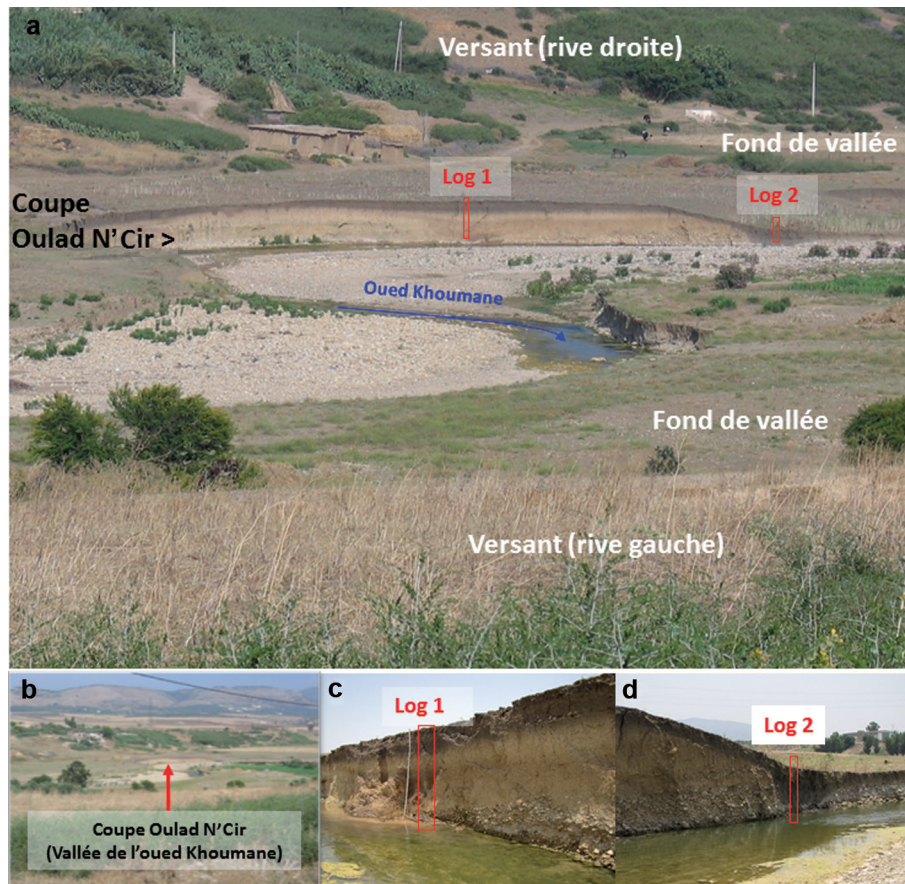


Fig. 9. Exemple d'observations géomorphologiques et d'échantillonnages sédimentaires réalisés dans la plaine alluviale de l'oued Khoumane au sein du territoire de *Volubilis*.
 a. Les principaux éléments du relief, la coupe Oulad N'Cir dans les formations fluviales du fond de la vallée, au niveau de la concavité de la berge d'un méandre de l'oued Khoumane ;
 b. Localisation de la coupe dans le paysage du territoire de *Volubilis* ;
 c et d. Localisation des logs 1 et 2 dans la coupe Oulad N'Cir (*EauMaghreb*).

sédimentaires de différents cours d'eau aboutissant dans un delta³⁴. De plus, les minéraux lourds ont été examinés pour aider à l'interprétation de la stratigraphie et à la détermination de la provenance des sédiments.

Des analyses géochimiques ont aussi été effectuées. La perte au feu indique le pourcentage de matière organique et renseigne sur la fraction fine du sédiment. La recherche du carbone, de l'azote et du soufre (CNS) a été réalisée plus spécifiquement pour caractériser la matière organique et indirectement les paléomilieux. La différence entre le carbone total et le carbone organique fournit la mesure de la fraction inorganique.

Des éléments, en général une matière organique diffuse, ont été prélevés et datés par ¹⁴C. Les résultats de ces datations ont été ajustés au moyen de courbes de calibration publiées considérant le type de matériel daté³⁵.

34. Ghilardi 2007.

35. Stuiver & Reimer 1993 ; Reimer *et al.* 2013.

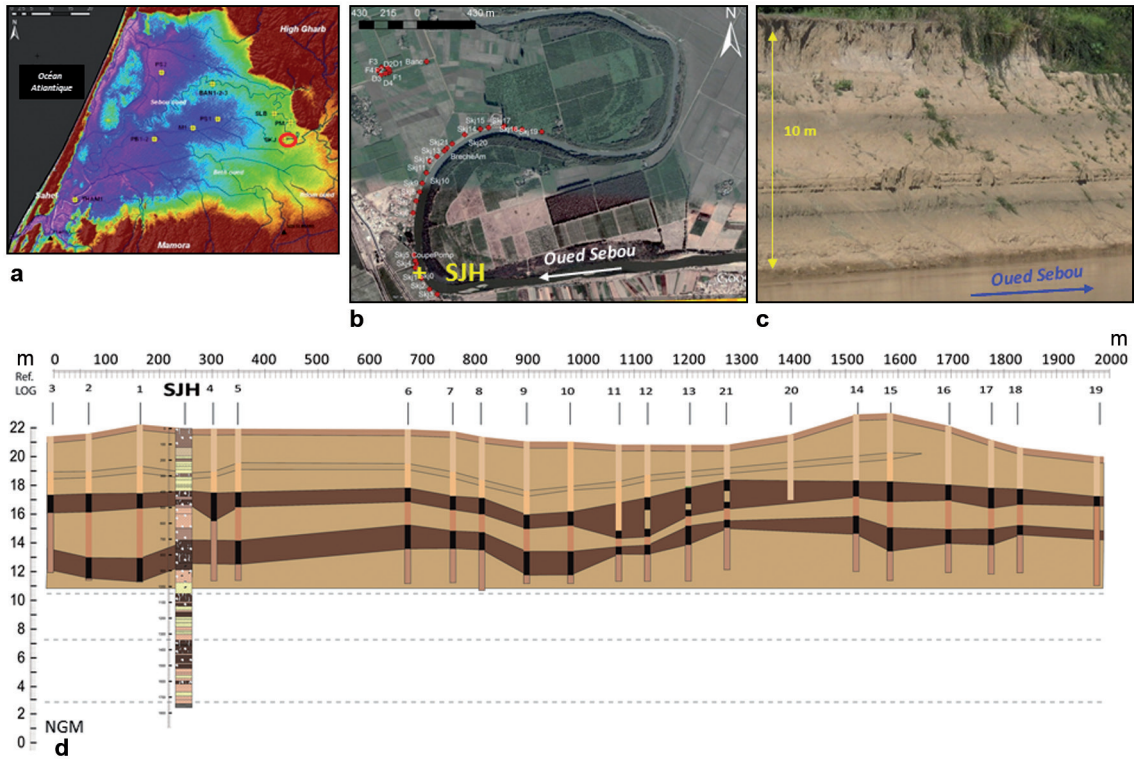


Fig. 10. Exemple d'observations géomorphologiques, stratigraphiques et d'échantillonnage sédimentaire réalisés dans la basse plaine alluviale de l'oued Sebou (la plaine du Gharb) au niveau de Souq Jemâa el Haouafat (coupe et log SJH).
 a. Localisation de la coupe SJH dans la partie amont de la plaine du Gharb ;
 b. Localisation de la coupe SJH au niveau de la berge de rive gauche concave d'un méandre de l'oued Sebou. Fond : Image satellitaire (*Google Earth*) ;
 c. Vue partielle de la coupe SJH révélant la géométrie et la puissance des principales unités du remblaiement alluvial holocène ;
 d. Premier état de la reconstitution de la coupe SJH (coupe et log) (*EauMaghreb*).

Type de données	Fréquence et période de relevés
Précipitations	Relevés mensuels depuis 1975
	Relevés journaliers depuis l'année hydrologique 1985-1986
Autres paramètres (températures minimales, moyennes et maximales de l'air ; humidités relatives minimales, moyennes et maximales ; rayonnement solaire ; vent).	Relevés journaliers depuis le 01/08/2003
Évaporation	Estimation journalière selon la formule de Penman-Monteith
Débit des sources Aïn Fertassa, Aïn Walli et Aïn Schkour	Relevés mensuels du 01/12/2009 au 01/12/2010

Fig. 11. Les données climatiques acquises au cours du programme *EauMaghreb* sur le territoire de *Volubilis* (*EauMaghreb*).

Étude hydrologique et climatique

Cette étude, fondamentale pour le programme *EauMaghreb*, a été menée à partir de données actuelles (fig. 11) qui présentent des limites de représentativité. En outre, dans les secteurs retenus, les données paléoclimatiques sont quasiment inexistantes pour des pas de temps "fins", c'est-à-dire de quelques centaines, voire quelques milliers d'années. Ce raisonnement par analogie comporte un risque de transposer la situation actuelle au contexte hydroclimatique antique sans avoir assez d'éléments susceptibles de valider cette démarche.

• Étude hydrologique

L'étude hydrologique a été adaptée aux secteurs sélectionnés et aux problématiques qui leur sont associées.

Dans le territoire de *Volubilis*, les sources ont été recensées à partir d'observations de terrain, de cartes et de données acquises auprès d'institutions marocaines³⁶. De plus, l'analyse géomorphologique a identifié des zones potentielles où des sources ont pu se tarir ou être oubliées depuis l'époque romaine. Les mesures hydrologiques obtenues auprès des institutions présentent des limites de représentativité. Pour la plupart des sources, il n'y a généralement qu'une seule mesure de débit, réalisée dans les années 1950-1960. Pour combler cette lacune documentaire, des relevés mensuels du débit de trois sources autour de *Volubilis* ont été effectués³⁷, dans l'objectif d'être croisés avec les données pluviométriques. Cependant, étant donné que, pour des raisons techniques, ils n'ont été accomplis que durant une année, ces relevés n'ont pas de représentativité statistique.

Dans le Gharb, l'étude des régimes fluviaux des oueds et des fonctionnements hydrologique et sédimentaire actuels de la plaine – en particuliers relatifs aux écoulements superficiels et souterrains – permet de constituer des référentiels actuels nécessaires aux restitutions des milieux et dynamiques passés. Elle offre également une meilleure perception des héritages morphologiques encore présents aujourd'hui dans la plaine. Cela favorise non seulement une connaissance accrue des dynamiques passées, mais également du rôle joué par ces héritages morphologiques sur les dynamiques actuelles. L'étude des processus actuels repose sur les travaux antérieurs³⁸, ainsi que sur des enquêtes de terrain et des analyses spatiales (télédétection, SIG) réalisées dans le cadre du programme *EauMaghreb*.

• Étude climatique

L'étude climatique n'a concerné que le territoire de *Volubilis*. Elle s'appuie sur des données inédites, issues de la station météorologique du Centre des travaux agricoles de Moulay Idriss, située à environ 6 km au sud-est de la ville romaine. Il s'agit de relevés pluviométriques, mensuels depuis 1975 et journaliers depuis l'année hydrologique 1985-1986, ainsi que de relevés quotidiens d'autres paramètres, notamment thermiques, depuis le 1^{er} août 2003. Les valeurs journalières de l'évapotranspiration potentielle, établies selon la formule de Penman-Monteith à partir de ces paramètres, ont également été transmises par le Centre des travaux agricoles. Les variabilités mensuelle et interannuelle des pluies efficaces, susceptibles de recharger les nappes et d'alimenter les sources, seront évaluées à partir de ces données, sans négliger les incertitudes liées à leurs limites statistiques.

Croisement des données environnementales avec les données archéologiques

Les données archéologiques sont essentiellement issues de prospections accomplies dans la plaine du Gharb d'abord par A. Luquet³⁹ et entre 1982 et 1995 par la mission dirigée par R. Rebuffat et A. Akerraz⁴⁰. Ces prospections ont été ciblées selon des critères tels que la présence de points hauts ou de marabouts ou d'après les indications fournies par la toponymie

36. Agence du bassin hydraulique du Sebou (ABHS) à Fès ; Office national de l'eau potable (ONEP) à Meknès.

37. Ces mesures ont été réalisées par M. Alilou qui nous a fait part de sa grande connaissance de la région, cf. dans ce volume la contribution de A. Akerraz *et al.*, infra 397, tableau 1.

38. Le Coz 1964 ; *Atlas du bassin du Sebou* 1970 ; Rhaouti 1994.

39. Luquet 1966.

40. Akerraz *et al.* 1995 ; Rebuffat 2011 ; Akerraz *et al.*, éd., 2012.

et la tradition orale. Les principaux sites urbains ont été identifiés par C. Tissot en 1871⁴¹. Des fouilles sont réalisées de façon discontinue depuis 1915 à *Volubilis*, 1920 à Rirha et 1933 à *Banasa*.

À l'échelle régionale, le croisement des données environnementales, en particulier géomorphologiques, avec les données archéologiques vise à élaborer une typologie des sites selon les caractéristiques de leur milieu physique originel et les modifications environnementales (érosion, fossilisation...) contemporaines et/ou postérieures à leur occupation. Cela doit amener à identifier certains facteurs expliquant leur implantation, sans oublier toutefois que d'autres paramètres, tels que la position des sites les uns par rapport aux autres ou leur insertion dans des trames régionales de peuplement, doivent être pris en compte. Ce croisement doit aussi aider à préciser la chronologie issue de l'observation des archives sédimentaires. De plus, il vise à apporter des éléments de réflexion sur les risques liés à l'activité fluviale, notamment les inondations, les avulsions et le recouplement de méandres, dans le Gharb durant l'Antiquité, ainsi qu'à identifier des éléments de permanence de l'anthropisation depuis la période maurétanienne, à l'échelle du site comme à celle du territoire (trame de peuplement).

À l'échelle des sites et de leurs environs proches, ce croisement tend à restituer la géométrie et le fonctionnement d'aménagements hydrauliques. Par exemple, le croisement des résultats d'une prospection géophysique effectuée à *Volubilis*⁴² avec l'examen des sources a été un moyen de restituer la géométrie de l'aqueduc qui a alimenté la cité en eau.

La véracité de cette démarche est limitée par la méthode d'élaboration des cartes et des prospections archéologiques. Celles-ci n'ont pas de caractère systématique selon un maillage strictement respecté, ce qui est impossible compte tenu des superficies concernées. Les résultats de ce croisement sont donc largement tributaires d'une part des méthodes d'acquisition des données archéologiques, d'autre part de la résolution des reconstitutions paléoenvironnementales.

Le programme *EauMaghreb* a ainsi développé, pour la première fois dans la plaine du Gharb et le territoire de *Volubilis*, une approche géoarchéologique pluridisciplinaire et multiscalaire. L'observation par télédétection, associée à l'analyse des modèles numériques de terrain et à l'étude morphostratigraphique, a révélé des unités topographiques et géomorphologiques peu visibles dans les paysages actuels, notamment dans la plaine du Gharb, dont le relief est relativement uniforme⁴³. Le croisement des données environnementales avec les données archéologiques, intra-sites et hors-sites, a apporté des informations nouvelles sur les environnements contemporains et postérieurs à l'occupation des sites.

Cependant, cette recherche se caractérise par quelques limites méthodologiques principalement liées à un manque de temps par rapport à l'étendue des territoires sélectionnés, à un manque d'accès aux données, voire à un déficit de données, surtout pour l'hydrologie et la climatologie. Le maillage d'échantillonnage, relativement lâche, de l'étude géomorphologique est, en grande partie, guidé par la découverte de coupes naturelles et par des contraintes d'accessibilité, même si des carottages l'ont complété.

Certains thèmes nécessiteraient des investigations supplémentaires. Il s'agit, par exemple, de l'étude des propriétés, notamment agronomiques, et de la mise en valeur des terroirs qui a sans doute exercé une influence sur l'implantation des établissements, ainsi que de celle des couverts végétaux et de leur évolution dont le rôle sur le cycle de l'eau et le débit de certaines sources liées à des nappes superficielles n'est sans doute pas négligeable.

Les recherches géoarchéologiques accomplies dans le cadre du programme *EauMaghreb* offrent de nombreuses perspectives de recherches. L'étude géomorphologique pourrait être approfondie en affinant le maillage d'échantillonnage sédimentologique, notamment pour l'examen du continuum amont/aval. D'autres secteurs amont pourraient être intégrés et d'autres types d'archives sédimentaires, comme les dépôts littoraux dans le Gharb, dont l'évolution est influencée par celle du niveau marin et du trait de côte, pourraient être examinés. L'analyse multi-proxy pourrait être complétée par des analyses paléocéologiques (palynologie, malacologie). L'acquisition de données sur les forçages externes, en particulier néotectoniques, permettrait de mieux comprendre les causes de l'évolution environnementale des secteurs choisis.

41. Tissot 1878.

42. Voir dans ce volume la contribution de Akerraz *et al.* infra 397-418.

43. Voir dans ce volume la contribution de Castanet *et al.* infra 121-151.

Les résultats de l'étude géomorphologique aideront à cibler les prospections archéologiques sur des secteurs clés à fort potentiel. Des prospections pédestres seront ensuite un moyen d'affiner la carte du potentiel archéologique. L'utilisation de la télédétection par laser (Lidar) donnerait la possibilité d'identifier des micro-reliefs ou de révéler des artefacts archéologiques peu visibles, voire invisibles dans le paysage⁴⁴.

L'approche géoarchéologique mise en œuvre au Maroc pourrait être transposée à d'autres secteurs d'étude caractérisés par de fortes interactions entre les dynamiques environnementales, notamment hydrologiques, et anthropiques.

Références bibliographiques

Source antique

Plin l'ancien, *Histoire Naturelle, Livre v*, 1-46, éd. Desanges, J., Paris, 1980, 2003².

Ouvrages et articles

Akerraz, A. et E. Papi, dir. (2008) : *Sidi Ali Ben Ahmed-Thamusida 1. I Contesti*, Rome.

Akerraz, A., V. Brouquier-Reddé et É. Lenoir (1995) : "Nouvelles découvertes dans le bassin du Sebou : 1. L'occupation antique de la plaine du Gharb", in : Troussat, éd. 1995, 233-297.

Akerraz, A., E. Papi, E. Gliozzo et I. Turbanti Memmi (2009) : *Sidi Ali Ben Ahmed-Thamusida 2. L'Archeometria*, Rome.

Akerraz, A., E. Papi et S. Camporeale (2013) : *Sidi Ali Ben Ahmed-Thamusida 3. I Materiali, Le matériel*, Rome.

Akerraz, A., H. Limane, R. Rebuffat, éd., V. Brouquier-Reddé, M. Coltelloni, F.-Z. El Harrif, A. Ichkhakh, M. Kbiri Alaoui, É. Lenoir, M. Lenoir, J. Napoli, A. Oumlil, A. Poignant et A. Portelli (2012) : *Carte archéologique du Maroc antique, Le bassin du Sebou, 2, À l'embouchure du Sebou, Cartes Kénitra-Sidi Yahia du Gharb*, VESAM II.2, Rabat.

Ahmamou, M. (1987) : *Étude sédimentologique des calcaires lacustres (plio-quaternaires) du bassin de Fès-Meknès (Maroc)*, thèse, université Aix-Marseille.

Arharbi, R. et É. Lenoir (2011) : "Recherches archéologiques franco-marocaines à Banasa (Maroc)", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 124, 21-24 (<https://nda.revues.org/1416>).

Arharbi, R. et al. (2006) : "Recherches sur le quartier sud de Banasa", in : *L'Africa romana, 16, Mobilità delle persone e dei popoli, dinamiche migratorie, emigrazioni ed immigrazioni nelle province occidentali dell'Impero romano, Atti del convegno di studio, Rabat, 15-19 dicembre 2004*, Rome, 2145-2156.

Atlas du bassin du Sebou (1970), Maroc, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire.

Bargach, K. (2011) : *Les déformations plio-quaternaires dans la partie frontale de la chaîne du Rif (Rides pré-rifaines, et bassin du Saïs) : un exemple de la tectonique en coins expulsés*, thèse, université Mohammed V-Agdal, Rabat.

Bendkik, A. (2004) : *Carte géologique du Maroc, Sidi Kacem, Échelle 1/50 000*, Notes et mémoires du Service géologique du Maroc, 431.

Berger, J.-F., J.-L. Léopold-Brochier et J.-P. Bravard (2000) : "La géoarchéologie : définition et champs d'application", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 81, 37-47.

Bridoux, V., éd. (2009) : *Contrôle et distribution de l'eau dans le Maghreb antique et médiéval*, Rome.

Callegarin, L., M. Kbiri-Alaoui, A. Ichkhakh et J.-C. Roux (2011) : "Le site antique et médiéval de Rirha (Sidi Slimane, Maroc)", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 124, 25-29 (<https://nda.revues.org/1419>).

Callegarin, L., M. Kbiri-Alaoui, A. Ichkhakh et J.-C. Roux, dir. (2016) : *Rirha, site antique et médiéval du Maroc*, Casa de Velásquez 150-153, Madrid, 4 vol.

Callu, J.-P., J.-P. Morel, R. Rebuffat et G. Hallier (1965) : *Thamusida. Fouilles du service des Antiquités du Maroc*, 1, MEFR Suppl. 2, Paris-Rome.

Carcaud, N. et G. Arnaud-Fassetta, éd. (2015) : *La géoarchéologie française au XXI^e siècle*, Paris.

Castanet, C., J. Burnouf, C. Camerlynck, N. Carcaud, A.-L. Cyprien-Chouin, M. Garcin, et M. Lamothe (2015) : "Holocene fluvial Dynamic of the middle Loire River (Val-d'Orléans, France) : Responses to climatic Variability and anthropogenic Impacts", in : Carcaud & Arnaud-Fassetta, éd. 2015, 119-130.

44. Georges-Leroy et al. 2009.

- Choubert, G. (1956) : *Carte géologique du Maroc au 1/5 000 000*, Ministère de la production industrielle et des mines, Division de la géologie, Service de la carte géologique.
- Despois, J. et R. Raynal (1967) : *Géographie de l'Afrique du Nord-Ouest*, Paris.
- Étienne, R. (1960) : *Le quartier nord-est de Volubilis*, Paris.
- Euzennat, M. (1989) : *Le limes de Tingitane. La frontière méridionale*, Études d'Antiquités africaines, Paris.
- Faugères, J.-C. (1978) : *Les rides sud-rifaines : évolution sédimentaire et structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge africaine*, thèse, université Bordeaux-1.
- Fouache, É. (2010) : "L'approche Géoarchéologique", *Revista de Geomorfologie*, 12, 5-14.
- Georges-Leroy, M., J. Bock, E. Dambrine et J.-L. Dupouey (2009) : "Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle)", *Revue Géographique de l'Est*, 49, 2-3 (<http://rge.revues.org/1931>)
- Ghilardi, M. (2007) : *Dynamiques spatiales et reconstitutions paléogéographiques de la plaine de Thessalonique (Grèce) à l'Holocène récent*, thèse de doctorat, université Paris-Est-Créteil-Val-de-Marne.
- Ghilardi, M. et S. Desruelles (2008) : "Geoarchaeology: where human, social and earth sciences meet with technology", *SAPIENS*, 1, 1-9.
- Kili, M., B. El Mansouri, J. Chao et A. Ait Fora (2006) : "De nouveaux éléments structuraux du complexe aquifère profond du bassin du Rharb (Maroc) : implications hydrogéologiques", *CR Géoscience*, 338, 1194-1202.
- Le Coz, J. (1964) : *Le Rharb, Fellahs et colons. Étude de géographie régionale. 1. Les cadres de la nature et de l'histoire*, Rabat.
- Lenoir, É. (2009) : "Documents sur le contrôle et la distribution de l'eau dans le Maroc antique", in : Bridoux, éd. 2009, 41-83.
- Lenoir, M. (2011) : *Le camp romain, Proche-Orient et Afrique du Nord*, BEFAR 345, Rome.
- Luquet, A. (1966) : "Contribution à l'Atlas archéologique du Maroc, région du Rharb", *Bulletin d'Archéologie Marocaine*, 6, 365-375.
- Rapp, G. et C. Hill (1998) : *Geoarchaeology : The Earth Science Approach to Archaeological Interpretation*, Londres.
- Rebuffat, R. (2011) : "La carte archéologique du Maroc", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 124, 1620 (<https://nda.revues.org/1414>).
- Rebuffat, R., dir. (1977) : *Thamusida. Fouilles du Service des Antiquités du Maroc*, 3, MEFR Suppl. 2, Paris-Rome.
- Rebuffat, R., G. Hallier et J. Marion (1970) : *Thamusida. Fouilles du Service des Antiquités du Maroc*, 2, MEFR Suppl. 2, Paris-Rome.
- Reimer, P.J., E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, P.G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C.E. Buck, H. Cheng, R.L. Edwards, M. Friedrich, P.M. Grootes, T.P. Guilderson, I. Hafliadason, I. Hajdas, C. Hatté, T.J. Heaton, D.L. Hoffmann, A.G. Hogg, K.A. Hughen, K.F. Kaiser, B. Kromer, S.W. Manning, M. Niu, R.W. Reimer, D.A. Richards, E.M. Scott, J.R. Southon, R.A. Staff, C.S.M. Turney et J. van der Plicht (2013) : "IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP", *Radiocarbon*, 55.4, 1869-1887.
- Rhaouti, S. (1994) : *Gestion des inondations dans la plaine du Gharb (Maroc). Cas avant et après la réalisation du barrage Al Wahda, rapport*, IAVH Rabat / ENSH Grenoble.
- Sträber, M. (1999) : *Klimadiagramm-Atlas der erde, teil 2: Asien, Lateinamerika, Afrika, Australien und Ozeanien*, Dortmund.
- Stuiver, M. et P.J. Reimer (1993) : "Extended ¹⁴C Data Base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C Age Calibration Program", *Radiocarbon*, 35.1, 215-230.
- Thouvenot, R. (1949) : *Volubilis*, Paris.
- Tissot, C. (1878) : *Recherches sur la géographie comparée de la Maurétanie tingitane*, Paris.
- Troin, J.-F. (2002) : *Maroc, Régions, Pays, Territoires*, Paris.
- Trousset, P., éd. (1995) : *L'Afrique du Nord antique et médiévale : monuments funéraires, institutions autochtones, Histoire et archéologie de l'Afrique du Nord 6, Actes du Colloque international, 118^e Congrès National des Sociétés Savantes (CTHS), Pau, octobre 1993*, Paris.
- Vita-Finzi, C. (1969) : *The Mediterranean Valleys : geological Changes in historical Times*, Cambridge.

* Stéphane Desruelles, ENEC, UMR 8185, Université Paris-Sorbonne - CNRS
 Cyril Castanet, Laboratoire de Géographie Physique, Environnements Quaternaires et Actuels, UMR 8591, Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis - CNRS
 Aomar Akerraz, Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine, Rabat (Maroc)
 M'hamed Alilou, Ministère de la culture (Maroc)
 Rachid Arharbi, Ministère de la culture (Maroc)
 Véronique Brouquier-Reddé, AORoc, UMR 8546, CNRS - ENS - Université Paris Sciences & Lettres
 Jean-Philippe Degeai, Archéologie des Sociétés méditerranéennes, UMR 5140, CNRS
 Agnès Gauthier, Laboratoire de Géographie Physique : Environnements Quaternaires et Actuels, UMR 8591, CNRS
 Hélène Geroyannis, Centre d'Analyse et de Mathématiques Sociales, UMR 8557 CNRS - EHESS
 Éliane Lenoir, AORoc, UMR 8546, CNRS - ENS - Université Paris Sciences & Lettres
 Françoise Pirot, Centre d'Études de l'Inde et de l'Asie du Sud, UMR 8564, CNRS
 Rachid Ragala, ENEC, UMR 8185, Université Paris-Sorbonne - CNRS
 Vincent Robert, Laboratoire de Géographie Physique, Environnements Quaternaires et Actuels, UMR 8591, CNRS