

Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes
Laboratoire Environnement Ressource Provence Azur Corse

Nathalie Malet, Christiane Dufresne, Romain Pete, Coralie Connes, Sylvain Coudray, Annie Fiandrino

Janvier 2021 / [Gennaio 2021](#)

Documento completo dei prodotti finali T2.7.9 et T2.7.10
[Document intégral des produits finaux T2.7.9 et T2.7.10](#)



**Fonctionnement
hydrodynamique et
écosystémique de la lagune de
Biguglia.**

Indicateurs et scénarios hydro-
climatiques et écologiques

**Funzionamento idrodinamico ed
ecosistemico della laguna di
Biguglia.**

Indicatori e scenari
idroclimatici ed ecologici

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA



retralags

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée



Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME
Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



retralags



Comune di
Alghero



Comune
di Massarosa



Comune
di Orbetello



SOMMAIRE

INTRODUCTION, MOTIVATIONS ET DESCRIPTION DES ACTIONS	5
SITE D'ETUDE : la lagune de Biguglia	9
ACTION 1. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA	11
Indicateurs et scénarios hydro-climatiques	
1. Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique	11
<i>Pluviométrie</i>	
<i>Salinité</i>	
<i>Impact de l'état des embouchures sur l'hydrologie</i>	
2. Indicateurs et scénarios hydro-climatiques	14
<i>Scénarios hydrologiques</i>	
<i>Indicateurs hydrodynamiques</i>	
3. Description des scénarios et des fiches techniques	17
<i>Les scénarios</i>	
<i>Les fiches techniques</i>	
ACTION 2. FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA	23
Indicateurs et scénarios hydro-climatiques et écologiques	
1. Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia	23
2. Scénarios écologiques et fiches techniques	25
<i>Les scénarios écologiques</i>	
<i>Les fiches techniques</i>	
ANNEXES	28

Afin de ne pas alourdir le document, les références bibliographiques sont disponibles dans les rapports 1 à 5.

INDICE

INTRODUZIONE, MOTIVAZIONI E DESCRIZIONE DELLE AZIONI	7
SITO IN ESAME: la laguna di Biguglia	10
AZIONE 1. FUNZIONAMENTO IDRODINAMICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA	13
Indicatori e scenari idroclimatici	
1. Funzionamento idrologico e idrodinamico	13
<i>Pluviometria</i>	
<i>Salinità</i>	
<i>Impatto dello stato delle foci sull'idrologia</i>	
2. Indicatori e scenari idroclimatici	16
<i>Scenari idrologici</i>	
<i>Indicatori idrodinamici</i>	
3. Descrizione degli scenari e delle schede tecniche	19
<i>Gli scenari</i>	
<i>Le schede tecniche</i>	
AZIONE 2. FUNZIONAMENTO ECOLOGICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA	24
Indicatori e scenari idroclimatici ed ecologici	
1. Funzionamento ecosistemico della laguna di Biguglia	24
2. Scenari ecologici e scheda tecniche	27
<i>Gli scenari ecologici</i>	
<i>Le schede tecniche</i>	
ANNESI	29

Per non appesantire il documento, i riferimenti bibliografici sono disponibili nei rapporti da 1 a 5.

INTRODUCTION, MOTIVATIONS ET RESUME DES ACTIONS

Le projet *Interreg Retralags* qui vise une gestion durable du patrimoine des lagunes, des lacs et des étangs est développé afin de protéger et de valoriser le patrimoine écosystémique. Cette gestion intégrée s'appuie notamment sur des modèles de gestion des zones humides, qui permettent d'une part d'améliorer notre compréhension de leur fonctionnement et d'autre part, de tester des hypothèses par la simulation de scénarios.

L'objectif du projet est d'élaborer des outils d'aide à la gestion des milieux lagunaires (site pilote en Corse, la lagune de Biguglia). L'**action 1** visait à la mise en place d'un modèle hydrodynamique « petit fond » et des indicateurs de fonctionnement hydrodynamique afin de tester et comparer différents scénarios hydro-climatiques. L'**action 2** s'intéresse aux apports et transferts de l'azote et du phosphore dans les différents compartiments biologiques du système lagunaire. Il s'agit de réaliser des bilans de matière à l'aide d'un modèle écosystémique flux/stock GAMELag sur la lagune de Biguglia, et de tester la réponse de la lagune face à différents scénarios hydro-climatiques et écologiques.

J'ai choisi de travailler avec une approche par scénarios et de formaliser les résultats sous forme de fiches techniques afin de se soustraire totalement des modèles mathématiques et ainsi de montrer aux gestionnaires de façon lisible et immédiate la réponse de l'écosystème lagunaire.

Les deux actions pilotes IFREMER sont :

Action 1 - La mise en place du modèle hydrodynamique de la lagune de Biguglia, le développement d'indicateurs hydrologiques opérationnels et test de scénarios hydro-climatiques

Le travail sur cette action a été décomposé en 3 parties. La première partie ¹ ne sera pas détaillée dans ce document. Cette partie rend compte de la mise en place d'un modèle numérique tridimensionnel de la lagune de Biguglia, d'une brève description du site d'étude, du modèle déployé, et des forçages et étapes de calibration et de validation. Le modèle mis en place représente assez fidèlement les variables hydrologiques, bien que la salinité modélisée soit surestimée les mois d'été. Les résultats du modèle concernant les volumes d'eau échangés avec la mer sont du même ordre de grandeur que ceux observés lors des campagnes de mesures.

La seconde partie ² rend compte de l'étude du fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de l'étang de Biguglia et permet de décrire brièvement le site d'étude, les données utilisées et la stratégie de modélisation ainsi que le contexte hydroclimatique, hydrologique et hydrodynamique de la lagune. Différents indicateurs hydrodynamiques sont calculés afin d'expliquer la dynamique de ce système lagunaire. Le modèle mis en place représente assez fidèlement les variables hydrologiques, bien que la salinité modélisée soit surestimée les mois d'été. Les résultats du modèle concernant les volumes d'eau échangés avec la mer sont du même ordre de grandeur que ceux observés lors des campagnes de mesures. Il a été montré que le grau nord et le canal du Fossone jouaient un rôle déterminant dans la forte variabilité spatio-temporelle de l'hydrologie et de l'hydrodynamique de l'étang. La description du fonctionnement hydrodynamique de la lagune et des principales contraintes de fonctionnement a ainsi permis la simulation de plusieurs scénarii hydro-climatiques ³. De simples aménagements afin de maintenir les échanges mer-lagune apparaissent essentiels pour la santé écologique de l'étang. Il a donc été suggéré qu'une gestion facilitée de la lagune pourrait être obtenue par la surveillance des paramètres hydrologiques, tels que la température et la salinité.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Ces indicateurs simples traduisent efficacement l'état écologique de l'étang. Les conditions d'ouverture et de fermeture du grau nord et de l'embouchure du fleuve Golo (qui permet l'écoulement d'eau douce en mer plutôt que dans la lagune) et les apports d'eau douce (par saison sèche ou pluvieuse) régissent donc les différents scénarios proposés. Les différents scénarios qui s'appuient sur les conditions climatiques et l'état d'ouverture ou de fermeture des graus sont présentés sous la forme de fiches techniques ³ (un exemple est donné dans le présent document), facilement utilisable par les gestionnaires, illustrant les résultats par des indicateurs de salinité, de temps de renouvellement et de volume de mélange. Les conséquences probables sont énumérées et des actions de gestion sont proposées afin de maintenir le fonctionnement hydrologique souhaité.

Action 2 - La mise en place du modèle écosystémique sur la lagune de Biguglia, le développement d'indicateurs écologiques opérationnels et test de scénarios hydro-climatiques et écologiques.

Les lagunes côtières ont subi de fortes dégradations environnementales, notamment depuis les années 1960. L'eutrophisation a été reconnue comme étant la cause majeure de cette dégradation. Entre 2000 et 2014, l'Ifremer a opéré le Réseau de Suivi Lagunaire (RSL) afin d'évaluer et suivre l'évolution de l'état de l'ensemble des lagunes du Languedoc-Roussillon en termes d'eutrophisation. Des diagnostics réalisés depuis les années 2000 sur les lagunes des régions Provence Alpes Côte d'Azur, Occitanie et Corse ont abouti, dans les premières années, à une prise de conscience par les acteurs locaux des risques liés à la dégradation de la qualité de ces milieux. Des actions de gestion visant à réduire les apports en sels nutritifs à ces écosystèmes ont été mises en œuvre sur la plupart des lagunes. Aujourd'hui, de nouvelles questions se posent pour ces milieux, i) : le temps nécessaire à la restauration de l'ensemble des compartiments de l'écosystème et ii) : des charges maximales en azote et phosphore qu'une lagune peut tolérer tout en satisfaisant aux exigences du « bon état écologique » au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) ? Afin d'apporter des éléments de réponse quantitatifs à ces questions, un outil numérique **GAMELag** a été développé par Ifremer en collaboration (Références bibliographiques, collaborations ⁴).

La présente étude, grâce au déploiement du modèle écosystémique « GAMELag » sur la lagune de Biguglia ⁴ et ainsi permis d'évaluer les flux et stock d'azote et de phosphore. Les 2 problématiques principales sur la lagune de Biguglia étant l'eutrophisation avec des apports en excès d'azote et de phosphore et la forte variabilité de la salinité. L'objectif était de i) valider le fonctionnement du modèle sur la lagune de Biguglia et ii) de fournir aux gestionnaires des résultats en réponse à différents scénarios hydroclimatiques (année sèche / pluvieuse) ou selon différentes options de gestion, notamment celles visant à réduire les apports en azote et phosphore par le bassin versant ⁵. Les différents scénarios élaborés sont présentés sous la forme de fiches techniques ⁵.

Rapport Retralags IFREMER

¹ Dufresne Christiane, Malet Nathalie, Coudray Sylvain, [Fiandrino Annie](#) (2017) Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1 : Mise en place de la modélisation numérique 3D. RST.ODE/UL/LER/PAC/17.14

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00433/54453/>

² Dufresne Christiane, Malet Nathalie (2018) Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 2 : Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique. RST.ODE/UL/LER/PAC/18.05

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57300/>

³ Dufresne Christiane, [Fiandrino Annie](#), Malet Nathalie (2019) Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Indicateurs et test de scénario hydro-climatiques. ODE/UL/LER/PAC/19-01

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57302/>

⁴ Pete Romain, [Fiandrino Annie](#), Malet Nathalie (2020) Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 2 : Déploiement du modèle écosystémique GAMELag sur la lagune de Biguglia. ODE/UL/LER-PAC/20-01

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71564/>

⁵ Pete Romain, Malet Nathalie (2020) Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Scénarios écologiques. ODE/UL/LER-PAC/20-02

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71565/>

INTRODUZIONE, MOTIVAZIONI E SINTESI DELLE AZIONI

Il progetto *Interreg Retralags*, mirante a una gestione sostenibile del patrimonio costituito da lagune, laghi e stagni, è sviluppato per tutelare e per valorizzare il patrimonio ecosistemico. Questa gestione integrata si basa soprattutto su modelli di gestione delle zone umide che ci consentono una migliore comprensione del funzionamento di tali zone, nonché di provare l'ipotesi simulando scenari.

L'obiettivo del progetto consiste nello sviluppare strumenti di guida gestionale degli ambienti lagunari (sito pilota in Corsica, la laguna di Biguglia). L'**azione 1** si era prefissa la preparazione di un modello idrodinamico "acque basse" e di indicatori del funzionamento idrodinamico per testare e confrontare vari scenari idroclimatici. L'**azione 2** è imperniata sugli apporti e sui trasferimenti di azoto e di fosforo nei diversi compartimenti biologici del sistema lagunare. Si tratta di procedere a bilanci di materia avvalendosi di un modello ecosistemico di flusso/stock GAMElag nella laguna di Biguglia e di testare la risposta della laguna a diversi scenari idroclimatici ed ecologici.

Ho scelto di lavorare con un approccio per scenari e di riportare i risultati in schede sintetiche per eliminare totalmente i modelli matematici e mostrare così ai gestori in modo leggibile e immediato la risposta dell'ecosistema lagunare.

Le due azioni pilota IFREMER sono :

Azione 1 - Preparazione del modello idrodinamico della laguna di Biguglia, sviluppo di indicatori idrologici operativi e test di scenari idroclimatici

Il lavoro di questa azione è stato suddiviso in 3 parti. La prima parte ¹ non sarà esposta dettagliatamente in questo documento. Questa parte rendiconta la preparazione di un modello digitale tridimensionale della laguna di Biguglia, una breve descrizione del sito in esame, il modello implementato, le forzature e le fasi di calibrazione e di validazione. Il modello preparato rappresenta le variabili idrologiche in modo abbastanza fedele, anche se la salinità modellizzata è sovrastimata nei mesi estivi. I risultati del modello relativi ai volumi d'acqua scambiati con il mare sono dello stesso ordine di grandezza di quelli osservati durante la campagne di misura.

La seconda parte ² rendiconta lo studio del funzionamento idrologico e idrodinamico della laguna di Biguglia e consente di descrivere brevemente il sito di studio, i dati utilizzati e la strategia di modellazione, nonché il contesto idroclimatico, idrologico e idrodinamico della laguna. Si calcolano vari indicatori idrodinamici per spiegare la dinamica di questo sistema lagunare. Il modello preparato rappresenta le variabili idrologiche in modo abbastanza fedele, anche se la salinità modellizzata è sovrastimata nei mesi estivi. I risultati del modello relativi ai volumi d'acqua scambiati con il mare sono dello stesso ordine di grandezza di quelli osservati durante la campagne di misura. È stato dimostrato che l'estuario nord e il canale del Fossone hanno avuto un ruolo determinante nella forte variabilità spaziotemporale dell'idrologia e dell'idrodinamica dello stagno. La descrizione del funzionamento idrodinamico della laguna e dei principali vincoli di funzionamento ha così permesso la simulazione di vari scenari idroclimatici³. Semplici accorgimenti per mantenere gli scambi mare-laguna sembrano essenziali per la salute ecologica dello stagno. È stato quindi suggerito che una gestione facilitata della laguna potrebbe essere ottenuta con la sorveglianza dei parametri idrologici, quali la temperatura e la salinità. Questi semplici indicatori traducono efficacemente lo stato ecologico dello stagno.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Le condizioni di apertura e di chiusura dell'estuario nord e della foce del fiume Golo (che permette all'acqua dolce di defluire in mare piuttosto che in laguna) e gli apporti di acqua dolce (durante la stagione secca o piovosa) regolano quindi i diversi scenari proposti. I vari scenari basati sulle condizioni climatiche e sullo stato di apertura o chiusura degli estuari sono presentati in schede sintetiche ³ (il cui esempio è il presente documento), facilmente utilizzabili dagli amministratori, che illustrano i risultati con indicatori di salinità, di tempo di rinnovo e di volume di miscelazione. Vi sono elencate le probabili conseguenze e vi sono proposte azioni di gestione per mantenere il funzionamento idrologico desiderato.

Azione 2 - Preparazione del modello ecosistemico della laguna di Biguglia, sviluppo di indicatori ecologici operativi e test di scenari idroclimatici ed ecologici.

La lagune costiere hanno subito forti degradazioni ambientali, in particolar modo dagli anni '60. L'eutrofizzazione è stata riconosciuta come principale causa di queste degradazioni. Tra il 2000 e il 2014, Ifremer ha messo in atto la Rete di Monitoraggio Lagunare (RSL) per valutare e seguire l'evoluzione dello stato complessivo delle lagune della Linguadoca-Rossiglione in termini di eutrofizzazione. Le diagnosi effettuate dagli anni 2000 nelle lagune delle regioni Provenza-Alpi-Costa Azzurra, Occitania e Corsica, nei primi anni, hanno condotto gli attori locali alla consapevolezza dei rischi connessi alla degradazione della qualità di questi ambienti. Nella maggior parte delle lagune sono state messe in atto azioni di gestione miranti a ridurre gli apporti di sali nutritivi in questi ecosistemi. Oggi, per questi ambienti, si pongono nuovi interrogativi i): il tempo necessario per il ripristino globale dei compartimenti dell'ecosistema e ii): i carichi massimi di azoto e di fosforo che una laguna può tollerare nel rispetto dei requisiti detti di "buono stato ecologico" ai sensi della Direttiva Quadro sulle Acque (DQA)? Per fornire risposte quantitative a queste domande, Ifremer, con delle collaborazioni, ha sviluppato lo strumento digitale **GAMELag** (riferimenti bibliografici, collaborazioni ⁴).

Grazie all'implementazione del modello ecosistemico "GAMELag" nella laguna di Biguglia ⁴, il presente studio ha consentito di valutare i flussi e gli stock di azoto e di fosforo. Le due principali problematiche della laguna di Biguglia sono l'eutrofizzazione con apporti eccessivi di azoto e di fosforo e l'elevata variabilità della salinità. L'obiettivo è stato quello di (i) convalidare il funzionamento del modello nella laguna di Biguglia e di (ii) fornire ai gestori risultati per rispondere ai vari scenari idroclimatici (anno secco/piovosso) o secondo varie opzioni di gestione, ad esempio per ridurre gli apporti di azoto e di fosforo tramite il bacino imbrifero ⁵. I vari scenari elaborati sono riportati in schede tecniche ⁵.

Rapporto Retralags IFREMER

¹ Dufresne Christiane, Malet Nathalie, Coudray Sylvain, [Fiandrino Annie](#) (2017) Funzionamento idrodinamico della laguna di Biguglia. Prima Parte: Preparazione della modellizzazione digitale in 3D. RST.ODE/UL/LER/PAC/17.14

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00433/54453/>

² Dufresne Christiane, Malet Nathalie (2018) Funzionamento idrodinamico della laguna di Biguglia. Seconda parte: Funzionamento idrologico e idrodinamico. RST.ODE/UL/LER/PAC/18.05

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57300/>

³ Dufresne Christiane, [Fiandrino Annie](#), Malet Nathalie (2019) Funzionamento idrodinamico della laguna di Biguglia. Parte 3: Indicatori e test di scenari idroclimatici. ODE/UL/LER/PAC/19-01

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57302/>

⁴ Pete Romain, [Fiandrino Annie](#), Malet Nathalie (2020) Funzionamento ecosistemico della laguna di Biguglia. Seconda parte: Implementazione del modello ecosistemico GAMELag nella laguna di Biguglia. ODE/UL/LER-PAC/20-01 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71564/>

⁵ Pete Romain, Malet Nathalie (2020) Funzionamento ecosistemico della laguna di Biguglia. Parte 3: Scenari ecologici. ODE/UL/LER-PAC/20-02 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71565/>

SITE D'ETUDE : la lagune de Biguglia

Très peu profond, l'étang de Biguglia (Figure 1) fait partie d'une réserve naturelle protégée (faune et flore) depuis 1994, qui est néanmoins soumise à d'importantes pressions anthropiques. Les activités économiques de ses rives et de son bassin versant (d'une superficie de 180 km²) comprennent l'exploitation de pêche, l'agriculture, l'élevage bovin ainsi que des zones industrielles, commerciales et touristiques. Avec une superficie de 14,5 km² et un volume de 18 Mm³, l'étang de Biguglia est le plus vaste des étangs de Corse et représente près de la moitié de ses zones humides. D'origine lagunaire, l'étang s'étend parallèlement à la mer avec laquelle il communique par un grau de 1,7 km au nord de l'étang.

Au sud, le canal du Fossone peut aussi favoriser l'intrusion d'eau de mer dans l'étang lorsque les conditions sont favorables. Le Fossone permet aussi des échanges d'eau douce avec le fleuve Golo, légèrement en amont de son estuaire, générant un apport annuel d'environ 4 Mm³. Les apports d'eau douce sont engendrés par le ruissellement (lessivage du bassin versant) et par les fleuves et les cours d'eau temporaires, largement influencés par les précipitations. Dans le bassin nord, le fleuve Bevinco y coule de façon permanente et contribue à un apport d'eau douce de 19 à 20 Mm³ par. Ce fleuve d'une longueur de 28,1 km compte une quinzaine d'affluents et draine un bassin versant d'environ 70 km². 6 petits cours d'eau temporaires alimentent aussi l'étang en eau douce en période de crues (San Pancrazio, Sant'Agatha, San Lorenzo, Pietre Turchine, Rasignani, Mormorana). L'apport total du bassin versant (incluant les apports du Bevinco) est compris entre 27,6 à 55 Mm³/an. Les précipitations (800 et 900 Mm³/an) représentent en moyenne un apport de 13 Mm³/an. Les échanges hydrogéologiques, jugés comme faibles, seront négligés pour cette étude.

La salinité de la lagune est très variable saisonnièrement et de façon interannuelle ; le gradient de salinité nord sud est permanent mais peut être plus fortement marqué certaines années. Le bassin sud est le plus dessalé toutefois le bassin nord selon les années hydrologiques peut également être très dessalé. L'écosystème de la lagune est donc soumis à ces fortes fluctuations interannuelles qui peuvent engendrer des évolutions drastiques des communautés faunistiques et floristiques.

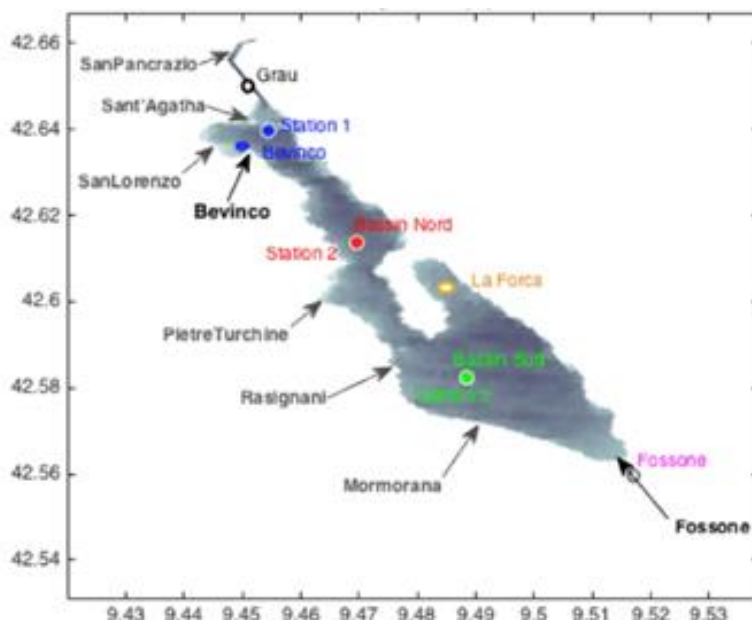


Figure 1 : La lagune de Biguglia
 Figura 1 : La laguna di Biguglia (Grau = Foce)

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
 La coopération au cœur de la Méditerranée

SITO IN ESAME: la laguna di Biguglia

Molto poco profondo, lo stagno di Biguglia (Figura 1) fa parte di una riserva naturale protetta (fauna e flora) dal 1994, che è tuttavia soggetta a notevoli pressioni antropiche. L'attività economiche delle rive e del bacino imbrifero (di una superficie di 180 km²) comprendono attività di pesca, agricoltura, allevamento bovino nonché zone industriali, commerciali e turistiche. Con una superficie di 14,5 km² e un volume di 18 Mm³, lo stagno di Biguglia è il più vasto della Corsica e rappresenta circa metà delle sue zone umide. Di origine lagunare, lo stagno si estende parallelo al mare, con cui comunica tramite un estuario di 1,7 km a nord dello stagno.

A sud, il canale del Fossone può favorire l'intrusione d'acqua di mare nello stagno, quando le condizioni sono favorevoli. Il Fossone consente anche gli scambi d'acqua dolce con il fiume Golo, leggermente a monte del suo estuario, generando un apporto annuo di circa 4 Mm³. Gli apporti di acqua dolce sono generati dal deflusso (dilavamento del bacino imbrifero) e da fiumi e corsi d'acqua temporanei, in gran parte influenzati dalle precipitazioni. Nel bacino settentrionale, il fiume Bevinco vi scorre in modo permanente e contribuisce a un apporto d'acqua dolce da 19 a 20 Mm³ all'anno. Questo fiume lungo 28,1 km ha una quindicina di affluenti e drena un bacino imbrifero di circa 70 km². Anche 6 piccoli corsi d'acqua temporanei alimentano lo stagno con acqua dolce nel periodo delle piene (San Pancrazio, Sant'Agatha, San Lorenzo, Petre Turchine, Rasignani, Mormorana). L'apporto totale del bacino imbrifero (compresi gli apporti del fiume Bevinco) è compreso tra 27,6 - 55 Mm³ all'anno. Le precipitazioni (800 e 900 Mm³/anno) rappresentano mediamente un apporto di 13 Mm³ all'anno. In questo studio, gli scambi idrogeologici, ritenuti bassi, non saranno considerati.

La salinità della laguna è molto variabile stagionalmente e in modo interannuale; il gradiente salino nord-sud è permanente ma può essere molto più marcato alcuni anni. Il bacino meridionale è quello più desalinizzato, tuttavia anche il bacino settentrionale, a seconda degli anni idrologici, può essere molto desalinizzato. L'ecosistema della laguna è quindi soggetto a forti fluttuazioni interannuali che possono portare a drastici cambiamenti nelle comunità faunistiche e floristiche.

ACTION 1. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA

Indicateurs et scénarios hydro-climatiques

1. Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique

Pluviométrie

La pluviométrie joue un rôle essentiel dans les apports d'eau douce à l'étang et les 900 Mm³/an de pluie représentent, du fait des précipitations directes sur la surface de l'étang, un apport annuel d'environ 14 Mm³. L'analyse des cumuls quotidiens de pluie des 28 dernières années révèle une moyenne annuelle légèrement inférieure (783 mm) à cette moyenne historique de 900 Mm³/an ainsi qu'une importante variabilité pluriannuelle comprise entre 557 mm (en 1990) et 1375 mm (en 2008). La saisonnalité est très marquée, avec des mois secs en été et deux périodes pluvieuses à l'automne et au printemps (Figure 2a, b). Les mois d'octobre et de novembre sont généralement les plus pluvieux et leurs moyennes pluriannuelles dépassent les 100 mm. Les mois de janvier à avril dénombrent toutefois des cumuls mensuels pouvant atteindre plus de 200 mm de pluie. Le caractère très ponctuel des épisodes pluvieux génère des apports d'eau douce très irréguliers et une forte variabilité saisonnière et pluriannuelle.

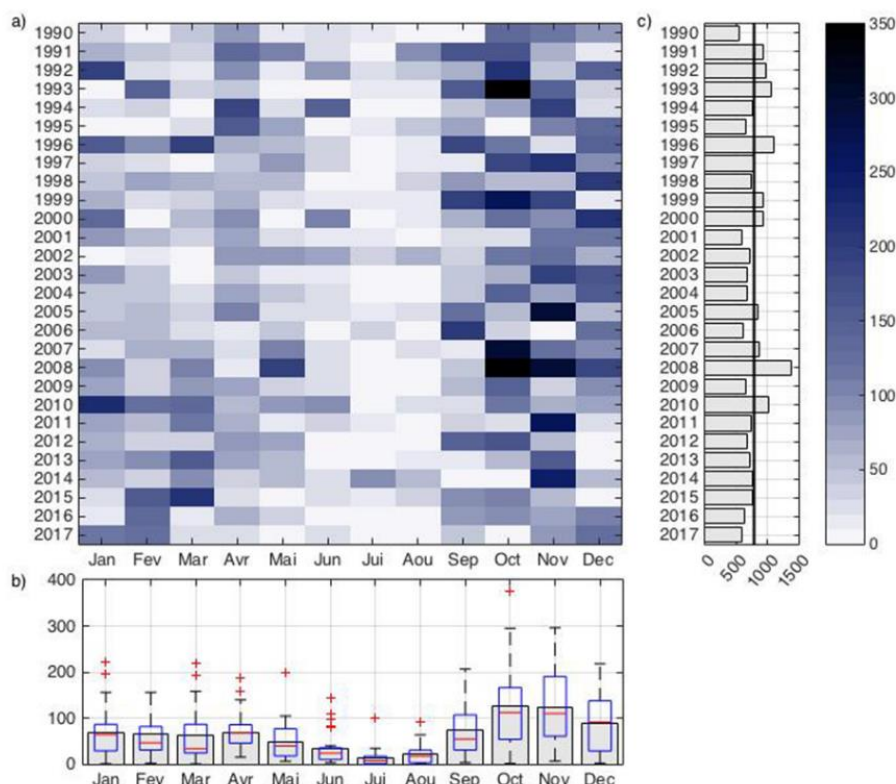


Figure 2 : « Heat-map plot » pluviométrique : (a) pluviométrie mensuelle totale (mm) enregistrée à la Station Bastia-Poretta entre 1990 et 2017; (b) pluviométrie mensuelle moyenne (grise), valeur médiane (trait rouge), 25^{ème} et 75^{ème} percentile (bleu), les valeurs minimales et maximales (pattes noires) et valeurs extrêmes (croix rouges); (c) cumul pluviométrique annuel (mm) et moyenne pluviométrique pluriannuelle (trait noir).

Figura 2: “Heat-map plot” pluviometrico: (a) pluviometria mensile totale (mm) registrata alla Stazione Bastia-Poretta tra il 1990 e il 2017; (b) pluviometria mensile media (grigio), valore medio (trattino rosso), 25° e 75° percentile (blu), i valori minimi e massimi (segni neri) e i valori estremi (croci rosse); (c) cumulo pluviometrico annuo (mm) e media pluviometrica pulirannuale (trattino nero).

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Salinité

La salinité traduit l'impact des apports des fleuves et l'influence des échanges avec la mer, plus salée. Aux abords des exutoires des fleuves et des cours d'eau temporaires, l'eau douce favorise une salinité plus faible alors qu'à proximité du grau nord, les salinités sont plus élevées. Les mesures ponctuelles en surface s'échelonnent entre 3 et 37 avec une grande variabilité à la fois spatiale (nord, sud) et temporelle (saisonnalité) (Figure 3). Ces salinités sont plus élevées dans le bassin nord que dans le bassin sud (Figure 7a), et atteignent des valeurs plus élevées durant la saison estivale (Figure 3b). L'écart entre les salinités des bassins nord et sud est plus prononcé les mois d'été. Par ailleurs, une diminution des salinités estivales est marquée entre 2002 et 2012, avec une tendance bien établie dans le bassin sud. Au regard des pluviométries plutôt faibles les années concernées (Figure 1), cette diminution de salinité ne peut pas s'expliquer seulement par une augmentation des apports d'eau douce. Une réduction des échanges avec la mer en serait plutôt la cause, engendrant un apport moins important d'eau salée, ce qui favoriserait le maintien d'une salinité faible dans l'étang. Cependant, une telle diminution des échanges mer-lagune ne peut survenir que lors d'une modification de la configuration ou de la topographie des graus. Un grau plus étroit diminuerait par exemple les apports d'eau salée et favoriserait le maintien d'une faible salinité. Ainsi, le rétrécissement, voir la fermeture, de l'embouchure du Golo en mer pourrait expliquer la tendance de diminution de salinité dans le bassin sud.

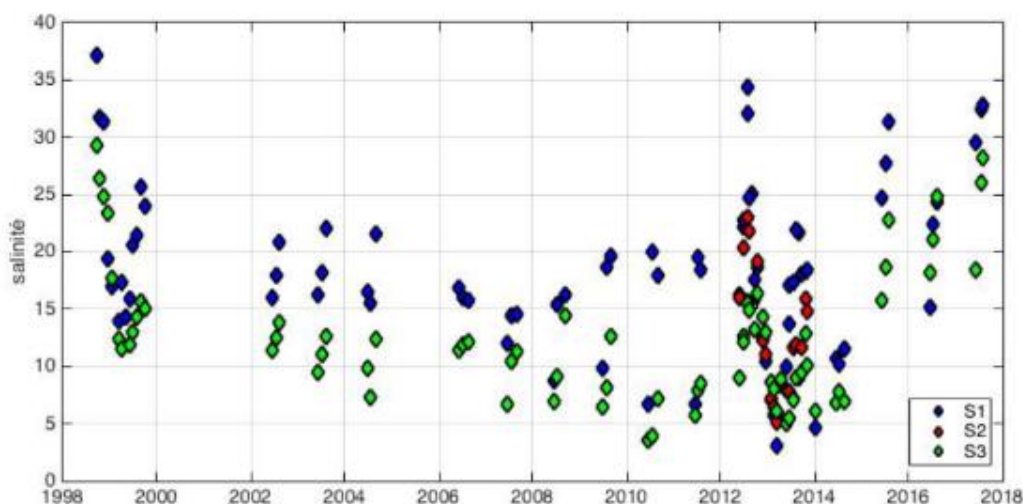


Figure 3 : Mesures de salinité réalisées en été dans le cadre des RSL au nord (bleu), centre (rouge) et sud (vert) de la lagune depuis 1999.

Figura 3: Misure di salinità effettuate in estate nell'ambito della rete di monitoraggio lagunare (RSL) a nord (blu), al centro (rosso) e a sud (verde) della laguna dal 1999.

Impact de l'état des embouchures sur l'hydrologie

Hors période de crue et lorsque les conditions en mer sont favorables (i.e. niveau d'eau en mer élevé), la section aval du Golo et le canal du Fossone peuvent jouer un rôle de grau et favoriser l'intrusion d'eau de mer dans l'étang. A l'inverse, l'estuaire du Golo peut se fermer (notamment à cause de l'apport de sédiments par le fleuve ou de la dérive littorale) ce qui empêche les échanges avec la mer et dirige les apports d'eau douce dans l'étang par le canal du Fossone.

AZIONE 1. FUNZIONAMENTO IDRODINAMICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA

Indicatori e scenari idroclimatici

1. Funzionamento idrologico e idrodinamico

Pluviometria

La pluviometria ha un ruolo essenziale negli apporti di acqua dolce nello stagno e i 900 Mm³ annui di pioggia rappresentano, a causa delle precipitazioni dirette sulla superficie dello stagno, un apporto annuo di circa 14 Mm³. L'analisi dei cumuli quotidiani di pioggia degli ultimi 28 anni mostra una media annua leggermente inferiore (783 mm) rispetto a questa media storica di 900 Mm³ all'anno nonché un'importante variabilità pluriennale compresa tra 557 mm (nel 1990) e 1375 mm (nel 2008). La stagionalità è molto marcata, con mesi secchi in estate e due periodi piovosi in autunno e in primavera (Figura 2a, b). I mesi di ottobre e di novembre in genere sono quelli più piovosi e le loro medie pluriannuali superano i 100 mm. I mesi da gennaio ad aprile hanno tuttavia totali mensili che possono arrivare a più di 200 mm di pioggia. La tipologia molto irregolare degli episodi di pioggia genera apporti d'acqua dolce molto irregolari e una forte variabilità stagionale e pluriennale.

Salinità

La salinità traduce l'impatto degli apporti dei fiumi e l'influenza degli scambi con il mare, più salato. Vicino agli sbocchi dei fiumi e dei corsi d'acqua temporanei, l'acqua dolce favorisce una salinità più debole mentre vicino all'estuario nord, le salinità sono più elevate. Le misure puntuali in superficie vanno da 3 a 37 con una grande variabilità al contempo spaziale (nord, sud) e temporale (stagionalità) (Figura 3). Queste salinità sono più elevate nel bacino nord rispetto al bacino sud (Figura 7a) e raggiungono i valori più elevati durante la stagione estiva (Figura 3b). Il divario tra le salinità del bacino nord e del bacino sud è più pronunciato nei mesi estivi. D'altronde, una diminuzione della salinità estiva è marcata tra il 2002 e il 2012, con una tendenza consolidata nel bacino sud. Viste le pluviometrie piuttosto deboli negli anni in questione (Figura 1), questa diminuzione della salinità non può essere spiegata soltanto con un aumento degli apporti di acqua dolce. La causa sarebbe piuttosto una riduzione degli scambi con il mare, con conseguente minore apporto di acqua salata, che aiuterebbe a mantenere bassa la salinità nello stagno. Tuttavia, una tale diminuzione degli scambi mare-laguna può avvenire soltanto durante una modifica della configurazione o della topografia degli estuari. Un estuario più stretto ridurrebbe, ad esempio, gli apporti d'acqua salata e favorirebbe il mantenimento di una bassa salinità. Così, il restringimento, se non la chiusura, della foce del Golo in mare potrebbe spiegare la tendenza alla diminuzione della salinità nel bacino sud.

Impatto dello stato delle foci sull'idrologia

Tranne nel periodo di piena e quando le condizioni in mare sono favorevoli (cioè quando il livello del mare è alto), la sezione a valle del Golo e il canale Fossone possono fungere da estuario e favorire l'intrusione di acqua di mare nello stagno. Al contrario, l'estuario del Golo può chiudersi (nella fattispecie per via dell'apporto di sedimenti tramite il fiume o della deriva litoranea), ciò impedisce gli scambi con il mare e instrada gli apporti d'acqua dolce nello stagno tramite il canale del Fossone.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

2. Indicateurs et scénarios hydro-climatiques

Scénarios hydrologiques

Afin d'estimer l'impact des échanges avec le canal du Fossone sur l'hydrologie de l'étang, différents scénarios représentant l'état d'ouverture ou de fermeture de l'embouchure du Golo (ouverte ou fermée) sont simulés (Figure 4). Les conditions météorologiques, les hauteurs d'eau en mer et les apports du Bevinco et des cours d'eau temporaires sont identiques pour tous les scénarios. Les simulations (couleurs) sont comparées à l'ensemble des données observées toutes années confondues, représentées par des symboles en étoile (*) sur la Figure 4 pour le bassin nord (haut) et le bassin sud (bas). La **simulation 1** (bleu foncé sur la Figure 4) simule une embouchure du Golo ouverte, ce qui favorise l'écoulement en mer ; les apports d'eau douce sont estimés à 5% des débits du Golo. Ce scénario illustre l'augmentation de la salinité au cours de l'année dans les deux bassins avec une salinité moyenne de 15 au printemps et une salinité maximale d'environ 35 en début d'automne. La **simulation 2** (en gris sur la Figure 4) représente plus fidèlement les salinités dans les 2 bassins, mais ses forçages semblent peu réalistes. En effet, en cas de fermeture de l'embouchure du Golo, les apports d'eau douce à la lagune via le Fossone seraient fort probablement plus importants que les 5% simulés. Ainsi, le **scénario 3** prend compte de débits plus importants (20%) et simule des salinités proches de celles mesurées pour les mois d'été et d'automne. Les valeurs du printemps sont cependant légèrement inférieures (en cyan sur la Figure 4). Enfin, le **scénario 4** simule une fermeture de l'embouchure le 1^{er} juin et une augmentation des apports d'eau douce par le Fossone, liée au détournement de l'écoulement du cours d'eau. La première moitié de l'année, la salinité modélisée est donc identique à celle de la simulation 1, puis suite à la fermeture de l'embouchure, la salinité chute à cause de l'augmentation des apports d'eau douce et de la diminution des échanges avec la mer. Bien que ce scénario surestime probablement les apports d'eau douce du Golo (100%), la salinité modélisée (bleu clair sur la Figure 4) semble représenter la limite inférieure des valeurs mesurées. La salinité de l'étang est donc directement liée à l'état des graus. L'eau douce s'écoule préférentiellement vers la mer en cas d'ouverture de l'embouchure du Golo ou, en cas de fermeture, vers la lagune, via le Fossone. De plus, les échanges avec la mer sont influencés par l'état des embouchures du Golo et du grau au nord de l'étang, favorisant l'export d'eau douce et l'apport d'eau salée.

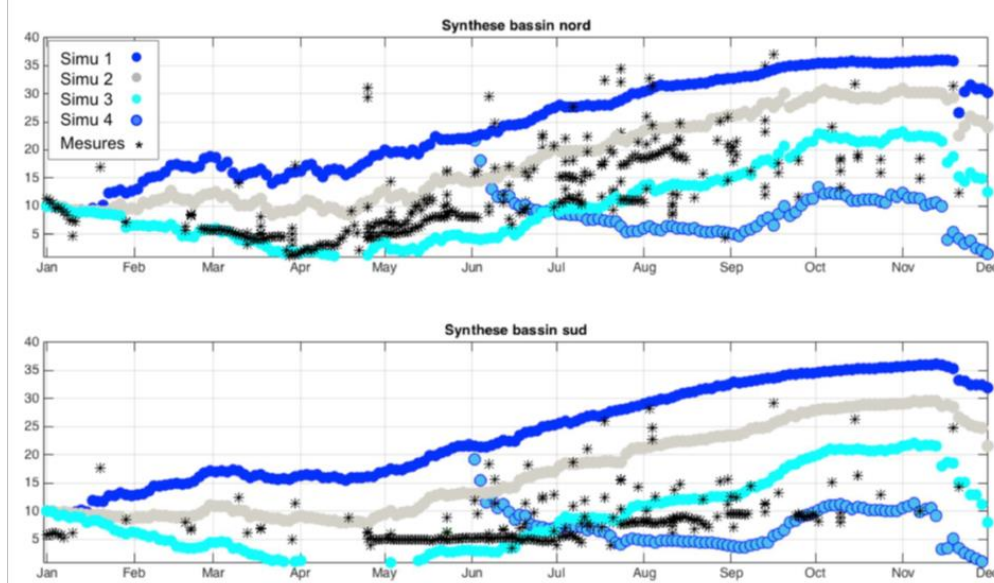


Figure 4 : Mesures de salinité (*) entre 1998 et 2017 dans le bassin nord (haut) et le bassin sud (bas), et salinité modélisée pour les simulations 1 (bleu foncé), 2 (gris), 3 (cyan) et 4 (bleu clair).

Figura 4: Misure di salinità (*) tra il 1998 e il 2017 nel bacino nord (in alto) e nel bacino sud (in basso) e salinità modellizzata per le simulazioni 1 (blu scuro), 2 (grigio), 3 (ciano) e 4 (celeste).

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

Indicateurs hydrodynamiques

Dans le but de quantifier le mélange des masses d'eau dans l'étang, différents indicateurs hydrodynamiques sont calculés pour les simulations 1 à 3, la simulation 4 montrant des échanges beaucoup trop importants dus aux apports surestimés du Golo (100%). Des descripteurs hydrodynamiques des milieux semi-fermés sont généralement calculés en les assimilant à des systèmes parfaitement mélangés, c'est-à-dire des réservoirs dans lesquels une substance dissoute conservative introduite à un instant donné, en un endroit donné, est instantanément et uniformément mélangée avec la totalité du volume du réservoir. Dans ce contexte de « milieux parfaitement mélangés », le temps de renouvellement est défini comme le temps nécessaire pour renouveler la totalité du volume du système en fonction des flux échangés avec l'extérieur (mer, bassin versant). Ce descripteur, qui ne tient pas compte du mélange des masses d'eau au sein de la lagune, renseigne sur l'efficacité des échanges aux interfaces. Les temps de renouvellement des différentes simulations, calculés en fonction des volumes entrants et sortants échangés, sont compris entre 47 et 75 jours. A titre de comparaison, l'étang de Bages-Sigean (64 Mm³, France) a un temps de renouvellement par les eaux marines estimé à 59 jours et la lagune Lesina (45 Mm³, Italie) a un temps de renouvellement estimé à 87 jours.

Le temps de résidence est basé sur l'évolution des concentrations d'une substance dissoute conservative, introduite de façon homogène dans tout le domaine en début d'expérience. Le temps de résidence représente le temps moyen que la substance dissoute conservative (et par conséquent les masses d'eau qui la contiennent) passe dans le système. Les temps de résidence calculés pour les différentes simulations (Figure 4) ne sont pas homogènes spatialement dans la lagune (Figure 5) et dépendent des apports du Golo et des conditions de son embouchure. Le volume de mélange renseigne sur la connectivité d'une lagune avec la mer et permet de représenter spatialement l'efficacité du mélange entre les eaux saumâtres et les eaux marines. Il représente, en fonction des volumes échangés avec la mer (Figure 5), la part du volume lagunaire qui peut être considérée comme parfaitement mélangée avec la mer. Il permet également de distinguer les zones de la lagune dans lesquelles le mélange des masses d'eau est efficace et des frontières hydrodynamiques qui bloquent les échanges entre deux zones bien mélangées. Pour l'ensemble des simulations, des seuils de mélange (rupture de pente) apparaissent pour des proportions du volume de l'étang d'environ 3%, 13%, 40% et 95% (Figure 5). Les volumes mélangés correspondant à chacun de ces seuils fournissent une représentation spatiale des zones parfaitement mélangées (Figure 5). L'illustration de ces zones de mélange identifie des sous-zones rapidement renouvelées ou, à l'inverse, plutôt isolées. D'abord, l'impact du mélange associé au grau nord est mis en évidence par une première frontière physique (vert). L'influence du panache du Bevinco définit une seconde zone de mélange au nord de l'étang (violet). Cette représentation des volumes mélangés met également en évidence la division des bassins nord et sud, déjà soupçonnée par la variabilité des paramètres hydrologiques (orangé). Enfin, l'anse du Forca apparaît comme une zone isolée (bleu).

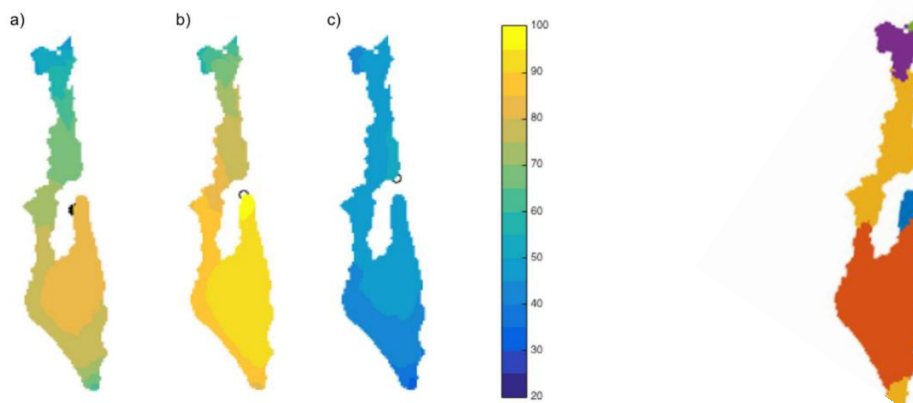


Figure 5 : Temps de résidence (jours) calculés pour les simulations 1 (a), 2 (b) et 3 (c) à gauche ; volume de mélange discriminant des zones hydrodynamiques (à droite).

Figura 5: tempo di residenza (giorni) calcolato per le simulazioni 1 (a), 2 (b) e 3 (c) a sinistra; volume di mescolamento che discrimina le zone idrodinamiche (a destra).

La coopération au coeur de la Méditerranée

2. Indicatori e scenari idroclimatici

Scenari idrologici

Per stimare l'impatto degli scambi con il canale del Fossone sull'idrologia dello stagno, vengono simulati diversi scenari che rappresentano lo stato di apertura o di chiusura della foce del Golo (Figura 4). Le condizioni meteorologiche, le altezze dell'acqua in mare e gli apporti del Bevinco e dei corsi d'acqua temporanei sono identici per tutti gli scenari. Le simulazioni (a colori) sono comparate a tutti i dati osservati per tutti gli anni, rappresentati dagli asterischi (*) nella Figura 4 per il bacino nord (in alto) e per il bacino sud (in basso). La **simulazione 1** (blu scuro nella Figura 4) simula una foce del Golo aperta, ciò favorisce il deflusso in mare; gli apporti d'acqua dolce sono stimati al 5% dei flussi del Golo. Questo scenario illustra l'aumento della salinità durante l'anno in entrambi i bacini, con una salinità media di 15 in primavera e una salinità massima di circa 35 all'inizio dell'autunno. La **simulazione 2** (in grigio nella Figura 4) rappresenta più fedelmente le salinità in entrambi i bacini, ma le sue forzature sembrano poco realistiche. Infatti, in caso di chiusura della foce del Golo, gli apporti d'acqua dolce nella laguna attraverso il Fossone sarebbero molto probabilmente superiori rispetto al 5% simulato. Così, lo **scenario 3** prende in considerazione flussi più importanti (20%) e simula salinità vicine a quelle misurate per i mesi estivi e autunnali. I valori della primavera sono tuttavia leggermente inferiori (in ciano nella Figura 4). Infine, lo **scenario 4** simula una chiusura della foce l'1 giugno e un aumento degli apporti d'acqua dolce attraverso il Fossone, per via della deviazione del flusso del corso d'acqua. Nella prima metà dell'anno, la salinità modellizzata è quindi identica a quella della simulazione 1, poi dopo la chiusura della foce, la salinità cala per via dell'aumento degli apporti d'acqua dolce e della diminuzione degli scambi con il mare. Anche se probabilmente questo scenario sopravvaluta gli apporti d'acqua dolce del Golo (100%), la salinità modellizzata (celeste nella Figura 4) sembra rappresentare il limite minimo dei valori misurati. La salinità dello stagno è quindi direttamente connessa con lo stato degli estuari. L'acqua dolce scorre preferibilmente verso il mare in caso di apertura della foce del Golo o, in caso di chiusura, verso la laguna attraverso il Fossone. Inoltre, gli scambi con il mare sono influenzati dallo stato delle foci del Golo e dell'estuario a nord dello stagno, che favoriscono l'esportazione di acqua dolce e l'apporto di acqua salata.

Indicatori idrodinamici

Per quantificare il mescolamento delle masse d'acqua nello stagno, sono calcolati diversi indicatori idrodinamici per le simulazioni da 1 a 3, la simulazione 4 mostra scambi eccessivi a causa dei contributi sovrastimati del Golo (100%). In genere, si calcolano dei descrittori idrodinamici degli ambienti semichiusi assimilandoli a sistemi perfettamente mescolati, cioè serbatoi in cui una sostanza disciolta conservativa introdotta in un dato momento, in un dato luogo, si mescola istantaneamente e uniformemente con l'intero volume del serbatoio. In questo contesto di "ambienti perfettamente mescolati", il tempo di rinnovamento è definito come il tempo necessario per rinnovare tutto il volume del sistema a seconda dei flussi scambiati con l'esterno (mare, bacino imbrifero). Questo descrittore, che non considera il mescolamento delle masse d'acqua nella laguna, fornisce informazioni sull'efficacia degli scambi nelle interfacce. I tempi di rinnovamento delle varie simulazioni, calcolati sulla base dei volumi scambiati in entrata e in uscita, sono compresi tra 47 e 75 giorni. A titolo di confronto, lo stagno di Bages-Sigean (64 Mm³, Francia) ha un tempo di rinnovamento attraverso le acque marine stimato a 59 giorni e la laguna di Lesina (45 Mm³, Italia) ha un tempo di rinnovamento stimato a 87 giorni.

Il tempo di residenza si basa sull'evoluzione delle concentrazioni di una sostanza disciolta conservativa, introdotta omogeneamente in tutta la tenuta all'inizio dell'esperimento. Il tempo di residenza rappresenta il tempo medio che la sostanza disciolta conservativa (e quindi le masse d'acqua che la contengono) trascorre nel sistema. I tempi di residenza calcolati per le varie simulazioni (Figura 4) non sono spazialmente omogenei nella laguna (Figura 5) e dipendono dagli apporti del Golo e dalle condizioni della sua foce.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Il volume di mescolamento fornisce informazioni sulla connettività di una laguna con il mare e permette la rappresentazione spaziale dell'efficacia del mescolamento tra acque salmastre e marine. A seconda dei volumi scambiati con il mare (figura 5), rappresenta la parte del volume della laguna che può essere considerata perfettamente mescolata con il mare. Permette inoltre di distinguere le zone della laguna in cui il mescolamento delle masse d'acqua è efficace e le frontiere idrodinamiche che bloccano gli scambi tra due zone mescolate. Per tutte le simulazioni, le soglie di mescolamento (rottura del pendio) appaiono secondo proporzioni del volume dello stagno di circa 3%, 13%, 40% e 95% (Figura 5). I volumi mescolati corrispondenti a ciascuna di queste soglie forniscono una rappresentazione spaziale delle zone perfettamente mescolate (Figura 5). L'illustrazione di queste zone di mescolamento identifica delle sotto-aree con un rinnovamento rapido oppure, al contrario, piuttosto isolate. Innanzitutto, l'impatto del mescolamento associato all'estuario nord è evidenziato da una prima frontiera fisica (verde). L'influenza del pennacchio di Bevinco definisce una seconda zona di mescolamento a nord dello stagno (viola). Questa rappresentazione di volumi mescolati evidenzia anche la divisione del bacino settentrionale e meridionale, già intuita per via della variabilità dei parametri idrologici (arancione). Infine, l'insenatura del Forca appare come una zona isolata (blu).

3. Description des scénarios et des fiches techniques

Les scénarios

Les scénarios sont proposés en fonction des conditions d'ouverture et de fermeture du grau nord et de l'embouchure du fleuve Golo, qui permet l'écoulement d'eau douce en mer plutôt que dans la lagune. Les apports d'eau douce, fortement liés à la pluviométrie, jouent également un rôle déterminant pour la salinité et la santé écologique de la lagune. Les scénarios (Table 1) dépendent donc de **l'ouverture du grau nord** (ouvert / fermé), de l'ouverture de **l'embouchure du Golo** (échanges avec la mer via le Fossone) et de la **pluviométrie** (saison sèche ou pluvieuse). Certains scénarios dits « avec intervention » présentent une **ouverture du grau nord variable**, représentant une alternance d'ouverture et de fermeture qui s'appuie sur les interventions dirigées par la *Réserve Naturelle de l'Étang de Biguglia* (ouverture à la pelle mécanique). Les **apports d'eau douce au Fossone** correspondent à un pourcentage des débits du Golo. Lors de la mise en place du modèle hydrodynamique, des comparaisons de simulations réalisées avec plusieurs débits ont montré qu'un apport représentant 5% celui du Golo correspondait aux volumes échangés. Un des scénarios « Forte pluviométrie » utilise toutefois un débit au Fossone équivalent à 20% de celui du Golo afin de quantifier l'impact d'un apport plus important.

Tableau : 1 Liste des scénarios

Scénarios	Grau Nord	Embouchure du Golo	Pluviométrie	Débit d'eau douce au Fossone
Saison sèche A	ouvert	ouvert	Saison sèche	5% Golo
Saison sèche B	ouvert	fermée	Saison sèche	5% Golo
Saison pluvieuse A	ouvert	ouvert	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse B	ouvert	fermée	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse avec interventions A	variable	ouvert	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse avec interventions B	variable	fermée	Saison pluvieuse	5% Golo
Faible pluviométrie	ouvert	ouvert	Faible pluviométrie	5% Golo
Forte pluviométrie	ouvert	fermée	Très forte pluviométrie	20% Golo

Les fiches techniques

Pour chacun des scénarios, une fiche technique est proposée. Elle regroupe la **description du scénario A** via la pluviométrie, l'ouverture du grau et de l'embouchure du Golo, et les apports d'eau douce. La **salinité (B)**, indicateur des apports d'eau douce des fleuves et des échanges avec la mer plus salée, est montrée selon son évolution temporelle en deux points et sa variabilité spatiale après 90 jours de simulations avec la variation de salinité dans le bassin nord (bleu) et sud (rouge). La figure 2 - **C** montre la carte de la salinité dans l'étang à la fin des 3 mois de simulations avec une échelle de couleur variant de 0 à 40. Afin de quantifier les échanges d'eau, la section **D** représente les **temps de renouvellement** et **de résidence**. Le symbole 'o' sur la figure **D** illustre le temps de résidence maximal et le temps de résidence moyen est calculé pour l'ensemble de l'étang. Afin d'illustrer la capacité des masses d'eau à se mélanger, le **volume de mélange** est calculé et représenté à la Figure **E**. Les différentes couleurs montrent les frontières de mélange et le chiffre indique la proportion du volume de l'étang qui doit être échangé afin de franchir chacune des frontières. A titre d'exemple, un volume équivalent à près du double du volume d'eau total de l'étang (1.95) doit être échangé avec l'extérieur du bassin (bassin versant et mer) afin de mélanger la masse d'eau de l'anse Forca (en bleu sur la Figure E). Ce descripteur montre les zones rapidement mélangées (en vert et violet) et celles plus isolées (en bleu). Enfin, les dernières sections de la fiche technique regroupent les **conséquences possibles** d'un tel scénario pour la lagune (Figure **F**) ainsi que des **actions suggérées** (Figure **G**).

3. Descrizione degli scenari e delle schede tecniche

Gli scenari

Gli scenari sono proposti in base alle condizioni di apertura e di chiusura dell'estuario nord e della foce del fiume Golo, che permettono il deflusso dell'acqua dolce nel mare piuttosto che nella laguna. Gli apporti di acqua dolce, fortemente dipendenti dalla pluviometria, hanno un ruolo determinante anche nella salinità e nella salute ecologica della laguna. Gli scenari (tabella 1) dipendono quindi dall'**apertura dell'estuario nord** (aperto/chiuso), dall'apertura della **foce del Golo** (scambi con il mare attraverso il Fossone) e dalla **pluviometria** (stagione secca o piovosa). Alcuni scenari cosiddetti "con intervento" presentano un'**apertura variabile dell'estuario nord**, che rappresenta un'alternanza di apertura e di chiusura sulla base degli interventi condotti dalla *Riserva Naturale dello Stagno di Biguglia* (apertura con una pala meccanica).

Gli **apporti di acqua dolce del Fossone** corrispondono a una percentuale delle portate del Golo. Durante la preparazione del modello idrodinamico, i confronti delle simulazioni effettuate con varie portate hanno mostrato che un apporto rappresentante il 5% di quello del Golo corrispondeva ai volumi scambiati. Tuttavia, uno scenario "Forte pluviometria" utilizza una portata nel Fossone equivalente al 20% di quella del Golo per quantificare l'impatto di un apporto maggiore.

Tabella 1: Lista degli scenari

Scenari	Foce nord	Foce del Golo	Pluviometria	Flusso acqua dolce al Fossone
Stagione secca A	aperto	aperto	stagione secca	5% Golo
Stagione secca B	aperto	chiuso	stagione secca	5% Golo
Stagione piovosa A	aperto	aperto	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa B	aperto	chiuso	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa con interventi A	variabile	aperto	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa con interventi B	variabile	chiuso	Saison pluvieuse	5% Golo
Pluviometria debole	aperto	aperto	pluviometria debole	5% Golo
Pluviometria forte	aperto	chiuso	pluviometria fortissima	20% Golo

Le schede tecniche

Per ciascuno degli scenari, è proposta una scheda tecniche. Raggruppa la **descrizione dello scenario A** attraverso la pluviometria, l'apertura dell'estuario e della foce del Golo, nonché gli apporti di acqua dolce. La **salinità (B)**, indicatore degli apporti di acqua dolce dei fiumi e degli scambi con il mare più salato, è mostrata secondo l'evoluzione temporale in due punti e la variabilità spaziale dopo 90 giorni di simulazioni con la variazione della salinità nel bacino nord (blu) e sud (rosso). La figura 2 - **C** mostra la cartina della salinità nello stagno alla fine della simulazione di 3 mesi con una scala di colori da 0 a 40. Per quantificare gli scambi d'acqua, la sezione **D** rappresenta i **tempi di rinnovamento** e di **residenza**. Il simbolo 'o' nella figura **D** illustra il tempo di residenza massimo e il tempo di residenza medio è calcolato per tutto lo stagno. Per illustrare la capacità delle masse d'acqua di mescolarsi, il **volume di mescolamento** è calcolato e mostrato nella Figura **E**. I vari colori mostrano le frontiere di mescolamento e il numero indica la proporzione del volume dello stagno che deve essere scambiato per varcare ogni frontiera. Ad esempio, per mescolare la massa d'acqua dell'insenatura Forca (in blu nella figura E), un volume equivalente a circa il doppio del volume totale d'acqua dello stagno (1,95) dovrebbe essere scambiato con l'esterno dello stagno (bacino imbrifero e mare). Questo descrittore mostra le aree che si mescolano rapidamente (verde e viola) e quelle più isolate (blu). Infine, le ultime sezioni della scheda tecniche raggruppano le **possibili conseguenze di** un tale scenario per la laguna (Figura **F**) e le **azioni suggerite** (Figura **G**).



Interreg

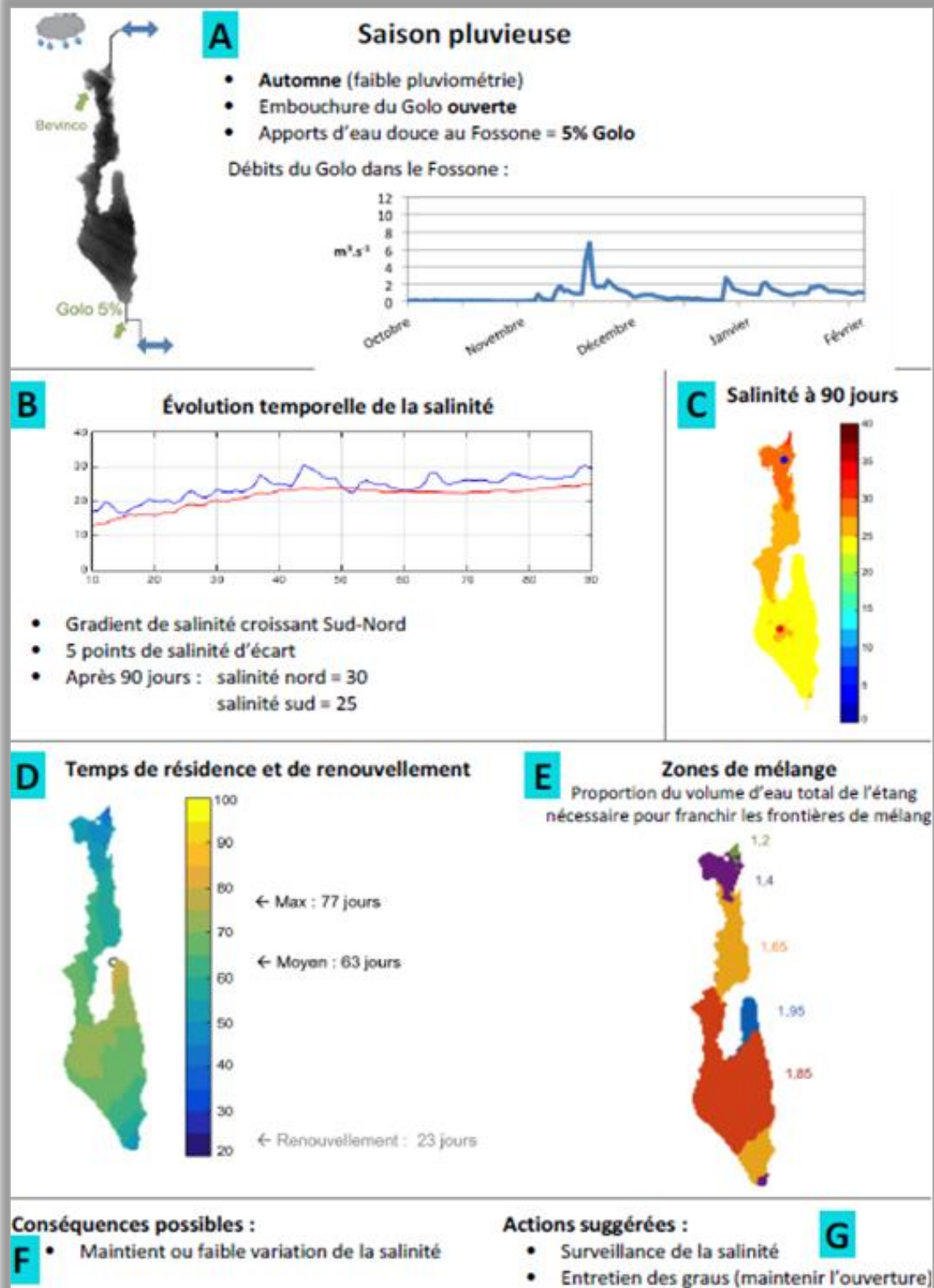


retralags

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Exemple de fiche éditée à partir des logiciels IFREMER



La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

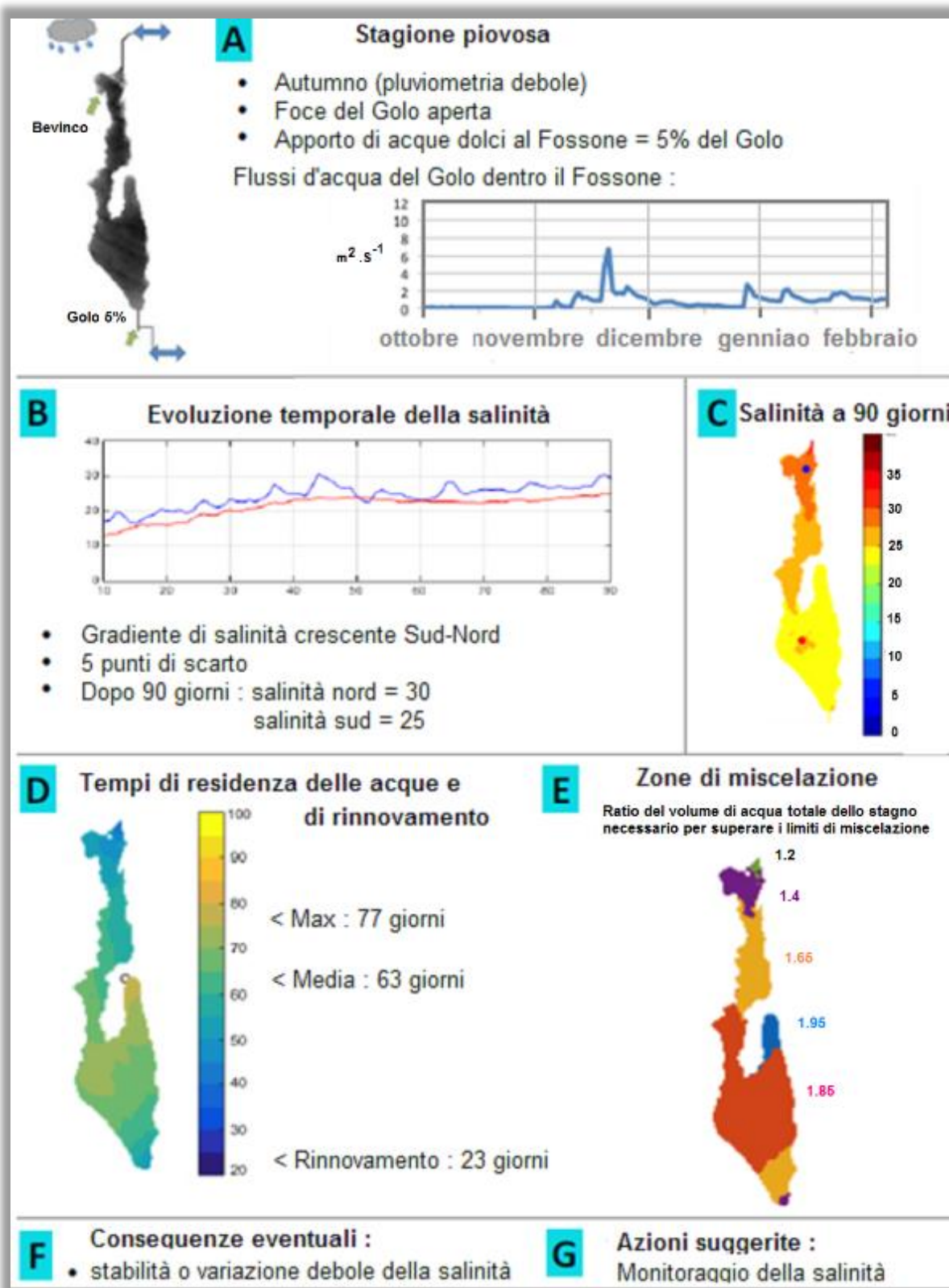


Interreg
MARITTIMO-IT FR-MARITIME
Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Esempio di scheda prodotta con i software IFREMER

22



La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

ACTION 2. FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA **Indicateurs et scénarios hydro-climatiques et écologiques**

1. Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia

Le déploiement du modèle numérique GAMELag n'est pas détaillé dans ce document.

Les simulations établies sur les années 2017-2018 reproduisent de manière satisfaisante les variations de salinité, de chlorophylle a, de concentrations en azote et phosphore inorganique (NO₃, NH₄ et PO₄) et organique dissous (NOD et POD) ainsi que les concentrations en azote et phosphore total (NT et PT) présents dans la colonne d'eau. Ces simulations sur les deux années 2017-2018 permettent d'établir une simulation de « référence » qui sera considéré comme le point de repère pour la suite de cette étude comparative de scénarios.

Les simulations réalisées à partir de ces données de forçages aux interfaces permettent maintenant d'établir le bilan des stocks d'azote et de phosphore au sein de la lagune. Ces bilans montrent que les principaux réservoirs de matières au sein de la colonne d'eau sont les macrophytes (M) et la matière organique (dissoute et particulaire : O), les compartiments nutriment (N) et phytoplancton (P) contiennent des quantités de matière beaucoup plus faible (environ 10 à 30 fois inférieur pour l'N et 10 à 50 fois inférieur pour le P). Dans la lagune, le compartiment sédimentaire est de loin le réservoir le plus important de matière avec plus de 2800 tonnes d'azote et un peu plus de 270 tonnes de phosphore. Les échanges de matière entre le sédiment et la colonne d'eau sont contrastés entre 2017 et 2018, particulièrement pour l'azote, mais montrent pour les deux éléments un stockage dans les sédiments.

Le bilan annuel des flux d'azote et de phosphore (Figure 6) indique que ces deux éléments se propagent principalement du compartiment nutriment (N) vers le compartiment macrophyte (M) puis matière organique (O) et enfin sédiment (S). Une part importante, de 51 à 54% pour l'N et de 38 à 43% du P, sont reminéralisés en nutriments depuis le sédiment. La seconde voie de reminéralisation provient de la dégradation de la matière organique. Les flux d'azote et de phosphore inorganiques absorbés par le compartiment macrophyte sont 3 à 4 fois supérieurs aux flux entrants dans le compartiment phytoplanctonique

AZIONE 2. FUNZIONAMENTO ECOLOGICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA

Indicatori e scenari idroclimatici ed ecologici

1. Funzionamento ecosistemico della laguna di Biguglia

L'implementazione del modello digitale GAMELag non è dettagliata in questo documento.

Le simulazioni fatte per gli anni 2017-2018 riproducono in modo soddisfacente le variazioni di salinità, di clorofilla a, di concentrazioni di azoto e di fosforo inorganico (NO_3NH_4 e PO_4) e di materia organica disciolta (NOD e POD) nonché le concentrazioni di azoto e di fosforo totale (NT e PT) presenti nella colonna d'acqua. Queste simulazioni nei due anni 2017-2018 consentono di stabilire una simulazione "di base" che sarà considerata come il punto di riferimento per il resto di questo studio comparativo di scenari. Le simulazioni eseguite in base a questi dati di forzature nelle interfacce consentono ora di stilare il bilancio dei depositi di azoto e di fosforo nella laguna. Questi bilanci mostrano che i principali serbatoi di materie nella colonna d'acqua sono le macrofite (M) e la materia organica (dissolta e particellare): O), i compartimenti di nutrienti (N) e di fitoplancton (P) contengono quantità di materia molto più basse (circa 10-30 volte di meno per N e 10-50 volte di meno per P). Nella laguna, il compartimento sedimentario è di gran lunga il maggiore serbatoio di materia, con più di 2800 tonnellate di azoto e poco più di 270 tonnellate di fosforo. Gli scambi di materia tra il sedimento e la colonna d'acqua sono contrastati tra il 2017 e il 2018, in particolar modo per l'azoto, mostrano tuttavia per entrambi gli elementi un deposito nei sedimenti.

Il bilancio annuale dei flussi di azoto e di fosforo (Figura 6) indica che questi due elementi si propagano principalmente dal compartimento dei nutrienti (N) al compartimento delle macrofite (M), quindi alla materia organica (O) e infine al sedimento (S). Una parte rilevante, 51-54% di N e 38-43% di P, è remineralizzata con nutrienti dal sedimento. La seconda via di remineralizzazione proviene dalla degradazione della materia organica. I flussi di azoto e di fosforo inorganici assorbiti dal compartimento delle macrofite sono da 3 a 4 volte maggiori dei flussi che entrano nel compartimento del fitoplancton.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

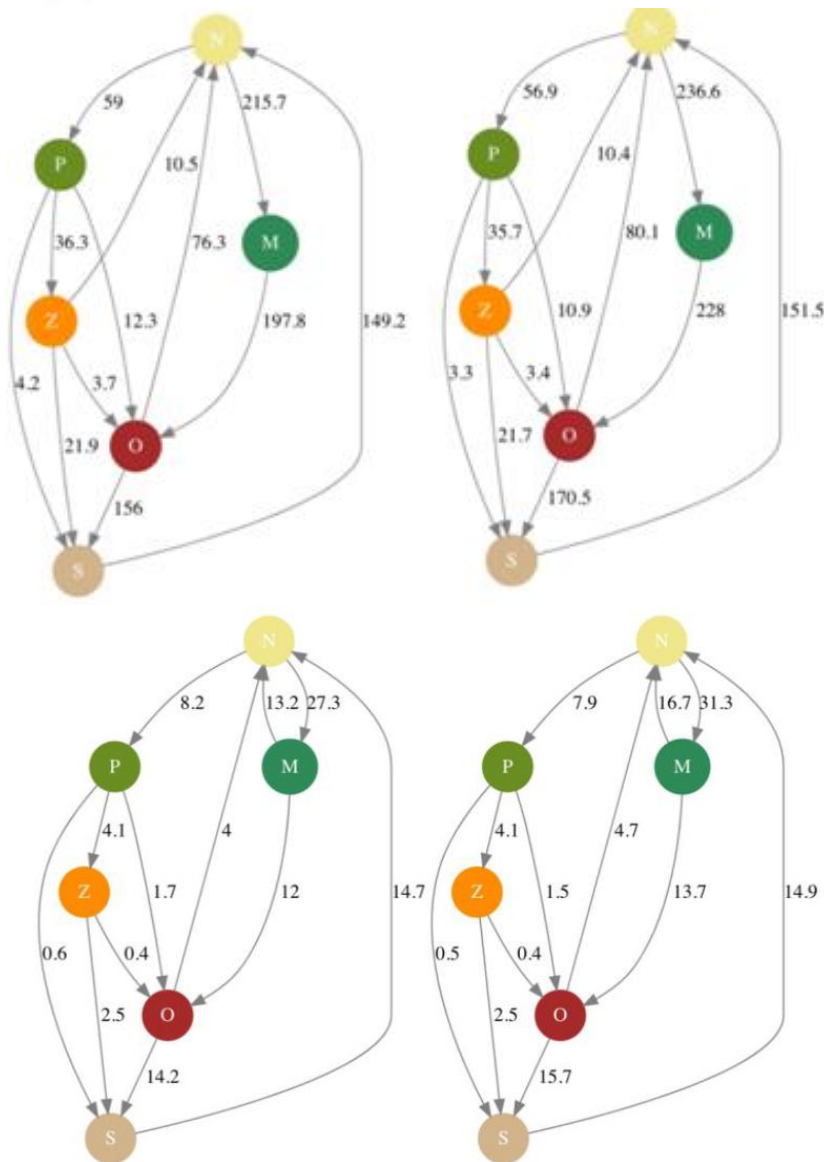


Figure 6 : Schéma des flux d'azote (en haut) et de phosphore (en bas) en tonnes entre les compartiments biologiques de l'écosystème de Biguglia pour les années 2017 (à gauche) et 2018 (à droite).

Figura 6: schema dei flussi di azoto (in alto) e di fosforo (in basso) in tonnellate tra i compartimenti biologici dell'ecosistema di Biguglia per gli anni 2017 (a sinistra) e 2018 (a destra).

2. Scenarios écologiques et fiches techniques

Scenarios écologiques

La lagune de Biguglia est soumise à une forte variabilité hydrométéorologique marquée par des cumuls de précipitation et des quantités d'eau apportées par le bassin versant qui sont contrastées. Les apports de matière sont également très variables (40 à 80 tonnes d'N et 3 à 10 tonnes de P pour une année sèche et humide respectivement). De plus, le ratio molaire des apports d'azote et de phosphore (N:P ; mole:mole) a évolué depuis le début des années 2000 à aujourd'hui entre 10 et 20 de 2000 à 2009 puis augmente de façon marquée à partir de 2010 (20-60).

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Les contrastes hydrométéorologiques associés à cette augmentation du ratio N :P dans les apports de matière depuis le bassin versant ont motivés la déclinaison de plusieurs scénarios visant à évaluer l'effet d'apports d'azote et de phosphore différents dans les conditions hydrométéorologiques 2017-2018 (sec vs humide) sur la réponse de l'écosystème de la lagune de Biguglia (Tableau 2).

Table 2 : Liste des scénarios

Scénario	Année	Azote	Phosphore	Pluviométrie
1	2017			-
2	2018			+
3	2017	100	NP = 30	-
4	2018	100	NP = 30	+
5	2017	100	NP = 10	-
6	2018	100	NP = 10	+
7	2017	20	NP = 30	-
8	2018	20	NP = 30	+
9	2017	20	NP = 10	-
10	2018	20	NP = 10	+

Les fiches techniques

Les réponses de l'écosystème Biguglia ont été évaluées au regard des sorties du modèle GAMELag : bilans hydriques et de matière aux interfaces, stock et flux d'azote et de phosphore dans les compartiments biologiques et état écologique de la lagune. Les résultats des simulations 1 à 10 sont présentés sous forme de fiches techniques regroupant ces éléments d'évaluation des réponses de l'écosystème.

Pour chacun des scénarios une fiche technique est proposée. Cette fiche regroupe 5 sections qui comprenant, tout d'abord, la **description du scénario** : année humide ou sèche, apport total d'eau, d'azote et de phosphore et le cas échéant le ratio molaire utilisé dans les apports. Un **bilan d'eau et de matière aux interfaces** de la lagune afin d'évaluer, de façon globale, les entrées et sorties. Le **diagnostic de l'état écologique** de la lagune est évalué au regard des indicateurs physico-chimiques et de biomasse phytoplanctonique. Cet état est présenté sous forme de code couleur déterminant des classes d'état (identique au code de la DCE). L'état écologique présenté est basé sur la valeur médiane et le percentile 90 pour chaque indicateur est comparé au diagnostic DCE établi en 2018. Les **flux annuels d'azote et de phosphore entre les compartiments biologiques** sont représentés et permettent de tracer les voies principales d'utilisation de ces deux éléments. Les **conséquences possibles** sur le fonctionnement global de la lagune de Biguglia sont proposées dans la dernière section.

2. Scenari ecologici e schede tecniche

Scenari ecologici

La laguna di Biguglia è soggetta a una forte variabilità idrometeorologica caratterizzata da cumuli di precipitazioni e da quantità d'acqua apportate dal bacino imbrifero che sono contrastate. Anche gli apporti di materia sono molto variabili (da 40 a 80 tonnellate di N e da 3 a 10 tonnellate di P rispettivamente per un anno secco e umido). Inoltre, il rapporto molare degli apporti di azoto e di fosforo (N:P; mole:mole) è cambiato dai primi anni 2000 ad oggi tra 10 e 20 dal 2000 al 2009 e poi aumenta in modo notevole dal 2010 (20-60). I contrasti idrometeorologici associati a questo aumento del rapporto N:P negli apporti di materia dal bacino imbrifero hanno motivato lo sviluppo di vari scenari volti a valutare l'effetto di apporti diversi di azoto e di fosforo nelle condizioni idrometeorologiche 2017-2018 (secco vs umido) sulla risposta dell'ecosistema lagunare di Biguglia (Tabella 2).

Tabella 2: Lista degli scenari

Scenario	Anno	Nitrogeno	Fosforo	Pluviometria
1	2017			-
2	2018			+
3	2017	100	NP = 30	-
4	2018	100	NP = 30	+
5	2017	100	NP = 10	-
6	2018	100	NP = 10	+
7	2017	20	NP = 30	-
8	2018	20	NP = 30	+
9	2017	20	NP = 10	-
10	2018	20	NP = 10	+

Le schede tecniche

Le risposte dell'ecosistema di Biguglia sono state valutate rispetto alle uscite del modello GAMELag: bilanci idrici e di materia nelle interfacce, deposito e flussi di azoto e di fosforo nei compartimenti biologici e lo stato ecologico della laguna. I risultati delle simulazioni da 1 a 10 sono presentati in schede tecniche che raggruppano questi elementi per valutare le risposte dell'ecosistema.

Per ogni scenario è proposta una scheda tecniche. Questa scheda presenta 5 sezioni, che includono, prima di tutto, la **descrizione dello scenario**: anno umido o secco, apporto totale di acqua, di azoto e di fosforo e, se del caso, il rapporto molare utilizzato negli apporti. Un **bilancio d'acqua e di materia nelle interfacce della laguna** per valutare, in modo globale, le entrate e le uscite. La **diagnosi dello stato ecologico** della laguna è valutata rispetto agli indicatori fisico-chimici e alla biomassa del fitoplancton. Questo stato è presentato a forma di un codice cromatico che determina le classi di stato (identico al codice della DQA). Lo stato ecologico presentato si basa sul valore medio e il percentile 90 di ogni indicatore è confrontato con la diagnosi DQA fatta nel 2018. I **flussi annuali di azoto e di fosforo tra i compartimenti biologici** sono rappresentati e permettono di tracciare i principali percorsi di utilizzo di questi due elementi. Nell'ultima sezione sono proposte le **possibili conseguenze** sul funzionamento globale della laguna di Biguglia.

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

ANNEXES

ACTION 1. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA

Indicateurs et test de scénarios hydro-climatiques

Table 1 : scénarios hydrodynamiques

Scénarios	Grau Nord	Embouchure du Golo	Pluviométrie	Débit d'eau douce au Fossone
Saison sèche A	ouvert	ouvert	Saison sèche	5% Golo
Saison sèche B	ouvert	fermée	Saison sèche	5% Golo
Saison pluvieuse A	ouvert	ouvert	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse B	ouvert	fermée	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse avec interventions A	variable	ouvert	Saison pluvieuse	5% Golo
Saison pluvieuse avec interventions B	variable	fermée	Saison pluvieuse	5% Golo
Faible pluviométrie	ouvert	ouvert	Faible pluviométrie	5% Golo
Forte pluviométrie	ouvert	fermée	Très forte pluviométrie	20% Golo

ACTION 2. FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE de la LAGUNE de BIGUGLIA

Indicateurs et test de scénarios hydro-climatiques et écologiques

Table 2 : scénarios écologiques

Scénario	Année	Azote	Phosphore	Pluviométrie
1	2017			-
2	2018			+
3	2017	100	NP = 30	-
4	2018	100	NP = 30	+
5	2017	100	NP = 10	-
6	2018	100	NP = 10	+
7	2017	20	NP = 30	-
8	2018	20	NP = 30	+
9	2017	20	NP = 10	-
10	2018	20	NP = 10	+

Dufresne C, [Fiandrino A](#), Malet N (2019) Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Indicateurs et test de scénarios hydro-climatiques. ODE/UL/LER/PAC/19-01 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57302/>
 Pete R, Malet N (2020) Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Scénarios écologiques. ODE/UL/LER-PAC/20-02 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71565/>

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

ANNESSI

AZIONE 1. FUNZIONAMENTO IDRODINAMICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA

Indicatori e test di scenari idroclimatici

Tavola 1 : Elenco degli scenari idrodinamici

Scenari	Foce nord	Foce del Golo	Pluviometria	Flusso acqua dolce al Fossone
Stagione secca A	aperto	aperto	stagione secca	5% Golo
Stagione secca B	aperto	chiuso	stagione secca	5% Golo
Stagione piovosa A	aperto	aperto	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa B	aperto	chiuso	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa con interventi A	variabile	aperto	stagione piovosa	5% Golo
Stagione piovosa con interventi B	variabile	chiuso	Saison pluvieuse	5% Golo
Pluviometria debole	aperto	aperto	pluviometria debole	5% Golo
Pluviometria forte	aperto	chiuso	pluviometria fortissima	20% Golo

AZIONE 2. FUNZIONAMENTO ECOLOGICO DELLA LAGUNA DI BIGUGLIA

Indicatori e test di scenari idroclimatici ed ecologici

Tavola 2 : Elenco degli scenari ecologici

Scenario	Anno	Nitrogeno	Fosforo	Pluviometria
1	2017			-
2	2018			+
3	2017	100	NP = 30	-
4	2018	100	NP = 30	+
5	2017	100	NP = 10	-
6	2018	100	NP = 10	+
7	2017	20	NP = 30	-
8	2018	20	NP = 30	+
9	2017	20	NP = 10	-
10	2018	20	NP = 10	+

Dufresne C, Fiandrino A, Malet N (2019) Funzionamento idrodinamico della laguna di Biguglia. Parte 3: Indicatori e test di scenari idroclimatici. ODE/UL/LER/PAC/19-01 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57302/>

Pete R, Malet N (2020) Funzionamento ecosistemico della laguna di Biguglia. Parte 3: Scenari ecologici. ODE/UL/LER-PAC/20-02 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71565/>

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée