



**HAL**  
open science

## Histoire et paléogéographie des paysages côtiers d'Orbetello (Toscane)

Jean-Philippe Goiran, Adele Bertini, Marco Leporati Persiano, Cécile Vittori, Gilles Brocard, Stoil Chapkanski, Camille Gonçalves, Matteo Pili, Christophe Benech, Quentin Vitale, et al.

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Goiran, Adele Bertini, Marco Leporati Persiano, Cécile Vittori, Gilles Brocard, et al.. Histoire et paléogéographie des paysages côtiers d'Orbetello (Toscane): Une approche pluridisciplinaire pour l'étude des relations entre une ville et sa lagune. *Bollettino di Archeologia on line*, 2023, XIV (1), pp.163-183. halshs-04132201

**HAL Id: halshs-04132201**

**<https://shs.hal.science/halshs-04132201>**

Submitted on 18 Jun 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.

## BOLLETTINO DI ARCHEOLOGIA ON LINE

DIREZIONE GENERALE ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO

XIV, 2023/1

JEAN-PHILIPPE GOIRAN\*, ADELE BERTINI\*\*, MARCO LEPORATTI-PERSIANO\*\*\*,  
CECILE VITTORI\*, GILLES BROCARD\*\*\*\*, STOIL CHAPKANSKI\*\*\*\*\*, CAMILLE  
GONÇALVES\*, MATTEO PILI\*&\*\*, CHRISTOPHE BENECH\*, QUENTIN VITALE\*\*\*\*\*,  
LIONEL DARRAS\*, DANIELE D'OTTAVIO\*\*\*\*\*, FABIO CIANCHI\*\*\*\*\*

### HISTOIRE ET PALÉOGÉOGRAPHIE DES PAYSAGES CÔTIERS D'ORBETELLO (TOSCANE) : UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE POUR L'ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE UNE VILLE ET SA LAGUNE♦

*This research program, involving French and Italian institutions, aims at understanding how the settling and development of the Etruscan city of Orbetello affected the environmental evolution of its lagoon, and how the evolution of the lagoon affected in turn the economics of Orbetello. In other words, to define how the life of the city has been influenced by its own impact on the lagoon. To achieve this we have followed two lines of research. One is historical, based on the analysis of iconographic, textual and archaeological archives from antiquity to the present day. The other, paleoenvironmental, is based on the analysis of sedimentary archives. The idea is to combine several investigation methods to map the dynamics of sedimentation, by means of geophysical prospecting (imaging of the sedimentary architecture using acoustic profiles) and the study of sedimentary cores. The latter allow the dating of sediments, the analysis of their biological components to reconstitute lagoon palaeoenvironments (ostracods, pollen, dinoflagellate cysts, malacofauna, composition of organic matter), and the analysis of metallic contaminants, highlighting the changes induced by lagoon management and the development of the city.*

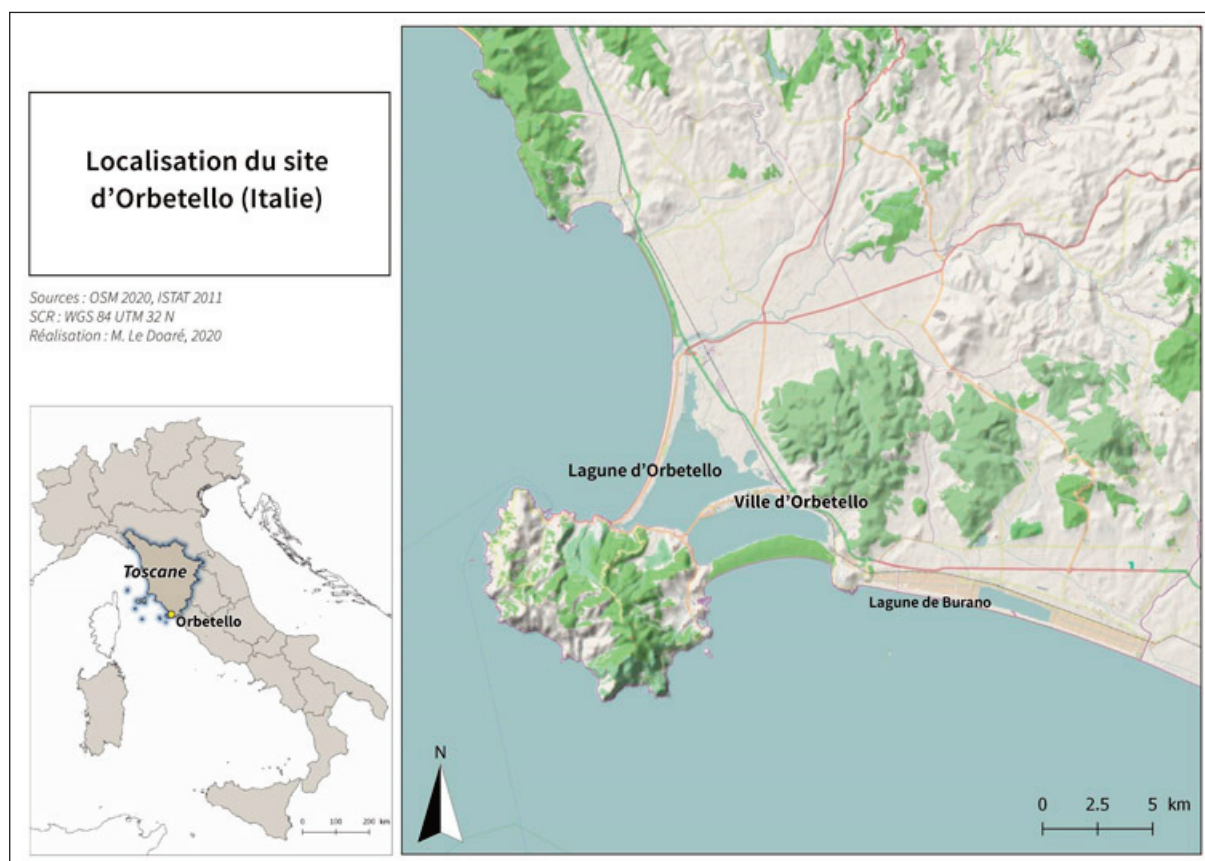
---

♦ Les auteurs tiennent à remercier différentes institutions et organisations: la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per le province di Siena, Grosseto e Arezzo (M. Milletti, E. Giuffrè) ; l'Università di Firenze ; l'Université de Lyon 2 ; le CNRS ; le WWF - Laguna di Orbetello ; Univ. Freiburg, LSCE ; l'Université de Versailles Saint-Quentin, Laboratoire radiocarbone de Lyon, UMR 5204 EDYTEM ; l'Université de Savoie ; l'Université de Lausanne (UNIL) ; l'Université de Rouen ; l'Università di Padova (R. Deiana, V. Del Segato) ; il Comune di Orbetello ; il Reparto Carabinieri Biodiversità di Follonica (Comandante G. Quilghini) e la Riserva Forestale di Protezione "Duna Feniglia" - Nucleo Tutela Biodiversità Duna Feniglia (M. Ilo V. Di Cori) ; la Regione Toscana (F. Bertini), M. Le Doaré, A. Grazzini, V. et A. Fidati, P. Brama. Pour la logistique nous remercions les personnes et groupes ayant soutenu logistiquement et aidé ces travaux scientifiques: Società Canottieri Orbetello (E. Danesi, Francesco et Valerio), la Cooperativa I Pescatori di Orbetello, l'équipe de F. Cianchi du WWF, A. Gambino pour l'hébergement. Les programmes de recherche ayant soutenu ou soutenant financièrement ce projet: Scientific Breakthrough Program - IDEX-LYON - UDL - UDL2 - ANR, LabEx IMU, Soutien à la Mobilité Internationale SMI-INSHS-CNRS, ANR LabCom GeoHeritage, Università di Firenze, Grant from Florida State University (Andrea U. De Giorgi), WWF.

## INTRODUCTION

Les grandes villes portuaires sont souvent installées directement sur la côte, parfois proche des embouchures, ou bien dans des environnements naturellement protégés tels que les lagunes ouvertes sur la mer. Ces milieux fluvio-marins ou lagunaires, initialement protecteurs, deviennent contraignants lorsque les villes, en se développant, cherchent à s'affranchir du milieu naturel. Le confinement des lagunes rend les eaux lagunaires très sensibles à la pollution péri-urbaine<sup>1</sup>, affectant négativement la sécurité alimentaire et la santé des zones d'habitat et de commerce. La nécessité d'expansion des villes et des infrastructures conduit à des aménagements qui artificialisent les lagunes<sup>2</sup>. Ces aménagements suivent des logiques à court terme (quelques dizaines d'années), qui entrent en conflit avec les dynamiques à long terme (siècles et millénaires) de ces milieux, perturbant les flux sédimentaires et hydrologiques, ainsi que l'équilibre des écosystèmes.

La ville d'Orbetello en Italie centrale est installée au centre d'une lagune peu profonde, fermée et connectée à la mer par deux canaux (Nassa et Ansedonia) (*fig. 1*).



1. LOCALISATION ET GÉOGRAPHIE DE LA LAGUNE D'ORBETELLO (elaboration M. Le Doaré)

Le fort confinement de la lagune la rend très sensible à la présence de sa ville éponyme en son centre. Les problématiques socio-environnementales du site constituent un modèle réduit de ce qui s'observe ailleurs, dans les grandes cités et leurs estuaires-embouchures.

<sup>1</sup> KJERFVE, MAGILL 1989.

<sup>2</sup> WALKER, MOSSA 1982.

La lagune a pu constituer pendant l'antiquité un excellent abri, ouvrant la voie à son aménagement et à son urbanisation. Ces aménagements ont probablement accéléré son comblement, tandis que le développement industriel a provoqué son eutrophisation spectaculaire au XXe siècle, événement très bien étudié par les écologues. Aujourd'hui, dans le cadre du réchauffement global, cette zone est confrontée aux conséquences de l'impact anthropique dans un contexte climato-environnemental de plus en plus risqué, souvent soumis à des événements soudains, drastiques et impactants tels que la baisse du niveau des eaux, les explosions d'algues, la prolifération des Diptères dans la lagune. Nos recherches visent à remonter le temps pour documenter les crises d'eutrophisation et les rémissions antérieures de la lagune, depuis la fin de la préhistoire jusqu'au Moyen-Âge, avec un focus aux périodes étrusques et romaines. Elles associent une analyse des sources historiques et archéologiques disponibles à une étude des archives sédimentaires et biologiques déposées dans la lagune au cours du temps. Cet article a pour objectif de présenter les différentes approches méthodologiques suivies, de détailler la pluralité des techniques utilisées et enfin le travail pluridisciplinaire depuis la prospection de terrain jusqu'en laboratoire.

## 1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Nos recherches visent à comprendre comment la fondation et le développement d'Orbetello ont affecté l'histoire environnementale de la lagune, et comment les caractéristiques de ces milieux lagunaires ont, en retour, affecté les activités économiques à Orbetello. Elles visent donc à comprendre comment le développement de la ville a été influencé par son propre impact sur la lagune.

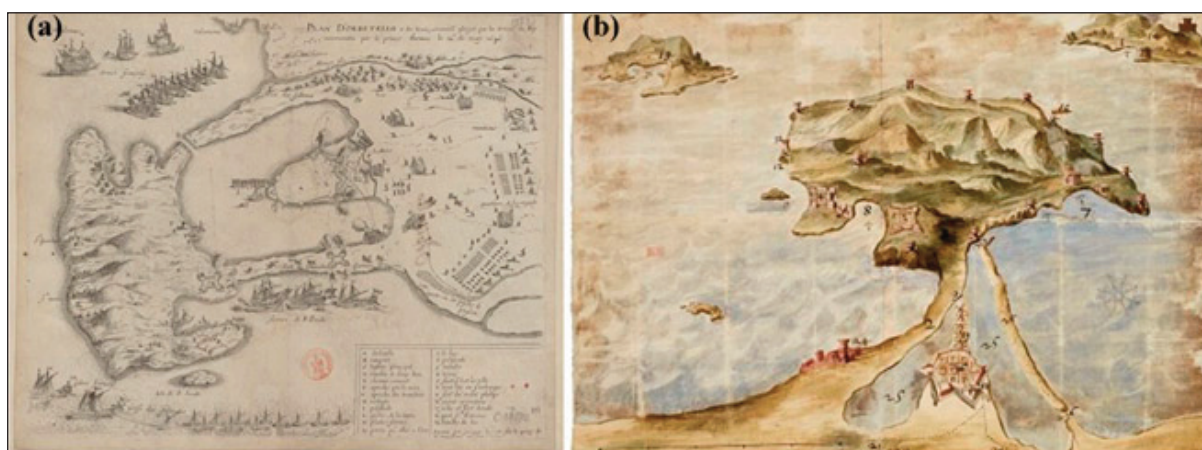
Ces recherches incluent deux volets. Un volet historique, reposant sur l'analyse d'archives iconographiques, textuelles et archéologiques de l'Antiquité à nos jours. Un volet paléoenvironnemental, reposant sur l'analyse des archives sédimentaires, visant à cartographier les dynamiques de la sédimentation, au moyen d'investigations géophysiques (imagerie de l'architecture sédimentaire par profils acoustiques) et l'étude de carottes sédimentaires. Ces dernières permettent la datation des sédiments, l'analyse de leurs composants biologiques pour reconstituer les paléoenvironnements lagunaires (ostracodes, pollen, kystes de dinoflagellés, malacofaune, composition de la matière organique), analyse des contaminants métalliques, mettant en lumière les changements induits par la gestion de la lagune et le développement de la ville.

### *Développement d'Orbetello et de sa lagune*

Avec le ralentissement de la montée du niveau marin après la dernière glaciation, autour de 4500 av. J.-C., deux cordons sableux, les tombolos de la Giannella et de la Feniglia, ont commencé à se développer entre la côte Toscane et l'île du Monte Argentario, la reliant progressivement à la terre. La lagune d'Orbetello se développe alors à l'arrière de ces cordons sableux. Leur croissance et leur engraissement vont progressivement isoler la lagune de la mer. Le comblement de la lagune, au nord, est dû à la progradation vers la mer du delta du fleuve Albegna. Le déversement des eaux de l'Albegna dans la lagune, en dehors des périodes de crues, cesse lorsque le fleuve acquiert une embouchure marine.

Les dynamiques sédimentaires et hydrologiques de la lagune vont interférer, à partir de l'antiquité, avec les projets de développement économique de ce milieu riche en ressources. Il est donc important de contraindre leurs modifications, afin de mieux comprendre la logique qui sous-tend les aménagements anthropiques.

Les plus anciens vestiges archéologiques étrusques documentés sur le tombolo central de la lagune d'Orbetello sont des sépultures datées du VIII<sup>e</sup> siècle av. J.-C.<sup>3</sup> Des sites d'occupation régulière y sont attestés à la fin du VIII<sup>e</sup> siècle av. J.-C., entre le VI<sup>e</sup> et le début Ve siècle av. J.-C. ainsi qu'au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.<sup>4</sup>, ce qui suggère une période d'abandon au Ve siècle av. J.-C.<sup>5</sup> La ville est encerclée par un mur d'enceinte polygonal dont la datation ne fait pas consensus. De nombreux auteurs estiment sa construction dans la seconde moitié du IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.<sup>6</sup>, mais pour d'autres elle serait plus tardive et contemporaine de celui de la ville voisine de Cosa<sup>7</sup>. Cette ville fortifiée est fondée par les Romains en 273 av. J.-C, sur le promontoire d'Ansedonia, au sud de la lagune<sup>8</sup>, où ils développent une économie de pêcheries<sup>9</sup>. Orbetello perd alors progressivement de son importance<sup>10</sup>. En 1414, la ville est prise par la République de Sienne et fortifiée, devenant une place forte d'envergure<sup>11</sup>. Les représentations de la lagune (*fig. 2*) montrent clairement la nouvelle importance de la ville dans la perception du territoire.



2. PERCEPTION GÉOGRAPHIQUE D'ORBETELLO. a) PLAN D'ORBETELLO ET DES SITES ASSIÉGÉS PAR LES ARMÉES DU ROY COMMANDÉES PAR LE PRINCE THOMAS LE 12 MAI 1646 (Gallica, BNF, 1646); b) PLAN DE LA CÔTE DU MONTE ARGENTARIO (Service Hydrographique, BNF)

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, Orbetello devient la capitale de l'un des *Presidios* espagnols, et ses fortifications sont perfectionnées<sup>12</sup>. L'importance stratégique de la ville diminue de nouveau par la suite et son économie se tourne alors successivement vers l'industrie, puis la pisciculture et enfin le tourisme. L'usine de fertilisants d'Orbetello (ex-SITOCO) en activité de 1908 à 1985, a fortement contribué, avec les rejets urbains, à l'eutrophisation de la lagune<sup>13</sup>. La pollution par l'industrie et l'étalement urbain a provoqué des explosions algaires et la contamination des écosystèmes<sup>14</sup>, mettant même en péril les ressources halieutiques naturelles et la pisciculture pratiquée sur le pourtour de la lagune. Enfin, elle a affecté le tourisme et la qualité de vie des habitants.

<sup>3</sup> BROWN 1980.

<sup>4</sup> PERKINS 2010.

<sup>5</sup> NEGRONI CATAACCHIO *et al.* 2017.

<sup>6</sup> BROWN 1980; CARANDINI 1985; McCANN *et al.* 1987; JANNOT 1987; JONCHERAY 2010.

<sup>7</sup> TORELLI 1982; CIAMPOLTRINI 1995; CIAMPOLTRINI 2019; NEGRONI CATAACCHIO *et al.* 2017.

<sup>8</sup> DOLCI 2014.

<sup>9</sup> McCANN 1979.

<sup>10</sup> CARTEI *et al.* 2015; BISCHI 1994.

<sup>11</sup> CARTEI *et al.* 2015.

<sup>12</sup> CARTEI *et al.* 2015.

<sup>13</sup> LENZI, SALVATORI 1989; LENZI *et al.* 2003.

<sup>14</sup> AUSILI *et al.* 2020.

Le marnage à Orbetello est de 30 centimètres<sup>15</sup>, et l'évacuation des pollutions se fait par des canaux artificiels de calibre réduit.

De ce fait, et bien qu'Orbetello soit une ville plus petite que Venise, les effets de contamination et d'eutrophisation y ont été plus spectaculaires, conduisant à la publication de très nombreux travaux<sup>16</sup> sur l'état de la lagune et à la commande d'études destinées à engager son sauvetage. Les aménagements qui ont accompagné la croissance d'Orbetello ont dû avoir des impacts importants à toutes les époques.

Par exemple, l'ouverture d'un canal entre la mer et une lagune modifie radicalement ses caractéristiques hydrologiques<sup>17</sup>, en particulier la salinité des eaux<sup>18</sup>, et donc l'écosystème lagunaire. En plus de canaux artificiels d'accès à la mer, un canal a été creusé pour connecter la lagune au fleuve Albegna plus au nord, modifiant la salinité et les apports terrigènes. Ces impacts n'ont fait l'objet d'aucune étude. La présence d'Orbetello au milieu d'une lagune si fermée est d'ailleurs en soit un paradoxe, et reflète sans doute l'existence de conditions favorables lors de sa fondation qui se sont dégradées depuis.

## 2. MÉTHODOLOGIES DÉVELOPPÉES DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE

L'approche méthodologique est transdisciplinaire. Elle associe des méthodes des sciences humaines, des sciences de l'environnement et des géosciences. L'objectif est de croiser les données, obtenues par différents canaux, afin de retracer l'histoire environnementale de ce milieu côtier précocement anthropisé. L'idée est d'obtenir des données ponctuelles, linéaires et zonales. Les méthodes s'articulent entre elles de manière à documenter le continuum entre la ville, la lagune, les tombolos et la mer. Les transformations dans ce continuum sont documentées par une lecture verticale des archives sédimentaires qui permet de remonter le temps. Les outils et approches mis en œuvre pour y parvenir sont décrits ci-dessous, ainsi que le consortium et les collaborations qui rendent ce projet possible.

### 2.1. Archives textuelles, cartographiques et iconographiques

Afin de documenter au mieux les différentes phases d'occupation sur le pourtour de la lagune, et son influence sur les paléoenvironnements et la paléogéographie de la lagune, les données issues des archives textuelles, iconographiques et cartographiques (atlas, plans, cadastres) des époques médiévale et moderne sont collectées, classées et lorsque cela est possible, géoréférencées. Ce travail est porté, entre autres, par G. Van Heems (UMR HiSoMA, MOM, Université Lyon 2). En particulier, les cartes possédant les qualités de représentation suffisantes sont géoréférencées afin de documenter les usages (pêcheries, canaux...) et la configuration paléogéographique (relief, trait de côte) et urbaine (bassins portuaires, extension/contraction de la ville) de cette zone au cours du temps. Sur les cartes médiévales, les annotations et figurés mettent en valeur, plus que la taille réelle des objets, leur importance vis-à-vis des pratiques ou de la symbolique des lieux (*fig. 2*).

À ce titre, les différences éventuelles entre la configuration urbaine et lagunaire documentée par les archives sédimentaires et celle représentée par l'iconographie et décrite par les textes sont intéressantes. En effet, elle peut révéler des centres d'intérêt, des biais de perception, ou des messages politiques portés par l'iconographie (navigation, administration, stratégie militaire, etc.) et les archives textuelles.

<sup>15</sup> MEEDM 2010.

<sup>16</sup> BUCCI *et al.* 1992; LENZI 1992; LARDICCI *et al.* 1997; CORSI *et al.* 2003; CORSI *et al.* 2005; LENZI *et al.* 2003; FOCARDI *et al.* 2009; LENZI 2014; AUSILI *et al.* 2020.

<sup>17</sup> BIRD 1994.

<sup>18</sup> PÉREZ-RUZAFÀ *et al.* 2019.

## 2.2. Carottages terrestres dans les cordons sableux et dans le delta du fleuve Albegna

Afin de contraindre la chronologie de formation et les rythmes d'engraissement des cordons, des carottages terrestres rotatifs (*fig. 3, A*) et terrestres à percussion (*fig. 3, B*) ont été réalisés dans les tombolos de la Giannella et de la Feniglia. Ils ont été complétés par un carottage dans le delta du fleuve Albegna, afin de dater les phases de progradation de son delta lagunaire en direction de la mer.

Plus d'une trentaine de carottes sédimentaires ont été prélevées dans les cordons de la Giannella et de la Feniglia (équipe J.-Ph. Goiran, G. Brocard et C. Vittori, UMR 5133, Univ. Lyon 2). Deux campagnes ont été menées, en 2020 et 2021, et ont permis de collecter des carottages rotatifs terrestres de 5 à 20 mètres de profondeur (*fig. 4*), réalisés à partir d'un carottier mécanique rotatif, monté sur chenilles, avec chemisage.

Les différentes zones échantillonnées sont : le tombolo de la Giannella (2020), en accord avec la Oasi WWF Laguna di Orbetello, le tombolo de la Feniglia (2021), en accord avec le corps des Carabinieri Forestali qui gère cette réserve côtière, et le delta du fleuve Albegna, en accord avec la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per le province di Siena, Grosseto et Arezzo).

Dans un premier temps, ces archives sédimentaires ont été échantillonnées (80 prélèvements) afin d'obtenir des datations par 3 types de méthodes : 14C, OSL, U-Th (section 2.7.). Dans un deuxième temps des analyses par spectroscopie moyen infrarouge (ou SMIR), destinées à comprendre l'origine et le changement de provenance de ces sédiments ont été lancées (section 2.8.).

## 2.3. Géophysique terrestre dans les tombolos

Du géoradar à 250 MHz et 100 MHz a été réalisé par l'équipe de C. Benech (UMR 5133, CNRS, Univ. Lyon 2) sur le tombolo de la Feniglia (*fig. 3, C*), dans le but de corréliser entre elles les carottes sédimentaires collectées sur ce tombolo sableux. L'objectif est de déterminer l'architecture et la géomorphologie, en profondeur, du cordon et les relations stratigraphiques entre le tombolo et la lagune.

Ces données permettront de mieux comprendre la chronologie de la fermeture de la lagune, qui semble se produire entre la fin de l'âge du bronze et le début de l'époque étrusque<sup>19</sup>.

## 2.4. Géophysique terrestre dans la ville d'Orbetello

Dans le secteur sud de la ville d'Orbetello, du géoradar a été réalisé devant des portes murées, ouvertes dans la muraille et postérieures à sa fondation, qui pourraient avoir été en fonctionnement au cours des occupations étrusques.

Cette prospection terrestre s'est réalisée sur des extensions, composées de gravats déversés dans les eaux adjacentes à la muraille durant la Seconde Guerre mondiale qui ont créé des espaces émergés devant les murs nord et sud<sup>20</sup>.

Cette prospection "hors les murs" est réalisée en collaboration avec l'équipe de Rita Deiana (Université de Padova) qui procède à des prospections ERT (Electrical Resistivity Tomography) / tomographie électrique, près des bastions (*fig. 5*).

---

<sup>19</sup> NEGRONI CATAACCHIO *et al.* 2017.

<sup>20</sup> CARTEI 2015.



A. Carottier terrestre rotatif



B. Carottier terrestre à percussion



C. Géoradar sur le cordon sud



D. Profils acoustiques dans la lagune



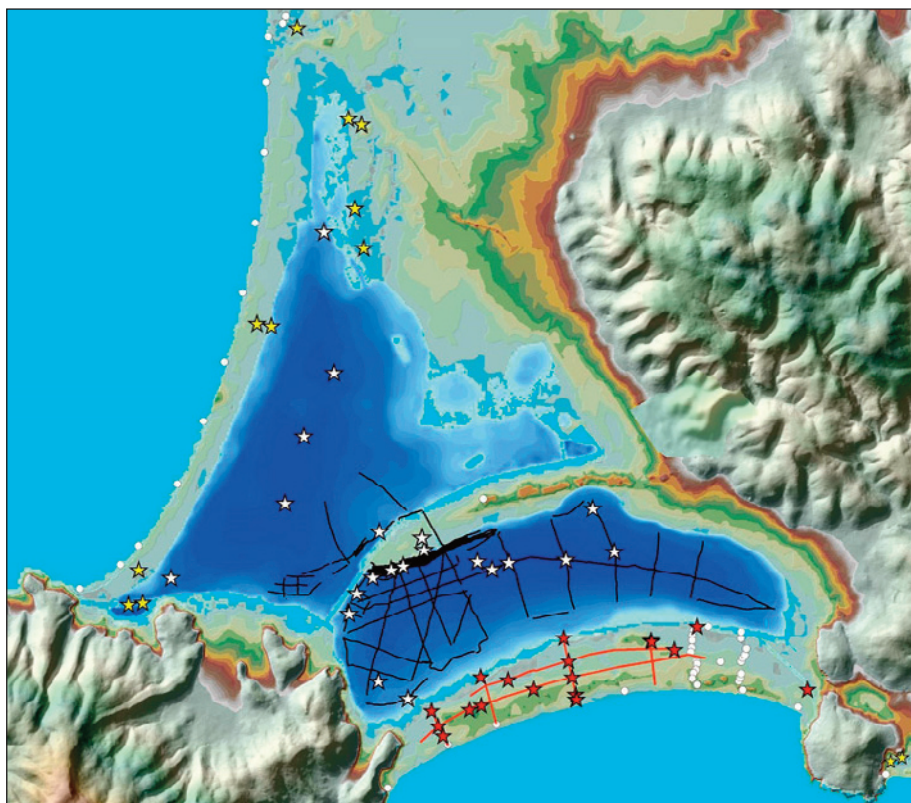
E. Carottier aquatique



F. Échantillonnage d'une carotte

3. PHOTOGRAPHIES DES ACTIVITÉS DE TERRAIN ET DE LABORATOIRE SUR LE TERRAIN. a-c) ACTIVITÉS TERRESTRES AUTOUR DE LA LAGUNE D'ORBETELLO; d-e) ACTIVITÉS AQUATIQUES DANS LA LAGUNE D'ORBETELLO; f) UNIVERSITÉ DE SAVOIE-MONT BLANC, FRANCE (photos G. Brocard et J.-P. Goiran)





4. CAROTTAGES LAGUNAIRES ET PROFILS GÉOPHYSIQUES TERRESTRES RÉALISÉS DANS LA RÉGION D'ORBETELLO (élaboration G. Brocard)

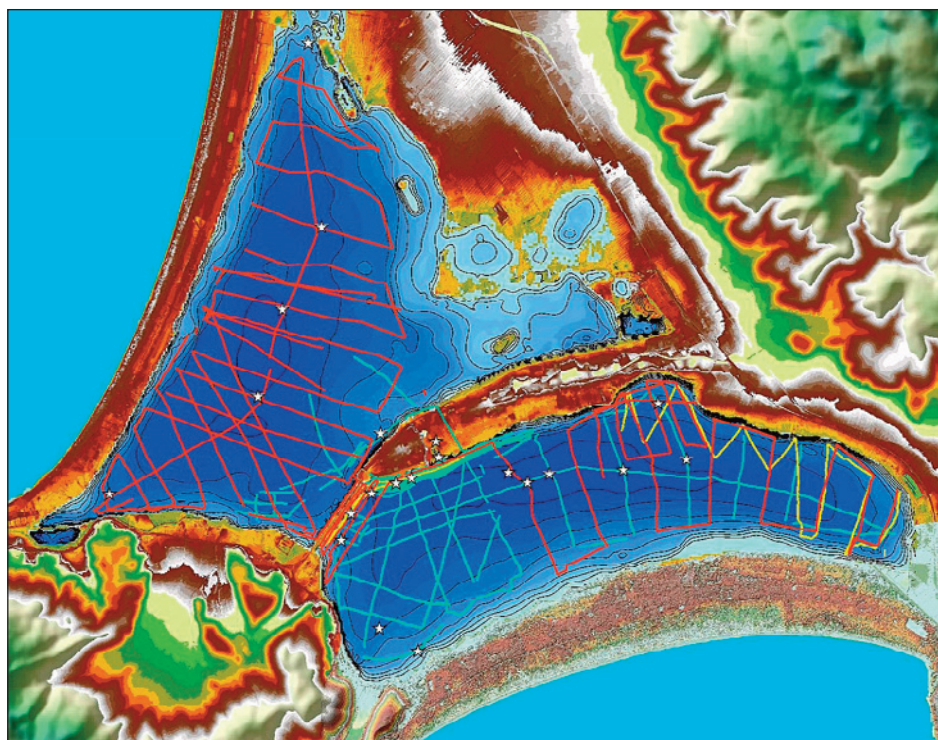


5. PROSPECTION GÉORADAR AU SUD DE LA MURAILLE MÉRIDIONALE D'ORBETELLO (photo G. Brocard)

### 2.5. Architecture de comblement de la lagune: profils acoustiques

Des profils acoustiques ont été acquis en 2021 et 2022 dans les lagunes du *Levante* et du *Ponente*, à l'aide de sondeurs de sédiments de fréquences 3.5 kHz et 10 kHz, dans le cadre d'une convention entre le CNRS (C. Benech, L. Darras) et la société iXblue (Brest, La Ciotat : G. Jouve, L. Mattio) et d'une collaboration avec Éveha International (Q. Vitale) (fig. 3, D). Les profils constituent un maillage dense aux abords de la ville d'Orbetello, dans le but de détecter d'éventuelles structures portuaires étrusques enfouies sous les sédiments, et de repérer les canaux de navigation, maintenant comblés, creusés à travers la lagune au fil des siècles. Un maillage plus lâche, couvrant toute la lagune, permet de comprendre l'histoire de son comblement, depuis la formation des cordons de la Giannella et de la Feniglia. Ce travail est réalisé en collaboration avec M. Leporatti-Persiano, la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio, la Région Toscane, ainsi que la Cooperativa "I Pescatori di Orbetello" et la Società "Canottieri Orbetello".

Les résultats, en cours de traitement, ont permis de corrélérer les couches sédimentaires rencontrées dans les différents carottages, et de mettre en évidence des structures enfouies. Il pourrait s'agir de canaux et d'hypothétiques jetées. Des prospections complémentaires permettront de clarifier la fonction de ces structures et de confirmer ou d'infirmer leur âge, potentiellement étrusque ou romain (fig. 6).



6. CARTE DE LOCALISATION DES LIGNES DE PROSPECTION SISMIQUE LAGUNAIRE (10 KHZ) ET MARINE (3.5 KHZ) (élaboration G. Brocard)

À l'échelle de la lagune, une continuité latérale des couches sédimentaires semble se dessiner, ce qui devrait permettre de corrélérer les stratigraphies des différentes carottes. Ces corrélations stratigraphiques pourront être étayées par un contrôle géochronologique obtenu grâce aux différentes méthodes de datations (section 2.7).

Les résultats d'imagerie révèlent une montée importante du niveau des eaux lagunaires depuis l'époque étrusque.

Elles mettent en évidence l'amplitude de la transgression de la lagune sur la terre ferme, illustrée par l'enneigement de nombreuses pêcheries romaines le long de la façade lagunaire nord du tombolo sud-est<sup>21</sup>. Ces résultats, combinés aux datations des archives sédimentaires, devraient permettre de prédire la position du rivage étrusque autour de la lagune.

## 2.6. Récupération des archives sédimentaires: les carottages aquatiques

À l'automne 2020, une première campagne de carottages aquatiques a été organisée à l'aide d'un carottier gravitaire de type Uwitec (*fig. 3, E*), au cours de laquelle 26 carottes ont été extraites de différentes parties de la lagune (J.-Ph. Goiran, G. Brocard et C. Vittori, UMR 5133, Univ. Lyon 2). La stratégie d'échantillonnage visait à documenter les différentes transitions paléoenvironnementales, dans une perspective à la fois spatiale et temporelle, et à les mettre en lien avec l'intensité des rejets urbains, industriels et miniers. Mais aussi, à mesurer l'impact de l'ouverture et de la fermeture de canaux d'irrigation et de navigation sur la lagune, ainsi que les effets de la construction d'ouvrages militaires et de digues à usage industriel et piscicole. Le second objectif est de reconstituer les modifications de la bathymétrie de la lagune au cours de l'antiquité. Cette donnée est essentielle, car elle est indispensable pour discuter de sa navigabilité aux époques étrusques et romaines.

## 2.7. Datation des sédiments

Pour obtenir une chronostratigraphie solide, plusieurs méthodes de datation ont été croisées: 14C (avec Chr. Oberlin et le laboratoire de datation radiocarbone de Lyon), OSL - optically-stimulated luminescence (avec F. Preuser, Univ. Freiburg), U-Th (avec E. Pons-Branchu, LSCE, Université de Versailles Saint-Quentin), 210Pb-137Cs (avec P. Sabatier, UMR 5204 EDYTEM, Université de Savoie). Le croisement de ces méthodes permet de couvrir un champ temporel très large allant du Pleistocène (OSL, U-Th, 14C), en passant par l'Holocène (14C principalement) et en allant jusqu'à la période récente (avec le Pb sur les sédiments postérieurs à 1850 ap. J.-C. et avec le césium 137 sur les sédiments postérieurs à 1945 ap. J.-C.).

## 2.8. Analyse de la composition minérale et organique par SMIR

La méthode de spectroscopie moyen infrarouge (SMIR) se base sur l'absorption des rayons infrarouges et permet d'identifier les groupes moléculaires présents dans les sédiments<sup>22</sup>. Elle permet de discriminer les contributions distales (ville, pentes cultivées, rivières détournées, entrées marines, dunes côtières) et locales (production biogénique lagunaire) à la sédimentation<sup>23</sup>. Un objectif est par exemple de déterminer le rôle des contributions sédimentaires d'origine marine et fluviale dans le comblement de la lagune au cours du temps. En particulier, elle pourra être utilisée pour caractériser le rôle des canaux creusés entre le fleuve Albegna et la lagune d'Orbetello (canal de Fibbia), et entre la mer et la lagune (canal de Nassa, canal d'Ansedonia). Cette méthode est utilisée en tandem avec les analyses hyperspectrales et les analyses Rock Eval (sections 2.11 et 2.12) pour caractériser les modifications dans la composition de la matière organique au cours du comblement lagunaire.

Cette méthode est également utile pour déterminer la provenance des sables ayant alimenté les cordons de la Giannella et de la Feniglia. Un large référentiel minéralogique, incluant plus

---

<sup>21</sup> CARTEI 2015.

<sup>22</sup> FARMER 1974.

<sup>23</sup> CHAPKANSKI *et al.* 2020.

de 250 échantillons, a été constitué (S. Chapkanski, G. Brocard, C. Vittori et M. Le Doaré) à partir d'échantillons de surface prélevés le long d'une bande côtière de 60 kilomètres de longueur, et en amont, le long des fleuves qui se jettent en mer le long de cette même bande côtière. Ce référentiel permet de tracer la provenance des sédiments qui comblent la lagune d'Orbetello au cours du temps, et de voir ainsi la contribution des apports marins et fluviaux successifs, au gré de l'ouverture et de la fermeture des canaux depuis l'époque étrusque. Une carotte réalisée en accord avec la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio, située dans le delta du fleuve Albegna, a fait l'objet d'un traitement supplémentaire par imagerie hyperspectrale dans le proche infrarouge (K. Jacq, M. Debret, Université de Rouen, section 2.11), dans le but d'affiner la résolution de l'enregistrement minéralogique et ainsi de mieux définir les changements de milieux successifs (mer ouverte, delta lagunaire, delta terrestre) permettant de révéler des transitions brusques dans l'histoire environnementale du delta de l'Albegna<sup>24</sup>.

### 2.9. Core Scanner EDYTEM: stratigraphie XRF et pics métalliques anciens

En 2021, des carottes aquatiques de référence ont été sélectionnées parmi celles prélevées durant la campagne de 2020 dans la lagune d'Orbetello pour être étudiées. L'objectif était de corréler les unités stratigraphiques entre les différentes carottes. Toutes les carottes offshore ont été ouvertes au printemps 2021 au laboratoire EDYTEM, de l'Université de Savoie-Mont Blanc, en collaboration avec l'équipe de P. Sabatier (fig. 3, F). Elles ont été photographiées à haute résolution sur un banc photographique, puis certaines d'entre elles ont été soumises à un core scanner XRF. Ce dernier permet de caractériser les changements de concentration en éléments majeurs et lourds au cours du comblement de lagune et donc du temps. Ces mesures ont révélé des fluctuations d'une rythmicité de 0.5-2 centimètres d'épaisseur, plus fines que la stratification visible à l'œil nu. Les fluctuations de la concentration en éléments majeurs, constitutifs des argiles, de la matière organique, des coquilles et de la concentration en métaux, permettent de déterminer en outre dans quelle fraction du sédiment les métaux produits par l'activité humaine s'accumulent.

### 2.10. Pics de mercure ancien

Plusieurs épisodes d'eutrophisation ont affecté la lagune, provoquant la concentration du mercure. Celui-ci pourrait être présent naturellement dans l'environnement et/ou provenir d'apports anthropiques associés à des activités métallurgiques à Orbetello ou des activités minières dans le bassin versant du fleuve Albegna. En collaboration avec l'équipe de B. Bomou (Faculté des Géosciences de l'Environnement de l'Université de Lausanne - UNIL), des analyses par spectrométrie d'absorption atomique LUMEX ont été entreprises afin de définir si, des indicateurs de l'exploitation de mines au cours de l'antiquité a pu s'enregistrer dans les archives lagunaires.

### 2.11. Imagerie hyperspectrale des pigments

K. Jacq et M. Debret se concentrent sur les modifications de composition pigmentaire résultant des changements de concentration en herbiers, algues et bactéries, qui dépendent du degré de confinement de la lagune. Cela permet une réflexion sur les variations des stocks d'apports d'eau douce et du degré de connexion entre la lagune avec la mer.

---

<sup>24</sup> CHAPKANSKI *et al.* 2022.

### 2.12. Analyse Rock Eval et CHN

Dans des archives lagunaires, l'étude de la matière organique, préservée dans la stratigraphie, permet d'apporter un éclairage majeur sur les environnements actuels et anciens. Le but est de déterminer les changements de composition de la matière organique, traduisant des modifications dans les sources de production (herbiers, algues, bactéries), et son degré de dégradation, en fonction de l'oxygénation du milieu et de l'activité des organismes fongisseurs. L'analyse de la matière organique et de la composition chimique du sédiment sera réalisée par l'équipe de B. Bomou (UNIL). Les rapports entre les éléments C, H, N dans la matière organique du sédiment permettront de déterminer l'évolution, au cours du temps, de la contribution de divers organismes (bactéries, algues, herbiers, faune) au stock organique. Ces organismes sont en effet sensibles à l'évolution du milieu. Les rapports de certains métaux renseigneront par ailleurs sur son oxygénation.

### 2.13. Phosphore

L'équipe de V. Mesnage (M2C Rouen) travaille sur la biodisponibilité du phosphore à l'interface eau-sédiment dans des écosystèmes lagunaires. Cela permettra d'analyser la présence de cycles biogéochimiques à l'interface eau-sédiment et de mieux comprendre les échanges entre des éléments dissous organiques et minéraux dans les sédiments de cette zone lagunaire.

### 2.14. Malacofaune

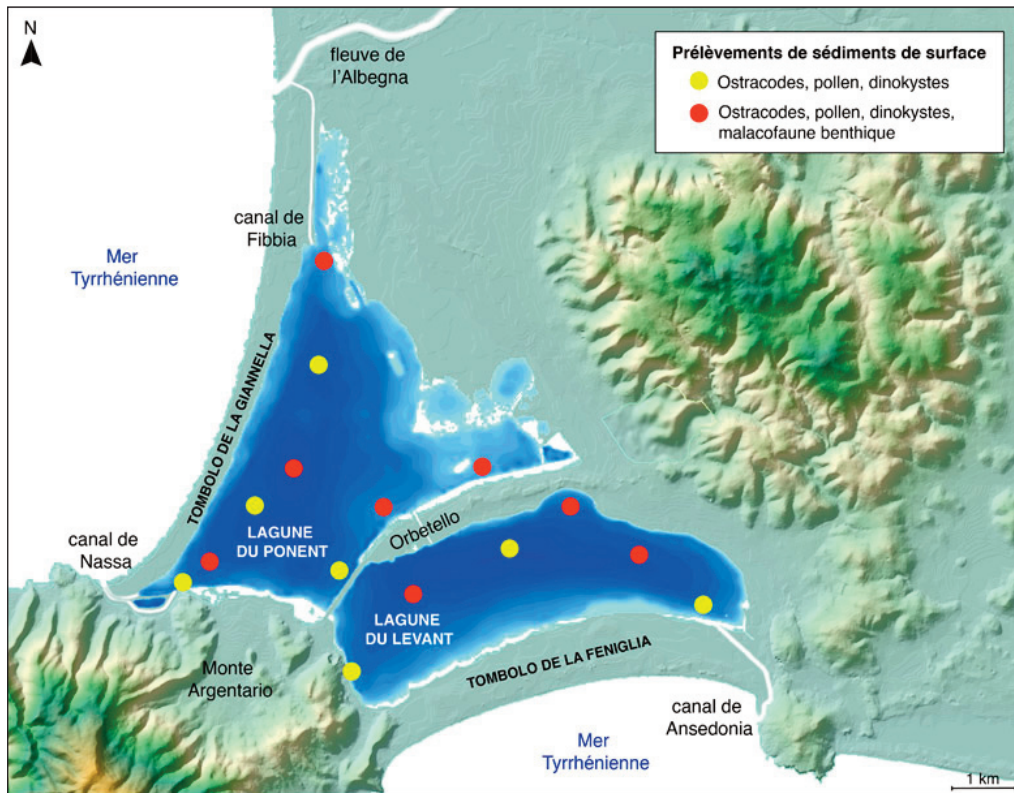
Des échantillons de sédiments superficiels ont été prélevés par C. Gonçalves (Archéorient) dans la lagune d'Orbetello dans certains des secteurs prospectés par des carottages aquatiques (*fig. 7*) afin d'étudier la répartition de la malacofaune benthique (8 échantillons). Ces prélèvements sont répartis uniformément dans la lagune, dont certains sont situés à proximité des canaux, d'émissaires fluviaux intermittents et dans des zones à profondeur variable. Ils permettront de dresser un état des lieux des assemblages actuels et de le comparer aux données publiées avant<sup>25</sup>, pendant<sup>26</sup>, et après<sup>27</sup> la grande crise d'eutrophisation de la fin du XXe siècle afin d'en évaluer l'impact sur la malacofaune benthique. En complément de cette approche, des échantillons seront collectés à une fréquence saisonnière (3 prélèvements à la benne *Van Veen* par station), associés à des mesures des caractéristiques physico-chimiques des eaux (*fig. 8*), qui permettront de mieux comprendre les facteurs contrôlant la répartition des différentes espèces qui colonisent la lagune d'Orbetello.

Une étude comparative du contenu faunistique de ces sédiments de surface et des 10 premiers centimètres des carottes aquatiques permettra de déterminer la pertinence des marqueurs malacologiques pour caractériser la variabilité des paléoenvironnements lagunaires à partir de sédiments provenant de carottes, caractérisées par un faible volume de sédiments et donc une faible densité de spécimens. Cette approche permettra une lecture critique de la donnée malacologique obtenue dans les séquences plus profondes des archives sédimentaires pour lesquelles aucun comparatif n'est possible. Les spécimens rencontrés dans les échantillons issus des carottes sédimentaires tamisés pour l'étude de l'ostracofaune (section 2.15) seront systématiquement déterminés afin d'identifier des modifications dans les assemblages, en particulier pour identifier la présence d'espèce laguno-marines pouvant indiquer une connexion à la mer et de croiser les indicateurs biologiques.

<sup>25</sup> COGNETTI *et al.* 1978.

<sup>26</sup> MORGANA, NAVIGLIO 1989.

<sup>27</sup> ROSSI, LARDICCI 1995.



7. CARTE DE LOCALISATION DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENTS DE SURFACE RÉALISÉS EN JUIN 2022 POUR L'ÉTUDE DES COMPOSANTS BIOLOGIQUES RÉCENTS (MALACOFAUNE BENTHIQUE, OSTRACODES, POLLEN, DINOKYSTES) DANS LA LAGUNE D'ORBETELLO (élaboration G. Brocard)



8. PRÉLÈVEMENT DE LA MALACOFAUNE BENTHIQUE ACTUELLE À L'AIDE D'UNE BENNE VAN VEEN ET D'UN TAMIS (1 MM) DANS LA LAGUNE D'ORBETELLO (cliché A. Bertini)

### 2.15. *Ostracodes*

Les ostracodes sont des crustacés millimétriques sensibles à de nombreux facteurs physiques et chimiques, tels que la salinité, la température, le pH, les concentrations en oxygène dissous, la profondeur, le substrat, les vitesses d'écoulement des eaux et les ressources trophiques<sup>28</sup>. Parmi ces facteurs, la salinité occupe une place privilégiée, car elle a une influence majeure sur la distribution des ostracodes<sup>29</sup>.

Ces crustacés sont enfermés dans une coquille bivalve, généralement fortement calcifiée, qui se préserve bien dans les sédiments après la mort de l'animal<sup>30</sup>. C'est pourquoi, ils sont utiles pour fournir un contexte environnemental aux découvertes archéologiques<sup>31</sup>, en particulier dans les environnements marins marginaux<sup>32</sup> tels que les lagunes. Ils sont également utilisés comme indicateurs de la pollution dans ces milieux<sup>33</sup>, où ils ont montré une forte sensibilité aux contaminations d'huiles et de métaux lourds.

Pour l'étude de la lagune d'Orbetello, une échelle de confinement biologique, basée sur les assemblages fossiles d'ostracodes, sera utilisée afin de quantifier les modifications du degré de connexion avec la mer au cours du temps<sup>34</sup>.

Cette échelle est composée de 4 stades, traduisant différents types d'environnements lagunaires, à savoir : (i) le LBCS-1, qui correspond soit à des conditions euhalines relativement stables, soit à une récurrence d'épisodes ponctuels euhalins ; (ii) le LBCS-2, qui correspond à un environnement saumâtre avec des variations de salinité inter- et intra-annuelles relativement modérées ; (iii) le LBCS-3, qui correspond à un environnement euryhalin soumis à de fortes variations de salinité inter- et intra-annuelles ; (iv) le LBCS-4, qui correspond à des conditions limniques à oligohalines.

Cet outil, appliqué sur plusieurs carottes sédimentaires de référence réparties dans la lagune d'Orbetello (*fig. 9*), sera utilisé pour identifier et comparer les changements de paléoenvironnements lagunaires dans l'espace et dans le temps. Efficace pour standardiser les données ostracodologiques, elle permet de comparer rapidement les différentes carottes sédimentaires et de reconstituer la trajectoire temporelle de ces milieux dynamiques<sup>35</sup>.

Pour mettre en évidence des synchronicités entre les principales transitions dans cette trajectoire temporelle, et les chronologies historiques, archéologiques et géomorphologiques, un modèle âge paléoenvironnemental<sup>36</sup> sera combiné avec les données l'échelle de confinement biologique<sup>37</sup>.

Une première série de 160 échantillons est en cours d'analyse. Ils sont répartis sur 4 carottes sédimentaires situées dans les zones profondes des lagunes du Ponente (OLP-11) et du Levante (OLL-11) et à proximité des canaux de Fibbia (OLP-14) et Nassa (OLP-15) (*fig. 9*). Cette étude préliminaire a pour but de documenter les principales transitions dans l'histoire environnementale des deux bassins lagunaires au cours du temps et de caractériser l'impact local et global de la fermeture/ouverture des canaux sur les écosystèmes lagunaires.

Elle sera complétée, dans un second temps, par l'analyse d'autres carottes sédimentaires pour déterminer la variabilité spatiale des taphonécoses d'ostracodes au sein d'unités stratigraphiques continues d'après les profils acoustiques.

---

<sup>28</sup> ATHERSUCH *et al.* 1989; FRENZEL, BOOMER 2005.

<sup>29</sup> ATHERSUCH *et al.* 1989; BOOMER *et al.* 2003.

<sup>30</sup> ATHERSUCH *et al.* 1989; HORNE *et al.* 2002; RODRIGUEZ-LAZARO, RUIZ-MUNOZ 2012.

<sup>31</sup> BOOMER *et al.* 2003; RODRIGUEZ-LAZARO, RUIZ-MUNOZ 2012; MAZZINI *et al.* 2015.

<sup>32</sup> BOOMER, EISENHAEUER 2002.

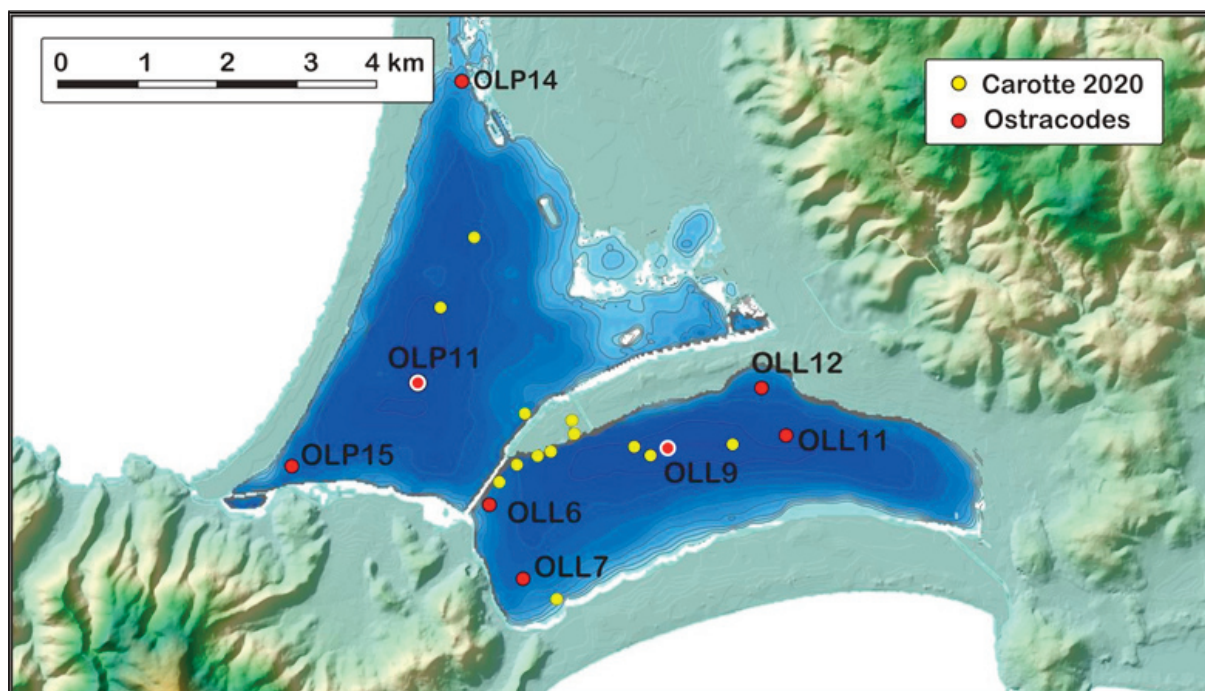
<sup>33</sup> RUIZ *et al.* 2005.

<sup>34</sup> VITTORI *et al.* c.s.

<sup>35</sup> VITTORI *et al.* c.s.

<sup>36</sup> SALOMON *et al.* 2016.

<sup>37</sup> VITTORI *et al.* c.s.



9. CARTE DE LOCALISATION DES CAROTTES SÉDIMENTAIRES AQUATIQUES ANALYSÉES DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE DES TAPHOCÉNOSE D'OSTRACODES (POINTS ROUGES) DANS LA LAGUNE D'ORBETELLO (élaboration G. Brocard)

Un modèle de cette variabilité spatiale sera documenté par l'étude des assemblages d'ostracodes issus de sédiments lagunaires superficiels (15 échantillons) collectés en différents points de la lagune actuelle par C. Vittori (Archéorient), en fonction de la proximité des canaux, de résurgence d'eau douce ou encore de la bathymétrie (fig. 7). La variabilité intra-annuelle de l'ostracofaune vivante sera également étudiée par l'intermédiaire de prélèvement saisonnier sur ces différentes stations de prélèvement, associés à des mesures des caractéristiques physico-chimiques des eaux lagunaires (fig. 10). La collecte des données provenant de la station météorologique WWF couplé au prélèvement hebdomadaire d'ostracodes, de pollen et de kystes de dinoflagellés (section 2.16) sur deux stations fixes mesurant la qualité de l'eau (lagune du Levante et du Ponente) viendront étayer les données sur l'environnement actuel.

L'étude des populations d'ostracodes récentes (benne *Van Veen* et filet) et fossiles (carottages gravitaires) devrait également permettre d'appréhender l'impact des activités anthropiques (modification des passes, dragages et rejets urbains, industriels et agricoles, etc.) sur les environnements lagunaires depuis l'antiquité jusqu'à nos jours.

### 2.16. *Palynomorphes et palynofaciès*

L'outil palynologique (pollen, palynomorphes non polliniques, kystes de dinoflagellés, palynofaciès) est appliqué à très haute résolution dans le but de définir le cadre floristique, végétal et climatique ainsi que l'histoire du milieu aquatique (par exemple croissance/régression des milieux humides, développement d'algues, etc.) de la lagune d'Orbetello durant l'Holocène supérieur.

109 échantillons des sédiments des carottes ainsi que 15 échantillons de surface (fig. 7) prélevés dans la lagune d'Orbetello par A. Bertini et M. Pili sont en cours de préparation physico-chimique et d'analyse au microscope optique auprès du laboratoire de Palynologie du Dipartimento di Scienze della Terra (Université de Florence) dans le cadre d'un Doctorat en cotutelle (Florence-Lyon).





10. MESURES DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX LAGUNAIRES DE LA LAGUNE D'ORBETELLO À L'AIDE D'UNE SONDE MULTIPARAMÈTRES (photo A. Bertini)

Cette approche vise, en particulier, à : i. Reconstituer les principales variations floristiques-végétales des 4000 dernières années sous l'effet du changement climatique et de l'impact anthropique croissant ainsi qu'interpréter les changements de végétation en fonction des phénomènes climatiques (par exemple, NAO). ii. Identifier les principaux événements climatiques infra-millénaires, utiles aussi à définir un cadre chronostratigraphique des successions sédimentaires analysées. iii. Reconstituer la structure morphosédimentaire et comprendre les changements du niveau de la mer, en considérant également l'influence de l'impact anthropique. iiiii. Intégrer les données polliniques à celles relatives aux kystes des dinoflagellés (dinokystes), qui témoignent de l'état de la colonne d'eau, de l'arrivée des apports continentaux ainsi que des liaisons plus sporadiques avec la mer.

De plus, l'application des quantifications climatiques, à partir de la base de données polliniques, permettra la reconstitution des valeurs de température, précipitations et humidité et donc de reconstruire la réponse des systèmes morphoclimatiques, compte tenu du changement climatique actuel et de l'impact anthropique. Sur la base de l'expérience acquise dans l'étude palynologique de la lagune voisine de Burano<sup>38</sup>, des études sur les mousses et les pluies polliniques actuelles (pièges à pollen) sont en cours de planification. La pluie pollinique émise par la végétation actuelle est un outil de suivi pour l'étude des changements de la végétation, des agro-systèmes, de la biodiversité en réponse au changement climatique actuel, notamment à l'augmentation de la sécheresse dans la région méditerranéenne. L'intégration de cette étude avec celle réalisée sur les sédiments pourra fournir des renseignements indispensables pour planifier les actions futures de lutte contre les effets du changement climatique à partir d'une expérience, à l'échelle régionale, dans une zone humide protégée de la Méditerranée centrale.

<sup>38</sup> D'OREFICE *et al.* 2020.

## 3. PREMIÈRES CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'approche transdisciplinaire, associée à une méthodologie pluri-proxies, mise en œuvre pour l'étude du site d'Orbetello, va permettre de mieux comprendre l'histoire d'une ville en relation étroite avec sa lagune et ses tombolos, ainsi que sa relation à la mer Méditerranée. Elle permettra de réaliser un continuum entre terre-ville lagune-tombolo-mer avec une perspective historique allant du Pléistocène jusqu'à nos jours. L'obtention d'une chronostratigraphie solide et inédite dans cet espace littoral est la clé de voûte de ce programme.

Une haute résolution chronostratigraphique est un prérequis indispensable à la bonne compréhension des impacts des sociétés, notamment étrusque, sur leur environnement. Ce programme met en synergie des institutions de recherche italienne, française, allemande et suisse, ainsi que des Associations Internationales de protection de l'environnement et des acteurs locaux et régionaux. Ainsi, le WWF *Italia* travaille activement à la sensibilisation du public aux problématiques environnementales.

Ce partenariat est donc l'opportunité de participer à cette démarche en fournissant des éléments de compréhension de l'évolution du territoire et les possibilités de gestion future, dans le cadre d'une diminution actuelle des pollutions terrestres, mais aussi d'une augmentation du niveau de la mer, des contaminations marines, et d'un effondrement potentiel de la biodiversité.

Ces questions de niveau marin seront, entre autres, abordées dans le cadre de la prochaine campagne de prospection, qui se réalisera en mer, en partenariat avec la Flotte Océanographique Française.

Les résultats des analyses multidisciplinaires feront l'objet de plusieurs publications et communications dans des congrès internationaux, notamment celui de INQUA2023 à Rome.

\* UMR 5133 Archéorient, Université Lyon 2, CNRS, Maison de l'Orient et de la Méditerranée

[jean-philippe.goiran@mom.fr](mailto:jean-philippe.goiran@mom.fr)

[cecile.vittori@gmail.com](mailto:cecile.vittori@gmail.com)

[camille.goncalves@yahoo.com](mailto:camille.goncalves@yahoo.com)

[christophe.benech@mom.fr](mailto:christophe.benech@mom.fr)

[lionel.darras@mom.fr](mailto:lionel.darras@mom.fr)

\*\* Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Firenze

[adele.bertini@unifi.it](mailto:adele.bertini@unifi.it)

[matteopili96@gmail.com](mailto:matteopili96@gmail.com)

\*\*\* Regione Toscana, Italia

[marco.leporatti.persiano@gmail.com](mailto:marco.leporatti.persiano@gmail.com)

\*\*\*\* UMR 5189 HiSoMA, Université Lyon 2, CNRS, Maison de l'Orient et de la Méditerranée

[gillesbrocardfr@gmail.com](mailto:gillesbrocardfr@gmail.com)

\*\*\*\*\* Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de Géographie Physique (LGP), UMR 8591, CNRS, 2

[stoil.chapkanski@lgp.cnrs.fr](mailto:stoil.chapkanski@lgp.cnrs.fr)

\*\*\*\*\* Éveha International  
[quentin.vitale@mom.fr](mailto:quentin.vitale@mom.fr)

\*\*\*\*\* Unigeo  
[dottavio@geoambiente.it](mailto:dottavio@geoambiente.it)

\*\*\*\*\* Oasi WWF Maremma, Fondazione WWF Italia  
[f.cianchi@wwf.it](mailto:f.cianchi@wwf.it)

## Bibliografia

- ATHERSUCH *et al.* 1989: J. ATHERSUCH, D.J. HORNE, J.E. WHITTAKER, *Marine and brackish water ostracods (superfamilies Cypridacea and Cytheracea): keys and notes for the identification of the species*, vol. 43, Leiden-New York.
- AUSILI *et al.* 2020: A. AUSILI, L. BERGAMIN, E. ROMANO, “Environmental Status of Italian Coastal Marine Areas Affected by Long History of Contamination”, in *Frontiers in Environmental Science* 8 (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00034/full>; ultimo accesso 15.05.2023).
- BIRD 1994: E. C. F. BIRD, “Physical setting and geomorphology of coastal lagoons”, in *Elsevier Oceanography Series* 60, pp. 9-39.
- BISCHI 1994: G. BISCHI, *Orbetello: le origini, le mura, i nomi*, Caletta, Grosseto.
- BOOMER, EISENHAEUER 2002: I. BOOMER, G. EISENHAEUER, “Ostracod faunas as palaeoenvironmental indicators in marginal marine environments”, in *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series* 131, pp. 135-149.
- BOOMER *et al.* 2003: I. BOOMER, D. J. HORNE, I. J. SLIPPER, “The Use of Ostracods in Palaeoenvironmental Studies, or What can you do with an Ostracod Shell?”, in *The Paleontological Society Papers* 9, pp. 153-180.
- BROWN 1980: F.E. BROWN, *Cosa: the making of a Roman town*, Ann Arbor.
- BUCCI *et al.* 1992: M. BUCCI, E. GHIARA, V. GORELLI, R. GRAGNANI, G. IZZO, J.G. MORGANA, L. NAVIGLIO, R. UCCELLI, “Ecological conditions in the Orbetello Lagoon and suggested actions for its restoration”, in R.A. VOLLENWEIDER, R. MARCHETTI, R. VIVIANI (a cura di), *Marine Coastal Eutrophication* (Proceedings of an International Conference; Bologna 1990), pp. 1179-1188.
- CARANDINI 1985: A. CARANDINI, *La romanizzazione dell’Etruria: il territorio di Vulci* (Catalogo della Mostra di Orbetello, 1985), Milano.
- CARTEI *et al.* 2015: A. CARTEI, M.G. BEVILACQUA, C. CALVANI, R. PIERINI, D. TADDEI, “Orbetello, a fortress on the water. A research for the valorization of the city and its bastioned front”, in G. VERDANI (a cura di), *Defensive architecture of the mediterranean: XV to XVIII centuries*, Firenze, pp. 49-56.
- CHAPKANSKI *et al.* 2020: S. CHAPKANSKI, D. ERTLEN, C. RAMBEAU, L. SCHMITT, “Provenance discrimination of fine sediments by mid-infrared spectroscopy: Calibration and application to fluvial palaeo-environmental reconstruction”, in *Sedimentology* 67 (2), pp. 1114-1134.
- CHAPKANSKI *et al.* 2022: S. CHAPKANSKI, K. JACQ, G. BROCARD, C. VITTORI, M. DEBRET, A. DE GIORGI, D. D’OTTAVIO, E. GIUFFRÉ, J.P. GOIRAN, “Calibration of Short-Wave InfraRed (SWIR) hyperspectral imaging using Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform spectroscopy (DRIFTS) to obtain continuous logging of mineral abundances along sediment cores”, in *Sedimentary Geology* 428, p. 106062.
- CIAMPOLTRINI 1995: G. CIAMPOLTRINI, “Un *pocolom* e le mura di Orbetello”, in *ArchCI* XCVII, pp. 289-302.
- CIAMPOLTRINI 2019: G. CIAMPOLTRINI, “Archeologia urbana a Orbetello”, in M. CARDOSA (a cura di), *Le antiche mura “etrusche” di Orbetello* (Atti della Tavola Rotonda; Orbetello 2017), Arcidosso, pp. 97-111.
- COGNETTI *et al.* 1978: G. COGNETTI, C. M. DE ANGELIS, E. ORLANDO, A. M. BONVICINI PAGLIAI, A.M. COGNETTI VARRIALE, R. CREMA, M. MARI, M. MAURI, P. TONGIORGI, V. R. ZUNARELLI, “Risanamento e protezione dell’ambiente idrobiologico delle lagune di Orbetello. I”, in *Situazione ecologica e ittiocoltura. Ingegneria ambientale, Inquinamento e Depurazione* 7 (4), pp. 343-406.
- CORSI *et al.* 2003: I. CORSI, M. MARIOTTINI, C. SENSINI, L. LANCINI, L., S. FOCARDI, “Cytochrome P450, acetylcholinesterase and gonadal histology for evaluating contaminant exposure levels in fishes from a highly eutrophic brackish ecosystem: the Orbetello Lagoon, Italy”, in *Marine Pollution Bulletin* 46 (2), pp. 203-212.
- CORSI *et al.* 2005: I. CORSI, M. MARIOTTINI, A. BADESSO, T. CARUSO, N. BORGHESI, S. BONACCI, A. IACocca, S. FOCARDI, “Contamination and sub-lethal toxicological effects of persistent organic pollutants in the European eel (*Anguilla anguilla*) in the Orbetello lagoon (Tuscany, Italy)”, in *Hydrobiologia* 550 (1), pp. 237-249.
- DOLCI 2014: M. DOLCI, “Paesaggi d’Acque. Survey della laguna di Orbetello e del Monte Argentario”, in *LANX* 17, pp. 24-31.
- D’OREFICE *et al.* 2020: M. D’OREFICE, P. BELLOTTI, A. BERTINI, G. CALDERONI, P. CENSI, L. DI BELLA, D. FIORENZA,

L.M. FORESI, M.A. LOUVARI, L. RAINONE, C. VITTORI, J. P. GOIRAN, L. SCHMITT, P. CARBONEL, F. PREUSSER, F. OBERLIN, F. SANGIORGI, L. DAVOLI, "Holocene evolution of the Burano paleo-lagoon (Southern Tuscany, Italy)", in *Water* 12 (4), p. 1007.

FARMER 1974: V. C. FARMER, *Infrared spectra of minerals*, London.

FOCARDI *et al.* 2009: S. FOCARDI, M. MARIOTTINI, M. RENZI, G. PERRA, S. FOCARDI, "Anthropogenic impacts on the Orbetello lagoon ecosystem", in *Toxicology and Industrial Health* 25 (4-5), pp. 365-371.

FRENZEL, BOOMER 2005: P. FRENZEL, I. BOOMER, "The use of ostracods from marginal marine, brackish waters as bioindicators of modern and Quaternary environmental change", in *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 225 (1-4), pp. 68-92.

HORNE *et al.* 2002: D.J. HORNE, A. COHEN, K. MARTENS, "Taxonomy, morphology and biology of Quaternary and living Ostracoda", in *The Ostracoda: applications in Quaternary research* 131, pp. 5-36.

JANNOT 1987: J. R. JANNOT, *À la rencontre des Étrusques* (Collection De Mémoire D'homme: l'Histoire), Rennes.

JONCHERAY 2010: C. JONCHERAY, *Les cités étrusques et le monde grec à la période classique* (unpublished thesis), Università di Bologna, Université de Paris Ouest-Nanterre-La Défense.

KJERFVE, MAGILL 1989: B. KJERFVE, K. E. MAGILL, "Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons", in *Marine geology* 88 (3-4), pp. 187-199.

LARDICCI *et al.* 1997: C. LARDICCI, F. ROSSI, A. CASTELLI, "Analysis of macrozoobenthic community structure after severe dystrophic crises in a Mediterranean coastal lagoon", in *Marine Pollution Bulletin* 34 (7), pp. 536-547.

LENZI, SALVATORI 1989: M. LENZI, R. SALVATORI, "Eutrofizzazione, distrofie e produzione ittica nella Laguna di Orbetello", in *Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Grosseto* 9-10, pp. 45-55.

LENZI 1992: M. LENZI, "Experiences for the management of Orbetello Lagoon: eutrophication and fishing", in *The Science of the Total Environment* (suppl.), pp. 1189-1198.

LENZI *et al.* 2003: M. LENZI, R. PALMIERI, S. PORRELLO, "Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon (Tyrrhenian Sea, Italy): water quality management", in *Marine Pollution Bulletin* 46, pp. 1540-1548.

LENZI 2014: M. LENZI, "What can be done about massive macroalgal blooms" in *J. Aquacult. Res. Dev* 5 (8) ([doi:10.4172/2155-9546.1000292](https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000292)).

MAZZINI *et al.* 2015: I. MAZZINI, J. P. GOIRAN, P. CARBONEL, "Ostracodological studies in archaeological settings: a review", in *JASc* 54, pp. 325-328.

MCCANN 1979: A.M. MCCANN, "The harbor and fishery remains at Cosa, Italy", in *JFieldA* 6 (4), pp. 391-411.

MCCANN *et al.* 1987: A.M. MCCANN, *The Roman Port and Fishery of Cosa. A Center of Ancient Trade*, Princeton.

MEEDM 2010: MEEDM (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer), *La gestion du trait de côte*, Versailles.

MORGANA, NAVIGLIO 1989: J.G. MORGANA, L. NAVIGLIO, "Risanamento ambientale della laguna di Orbetello: Indagine sulla struttura delle comunità macrobentoniche animali", in *Risanamento ambientale della laguna di Orbetello*, pp. 141-165.

NEGRONI CATACCIO *et al.* 2017: N. NEGRONI CATACCIO, M. CARDOSA, A. DOLFINI, *Paesaggi d'acque : la Laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana*, Milano.

PÉREZ-RUZAFÁ *et al.* 2019: A. PÉREZ-RUZAFÁ, I. M. PÉREZ-RUZAFÁ, A. NEWTON, C. MARCOS, "Coastal Lagoons: Environmental Variability, Ecosystem Complexity, and Goods and Services Uniformity", in *Coasts and Estuaries* 4, pp. 253-276.

PERKINS 2010: P. PERKINS, "The cultural and political landscape of the ager Caletanus, North-West of Vulci", in P. PERKINS (a cura di), *L'Étrurie et l'Ombrie avant Rome. Cité et territoire*, (Actes du Colloque international; Louvain-la-Neuve 2004) (L'Antiquité Classique, 80), Bruxelles, pp. 103-121.

RODRIGUEZ-LAZARO, RUIZ-MUÑOZ 2012: J. RODRIGUEZ-LAZARO, F. RUIZ-MUÑOZ, "A general introduction to ostracods: morphology, distribution, fossil record and applications", in *Developments in Quaternary Sciences* 17, pp. 1-14.

ROSSI, LARDICCI 1995: F. ROSSI, C. LARDICCI, “Evoluzione della comunità zoobentoniche di fondo molle della laguna di Orbetello: variazioni nella composizione specifica”, in *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie*, serie B 102, pp. 31-36.

RUIZ *et al.* 2005: F. RUIZ, M. ABAD, A. BODERGAT, P. CARBONEL, J. RODRÍGUEZ-LÁZARO, M. YASUHARA, “Marine and brackish-water ostracods as sentinels of anthropogenic impacts”, in *Earth-Science Reviews* 72 (1-2), pp. 89-111.

SALOMON *et al.* 2016: F. SALOMON, S. KEAY, N. CARAYON, J.P. GOIRAN, “The development and characteristics of ancient harbours - applying the PADM chart to the case studies of Ostia and Portus”, in *PLoS One* 11 (9) (<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0162587>; ultimo accesso 15.05.2023).

TORELLI 1982: M. TORELLI, *Etruria* (Guide archeologiche), Bari.

VITTORI *et al.* c.s.: C. VITTORI, S. CHAPKANSKI, F. SALOMON, P. CARBONEL, I. MAZZINI, J. P. GOIRAN, S. PANNUZI, M. D’OREFICE, P. BELLOTTI, D. FIORENZA, D. ERTLEN, L. SCHMITT, *Lagoon Biological Confinement Stage (LBCS) and Mid-infrared Spectroscopy (MiRS), tools for study Mediterranean coastal lagoons temporal trajectories*, in corso di stampa.

WALKER, MOSSA 1982: H.J. WALKER, J. MOSSA, “Effects of artificial structures on coastal lagoon processes and forms”, in *Oceanologica Acta* 5, pp. 191-198.