

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

Christiane Dufresne, Nathalie Malet

Décembre 2017 – RST.ODE/UL/LER/PAC/17-14

Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia

Rapport 1 : Mise en place de la modélisation numérique 3D



Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia

Rapport 1: Mise en place de la modélisation numérique 3D

Fiche documentaire IFREMER

Numéro d'identification du rapport : RST.ODE/UL/LER/PAC/17-14 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Annie Fiandrino	date de publication : dec 2017 nombre de pages : 29 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : F
Titre de l'article Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1 : Mise en place de la modélisation numérique 3D	
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteur(s) principal(aux) : Christiane Dufresne, Nathalie Malet	
Collaborateur (s) : Jérôme Castaings, Sylvain Coudray, Annie Fiandrino	
Résumé : <p>Le projet <i>Interreg Retralags</i> vise une gestion durable du patrimoine des lagunes, des lacs et des étangs et est développée 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.</p> <p>Les deux actions IFREMER sont :</p> <ul style="list-style-type: none">- Mise en place du modèle hydrodynamique de la lagune de Biguglia, développement d'indicateur hydrologiques opérationnels et test de scenarii hydrologiques et climatiques- Mise en place du modèle écosystémique sur la lagune de Biguglia, développement d'indicateur écologiques opérationnels et test de scenarii écologiques. <p>Dans le cadre de l'action 1, ce rapport rend compte de la première partie de cette action et concerne la mise en place d'un modèle numérique tri-dimensionnel de la lagune de Biguglia. Après une brève description du site d'étude, le modèle, les forçages et les étapes de calibration et de validation sont détaillées. 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. Le modèle ici développé permettra ensuite la description du fonctionnement hydrodynamique de la lagune dans un second rapport et la simulation de plusieurs scenarii de gestion, prévu dans un troisième rapport.</p>	
Mots-clés : Modèle hydrodynamique, MARS3D, lagune, Biguglia, indicateur et scenarii hydro-climatiques	

SOMMAIRE

1. Introduction et motivations	7
2. Site d'étude	8
3. Le modèle	9
4. Les forçages	11
4.1. Bathymétrie.....	11
4.2. Données météorologiques.....	12
4.3. Données au grau.....	15
4.3.1. Hauteur d'eau.....	15
4.3.2. Température et salinité.....	16
4.4. Apports d'eau douce.....	17
4.4.1. Le Bevinco.....	17
4.4.2. Les cours d'eau temporaires.....	17
4.4.3. Le Fossone.....	18
5. Calibration et validation	21
5.1. Température et salinité.....	21
5.2. Débits et volumes d'eau échangés.....	23
5.2.1. Débits au grau.....	23
5.2.2. Volumes échangés.....	24
6. Conclusions et améliorations futures	27
7. Références	29

1. Introduction et motivations

Le projet *Interreg Retralags* vise une gestion durable du patrimoine des lagunes, des lacs et des étangs et est développée 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.

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 scénarii hydro-climatiques

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

Dans le cadre de l'**Action 1**, ce premier rapport rend compte de la mise en place d'un modèle numérique tri-dimensionnel de la lagune de Biguglia. Après une brève description du site d'étude, le modèle, les forçages et les étapes de calibration et de validation sont détaillées. 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. Le modèle ici développé permettra ensuite **la description du fonctionnement hydrodynamique de la lagune** dans un second rapport et **la simulation de plusieurs scénarii de gestion**, prévu dans un troisième rapport.

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

Rapport 1/3 : Mise en place de la modélisation numérique 3D

Rapport 2/3 : Fonctionnement hydrologique de la lagune de Biguglia (en cours, période 3)

Rapport 3/3 : Indicateurs et test de scénarii hydro-climatiques (en cours, période 3)

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

Rapport 1/3 : Mise en place du modèle écosystémique

Rapport 2/3 : Fonctionnement écologique de la lagune de Biguglia

Rapport 3/3 : Indicateurs et test de scénarii écologiques (en cours, période 3)

sommaire

2. Site d'étude

Avec une superficie de 14,5 km², 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, il s'étend parallèlement à la mer avec laquelle il communique par un grau de 1,7 km de long au nord. Au sud, le canal du Fossone permet des échanges d'eau douce avec le fleuve Golo, légèrement en amont de son estuaire, générant un apport annuel d'environ 4·10⁶ m³ (Frisoni & Dutrieux 1992). 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 an (Frisoni & Dutrieux 1992, BCEOM 2006). De petits cours d'eau temporaires alimentent aussi dans l'étang en eau douce en période de crues (San Pancrazio, Sant'Agatha, San Lorenzo, Petre Turchine, Rassignani, Mormorana). Les débits de ces fleuves à leur exutoire ne sont pas référencés à notre connaissance, mais l'apport total du bassin versant (incluant les apports du Bevinco) est compris entre 27,6 à 58 Mm³·an⁻¹ selon Frisoni & Dutrieux (1992) et estimé à 43·10⁶ m³ par Mouillot *et al.* (2000). Les précipitations (800 et 900 mm·an⁻¹) représenteraient un apport compris entre 12 Mm³·an⁻¹ (BCEOM 2006) et 14,3 Mm³·an⁻¹ (Frisoni & Dutrieux 1992, Mouillot *et al.* 2000).

Très peu profond, l'étang de Biguglia 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 180km²) comprennent l'exploitation de pêche, l'agriculture, l'élevage bovin ainsi que des zones industrielles, commerciales et touristiques. Cette urbanisation pourrait engendrer des contaminations (pollution domestiques, industrielles, agricoles) notamment dues au ruissellement qu'il est essentiel de d'anticiper. La mise en place d'un modèle hydrodynamique de l'étang permettra de mieux comprendre son fonctionnement et d'anticiper un tel risque de contamination.

3. Le modèle

→ **Un modèle hydrodynamique est une représentation virtuelle simplifiée d'une masse d'eau, qui tente de reproduire au mieux ses caractéristiques (ex : température, salinité, courants) et de simuler son évolution temporelle et spatiale.**

Le modèle de l'étang de Biguglia s'appuie sur la résolution des équations l'hydrodynamiques du code MARS3D (Lazure & Dumas 2008). La masse d'eau simulée est représentée par une grille divisée selon les trois dimensions de l'espace en plus petits volumes appelés mailles. Cette grille se caractérise par sa résolution horizontale et verticale, c'est à dire le nombre de mailles sur sa longueur et sa largeur, ainsi que selon la profondeur (niveaux verticaux). Les caractéristiques physiques de ces petits volumes d'eau sont calculées pour chacune des mailles, et évoluent dans le temps. Le temps de calcul nécessaire pour résoudre les équations hydrodynamiques augmente par ailleurs avec le nombre total de mailles de la grille. La résolution spatiale (horizontale et verticale) du modèle est alors un compromis entre un nombre de mailles assez élevé pour reproduire fidèlement la masse d'eau et répondre à la problématique scientifique d'une part, et les capacités de calcul numérique (puissance informatique) d'autre part. L'emprise géographique, la résolution spatiale et la paramétrisation (les formulations et le choix des valeurs des paramètres) définissent une configuration. Pour la configuration du modèle de Biguglia, la grille est de 66x246 mailles avec une résolution horizontale de 60m et 5 niveaux verticaux.

La masse d'eau modélisée est définie par des frontières, auxquelles sont appliquées des conditions limites. Ces conditions permettent de rendre compte des échanges et interactions entre la masse d'eau modélisée et la mer ouverte, l'atmosphère ou la bathymétrie. Au fond, la masse d'eau est contrainte par la bathymétrie et les courants sont freinés par la rugosité du fond. La couche de surface est libre et interagit avec l'atmosphère, notamment par le transfert de chaleur et le frottement dû au vent. Les échanges avec la mer ouverte sont simulés par des flux d'eau caractérisés par leur débit, leur température et leur salinité. Pour toutes les frontières (surface, fond, mer ouverte), les échanges doivent impérativement être renseignés par des données, appelées forçages. La Figure 1 schématise la résolution spatiale d'un modèle 3D et ses différents forçages.

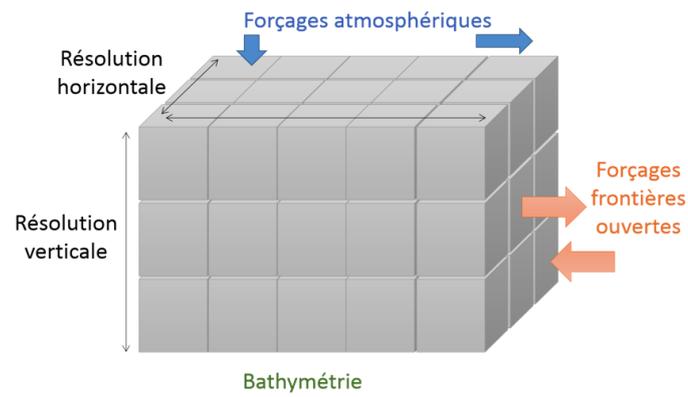


Figure 1: Schéma conceptuel d'un modèle hydrodynamique 3D sur une grille 3x5 de résolution horizontale et 3 niveaux verticaux, avec des forçages bathymétriques (vert), atmosphériques (bleu) et aux frontières ouvertes (orange).

4. Les forçages

Pour mettre en place une configuration, c'est-à-dire développer un modèle pour une zone précise, il est essentiel de fournir des données d'entrée qui correspondent au domaine géographique et à la période souhaitée.

→ **Les forçages sont des facteurs extérieurs qui influencent le milieu étudié et sont fournis comme données d'entrée dans le modèle**

Ces forçages sont pris en compte pour le calcul des échanges aux limites du modèle. Ainsi, la masse d'eau virtuelle est définie par sa bathymétrie et ses échanges avec les masses d'eau environnantes (frontières ouvertes). L'influence de l'atmosphère est simulée en surface par la lecture d'un fichier de données météorologiques et les apports d'eau douce sont renseignés aux embouchures des fleuves et exutoire des cours d'eau. Pour la configuration de l'étang de Biguglia, les forçages contiennent la **bathymétrie**, qui provient de cartes et données historiques, les **conditions météorologiques**, enregistrées par MétéoFrance à l'aéroport Bastia-Poretta, les **échanges entre la lagune et la mer**, établis *via* la lecture des débits au grau, et les **apports d'eau douce** du bassin versant.

4.1. Bathymétrie

Les données bathymétriques qui définissent la lagune virtuelle proviennent de mesures *in situ* relevées par la Réserve Naturelle de l'Etang de Biguglia (RNEB) en 1994. Elles ont été synthétisées et cartographiées à l'aide d'un Système d'Information Géographique homogène (SIG) par Orsoni & Tomasino (2015). Les données ont été interpolées sur la grille du modèle hydrodynamique décrite à la section précédente. La profondeur de l'étang est inférieure à 2m et d'une profondeur moyenne de 1,4 m.

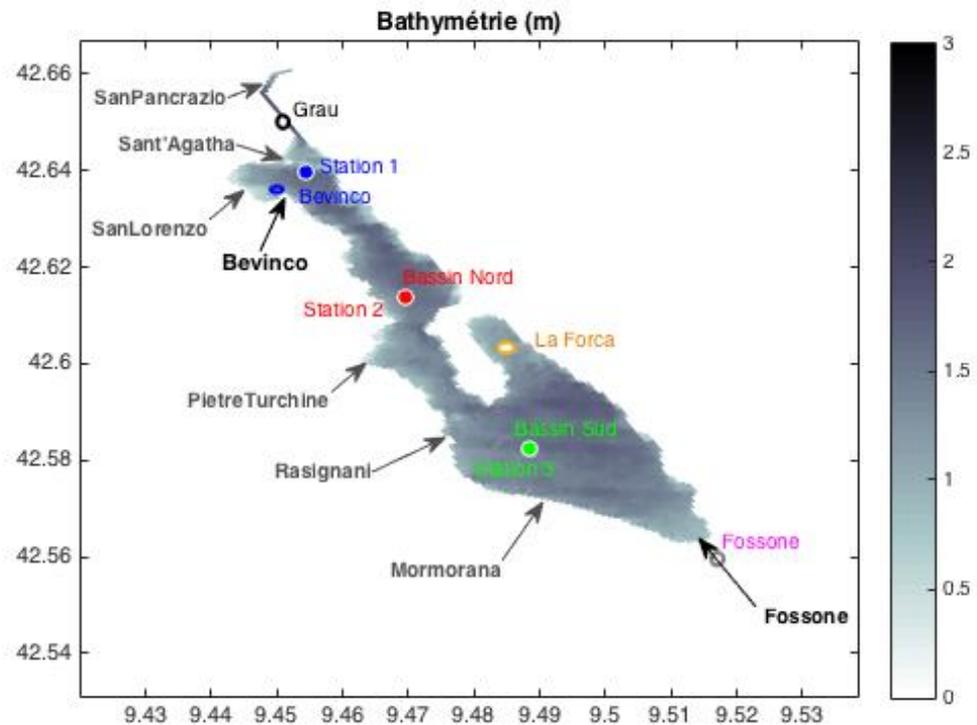


Figure 2 : Bathymétrie (m) de la lagune de Biguglia (teintes grises) interpolée sur la grille du modèle. Les points colorés représentent les points de mesures hydrologiques réalisées par l'Ifremer et la RNEB. Les flèches représentent les apports des fleuves Bevinco et Golo via le Fossone (en noir) et des cours d'eau temporaires (en gris).

4.2. Données météorologiques

Le forçage atmosphérique est essentiel pour simuler l'hydrodynamique d'une masse d'eau, notamment pour tenir compte du vent et du réchauffement de la couche de surface. Pour la configuration de l'étang de Biguglia, le forçage atmosphérique est composé de données horaires enregistrées à la station météorologique MétéoFrance de l'aéroport de Bastia-Poretta. L'intensité et la direction du vent, la pression atmosphérique, la température de l'air, l'humidité relative et la nébulosité sont considérées homogènes, c'est-à-dire identiques sur toute la lagune. Le vent joue un rôle primordial sur la dynamique de l'étang en exerçant un frottement à la surface de l'eau et en agissant comme moteur de la circulation, ce qui peut engendrer assez d'énergie pour remobiliser le fond sédimentaire (Mouillot *et al.* 2000). La Figure 3 montre l'évolution temporelle de la direction d'où provient le vent (axes des ordonnées) et de son intensité (échelle de couleurs). Par temps calme (intensité du vent inférieure à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), le vent souffle principalement du sud-ouest, comme le montrent les nombreux points de couleurs bleu-violet sur la Figure 3. Les roses des vents de la Figure 4 mettent en évidence les directions préférentielles du vent selon l'intensité. Sur la période étudiée (mars 2013 à avril 2014), le vent provient de l'ouest-sud-ouest environ 40% du temps (Figure 4a) et est alors appelé Libeccio. Cette direction est aussi privilégiée par temps calme comme l'illustre la Figure 4b. L'intensité du vent excède $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ environ 16% du temps, ce qui correspond à l'ordre de grandeur généralement observé, soit 15% du

temps selon Mouillot *et al.* (2000). Les vents forts ($>5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) favorisent les directions sud-est (le Sirocco) (25% du temps) et nord/nord-ouest (45% du temps) (Figure 4c).

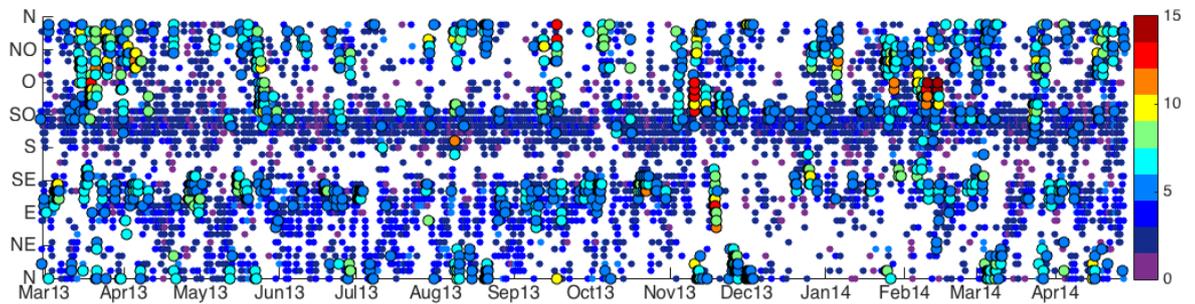


Figure 3: Direction et intensité du vent ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) pour la période simulée (mars 2013 – avril 2014). Les épisodes de vents forts ($>5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) sont marqués par des points plus gros, encerclé en noir.

Les conditions hydrologiques et hydrodynamiques de la masse d'eau seront fortement influencées par les conditions météorologiques. Le vent, dû au frottement qu'il induit sur la couche d'eau de surface, engendre des courants et favorise la circulation de la masse d'eau. La température de l'air, plus chaude en été et plus fraîche en hiver, conditionne quant à elle la température de l'eau de surface dans l'étang. Sur la période étudiée, les températures de l'air enregistrées par MétéoFrance sont comprises entre 1 et $32,9^\circ\text{C}$ avec une moyenne de $15,9^\circ\text{C}$ et un écart-type de $6,3^\circ\text{C}$. Les conditions hydrologiques de l'étang sont aussi largement influencées par les échanges avec la mer ouverte, et les données au grau sont décrites ci-après.

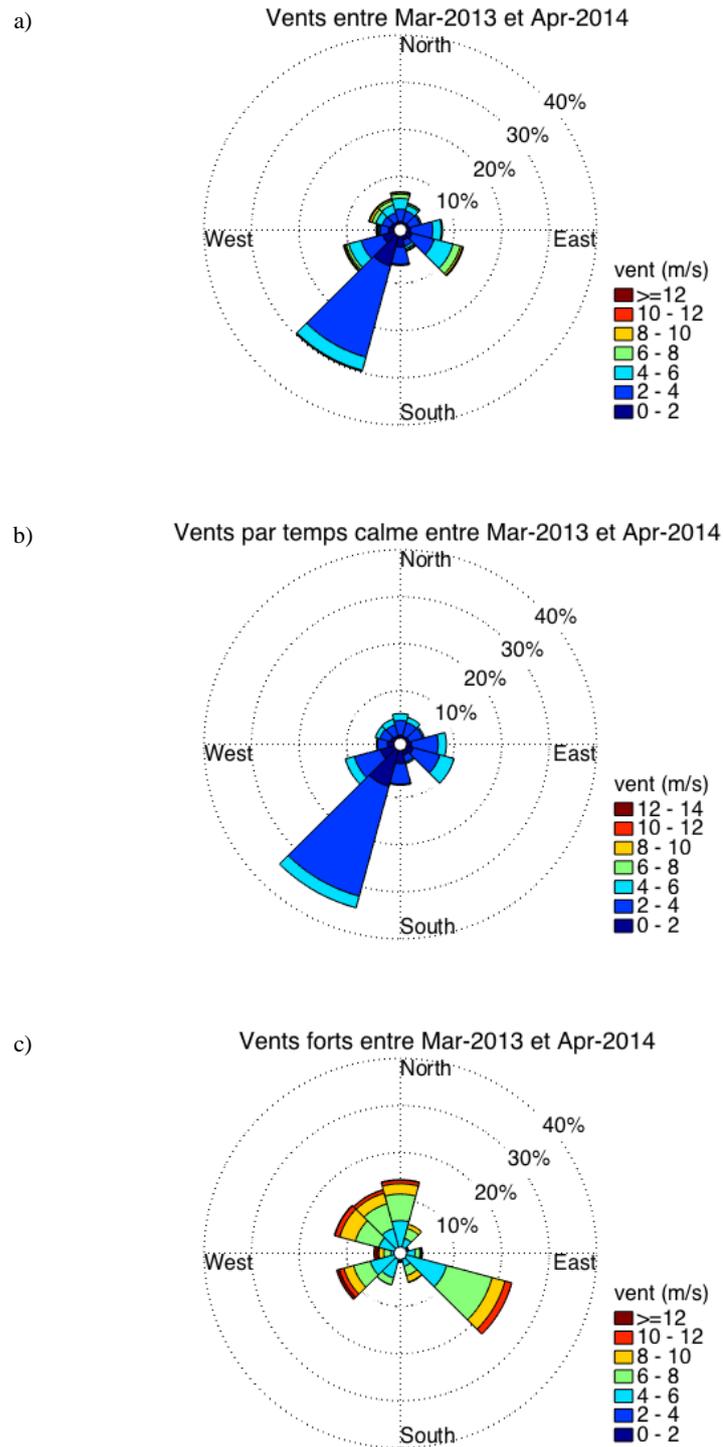


Figure 4: Roses des vents (selon leur provenance) pour la période simulée (mars 2013 à avril 2014) pour (a) tous les vents, (b) les périodes de temps calme où l'intensité du vent est inférieure à $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et (c) les périodes de vents forts où l'intensité est supérieure à $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.3. Données au grau

Les données utilisées comme forçage au grau sont issues de mesures en mer. La hauteur d'eau, la température de l'eau et la salinité ont été enregistrées entre mars 2013 et avril 2014 en mer à proximité du grau, à une profondeur d'environ 30 m afin d'éviter d'éventuelles dégradation ou perte des instruments de mesure.

4.3.1. Hauteur d'eau

Les échanges de masses d'eau entre la mer et la lagune doivent être bien représentés par le modèle, afin d'obtenir une simulation réaliste de l'étang. Le grau, qui relie la lagune à la mer, freine les courants par le frottement au fond et limite les échanges de masses d'eau entre les deux bassins. Le grau agit alors comme un filtre, dont l'impact augmente selon la section d'échange, la profondeur et la longueur du canal (Mehta & Ozsoy 1978, DiLorenzo 1988, Fiandrino *et al.* 2012). Les échanges dépendent de la différence de hauteurs d'eau entre la mer et la lagune, qui engendre un courant dans le grau dirigé vers les hauteurs les plus faibles. En mer, la hauteur d'eau dépend de la marée et des conditions météorologiques – elle varie avec le vent et la pression atmosphérique. Dans la lagune, le vent, l'évaporation et les apports d'eau douce font varier le niveau d'eau. Une hauteur d'eau plus élevée en mer, renforcée par une dépression au-dessus du bassin tyrrhénien et un vent du nord engendrerait par exemple un flux entrant plus important dans le grau. Inversement, un niveau d'eau inférieur en mer et un apport d'eau douce dans la lagune favoriseraient un flux sortant. L'élévation du niveau d'eau en mer (appelée χ_e) constitue donc un forçage essentiel pour le modèle afin de quantifier les échanges d'eau entre la lagune et la mer ouverte.

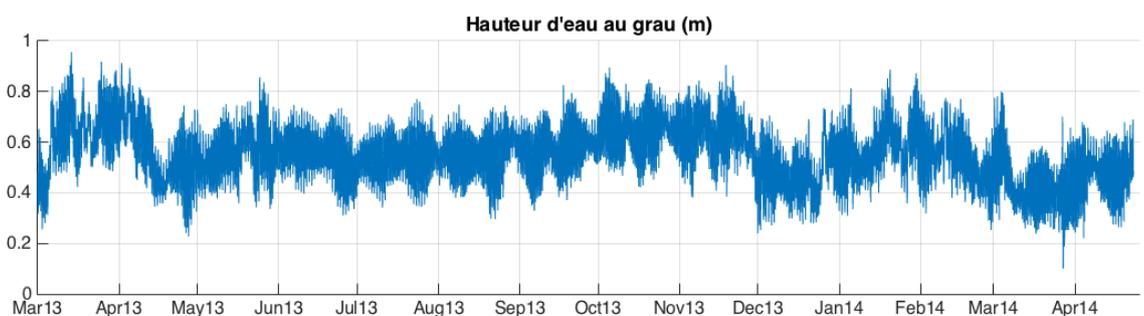


Figure 5 : Hauteur d'eau (m) enregistrée en mer et utilisée comme forçage au grau pour la période étudiée (mars 2013 – avril 2014).

La Figure 5 illustre les hauteurs d'eau enregistrées en mer et utilisées comme forçage dans le modèle. Ces données montrent des variations plus importantes en hiver (environ 70 cm d'écart), notamment en période de vents forts, comme en mars 2013. Les mois d'été montrent des variations de hauteur d'eau moins importantes, où les cycles de marées sont bien mis en évidence. Les masses d'eau échangées influencent alors les conditions hydrologiques de l'étang, *via* une variation de température et salinité due aux

entrées d'eau de mer. Ces données sont donc primordiales pour une représentation réaliste de l'étang.

4.3.2. Température et salinité

Les données de température et salinité enregistrées en mer et utilisées comme forçage au grau sont illustrées dans la Figure 6. Les valeurs de températures (trait bleu) suivent une saisonnalité marquée, avec des valeurs hivernales comprises généralement entre 13° et 14° (minimum de 12,8) et estivales entre 26° et 27° (maximum de 26,9). Les salinités, s'échelonnent entre 37,1 et 39,1 (trait rouge) et sont aussi globalement plus élevées en été due à l'évaporation, bien que cette tendance présente une forte variabilité et soit moins marquée que pour la température. Des diminutions de salinité se remarquent aussi parfois en été, comme en juin 2010 et 2011, possiblement liées à des apports d'eau douce plus importants du bassin-versant.

Par ailleurs, la fréquence d'observations n'est pas homogène sur la période étudiée. Les températures et salinités sont mesurées à une fréquence mensuelle entre 2007 et début 2013, et beaucoup plus fréquemment à compter du 23 avril 2013, alors que les données sont enregistrées à très haute fréquence (horaire). Les observations sont faites hebdomadairement pour l'été et l'automne 2013, puis redeviennent horaires en décembre 2013. Pour la période simulée (mars 2013 - avril 2014), les forçages de température et salinité au grau ont donc des pas de temps compris entre 1h et 7 jours. La Figure 6b montre le détail des conditions de température et salinité fournies au modèle pour la période d'intérêt.

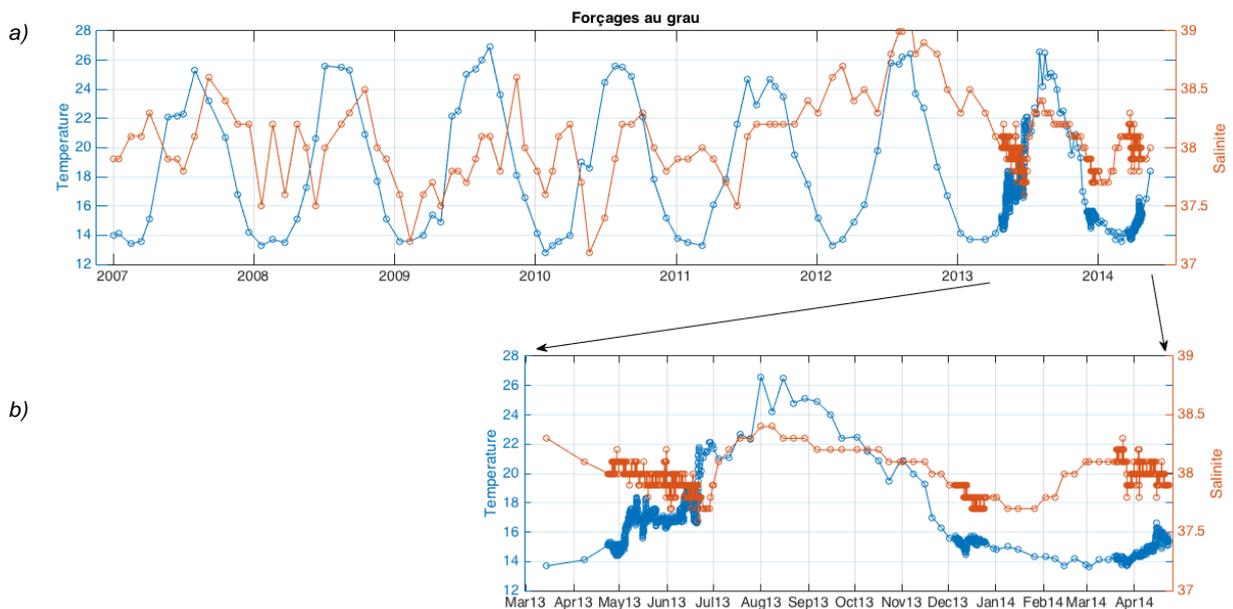


Figure 6: Evolution temporelle de la température (bleu) et de la salinité (rouge) mesurées en mer (a) entre janvier 2007 et mai 2014; et (b) le détail sur la période simulée (mars 2013 – avril 2014).

4.4. Apports d'eau douce

Les apports d'eau douce à la lagune sont dus au ruissèlement (lessivage du bassin versant) et aux fleuves et cours d'eau temporaires (localisés sur la Figure 2), largement influencés par les précipitations. Les échanges hydrogéologiques, jugés comme faibles (BCEOM 2006), seront négligés pour cette étude.

4.4.1. Le Bevinco

Le Bevinco est un fleuve de 28,1 km dont l'exutoire se situe dans le bassin nord de l'étang de Biguglia (Figure 2). Son bassin versant s'étend sur environ 70 km² et il compte une quinzaine d'affluents. Les débits utilisés comme forçages du modèle sont ceux disponibles sur le site de la BanqueHydro¹, géré par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Cette base de données synthétise les débits de nombreux fleuves français à plusieurs stations de mesures. Pour le Bevinco, la seule station est située à Olmeta-di-Tuda, à plus de 8 km de l'exutoire. Bien que ce point de mesure soit bien en amont de la lagune, ces débits sont utilisés comme données de forçage du modèle à défaut d'autres mesures (Figure 7).



Figure 7 : Débits ($m^3 \cdot s^{-1}$) quotidiens moyens du Bevinco référencés par la BanqueHydro à la station d'Olmeta-di-Tuda.

4.4.2. Les cours d'eau temporaires

En plus du fleuve Bevinco, six cours d'eau temporaires se jettent dans l'étang de Biguglia (représentés par les flèches grises de la Figure 2). Ces cours d'eau sont dits temporaires, car ils sont à sec en période d'étiage et leurs débits sont directement liés à la pluviométrie. À notre connaissance, aucune donnée n'est disponible concernant leurs apports. Afin d'estimer leurs débits, nous multiplions les débits du Bevinco par un coefficient représentant la proportion de la surface du bassin versant du cours d'eau par

¹ <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

rapport à celle du Bevinco. Ces coefficients sont regroupés dans le Tableau 1 et les débits calculés pour les six cours d'eau temporaires sont présentés à la Figure 8.

Tableau 1 : Superficie des bassins versants des cours d'eau temporaires (BCEOM 2006) et coefficients de proportionnalité de la superficie de chacun des bassins versants par rapport à celle du Bevinco

Cours d'eau	Superficie (km ²)	Coefficient
Bevinco	68	-
SanPacrazio	7,8	0,115
Sant'Agatha	7,2	0,106
SanLorenzo	2,4	0,035
PietreTurchine	9,45	0,139
Rassignani	5,55	0,082
Mormorana	9,3	0,137

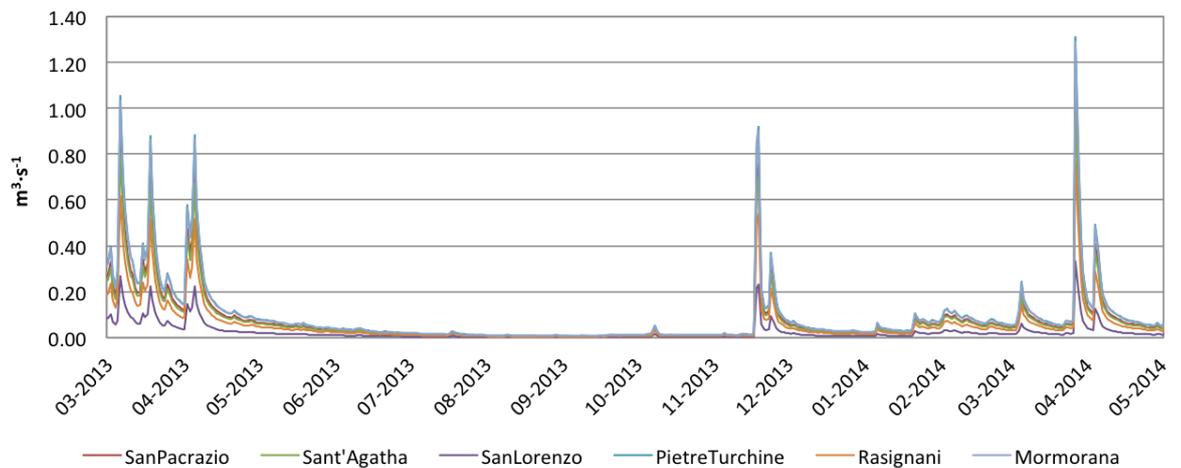


Figure 8 : Débits quotidiens moyens (m³·s⁻¹) des cours d'eau temporaires calculés à partir des coefficients de proportionnalité présentés dans le Tableau 1

4.4.3. Le Fossone

Le fleuve Golo communique à l'étang de Biguglia *via* le canal du Fossone. Bien que son embouchure se situe en mer, le Golo contribue donc aussi à l'apport d'eau douce dans la lagune. 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 ailleurs, aucune donnée de forçage (température, salinité, hauteur d'eau) n'est disponible à notre connaissance. Ainsi, nous considérons le Fossone comme un exutoire de fleuve, n'apportant que de l'eau douce. Les débits utilisés comme forçage du modèle correspondent à 5% des débits du Golo mesurés à la station Volpajola, située à une vingtaine de kilomètre en amont de l'étang. Cette estimation a été obtenue par des comparaisons de simulations réalisées avec plusieurs débits (c.f. Section 5.2.2).

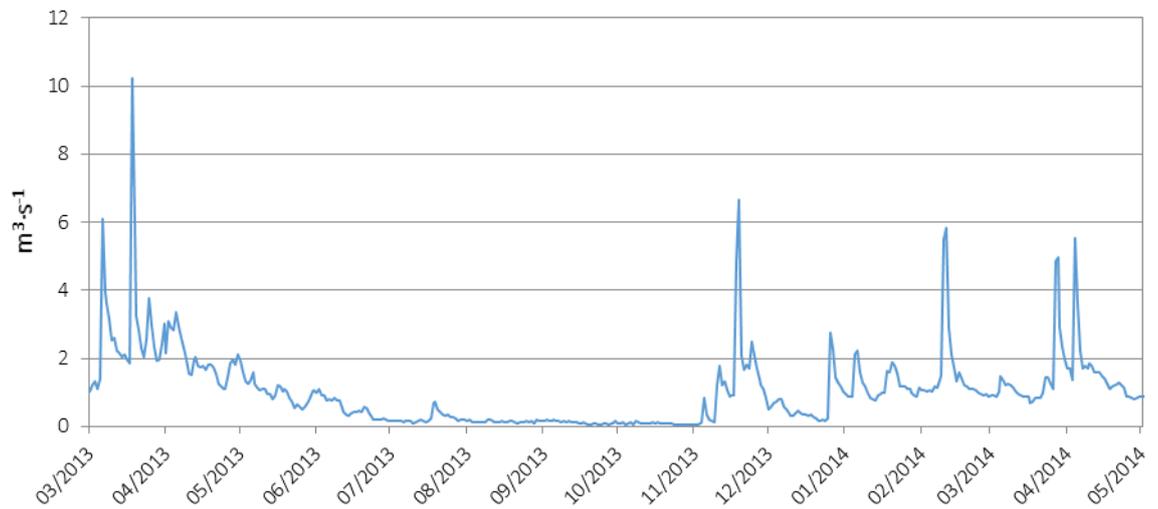


Figure 9 : Débits quotidiens moyens calculés pour le Fossone et représentant 5% des débits mesurés à la Station Volpajola du Golo

5. Calibration et validation

La mise en place d'une configuration repose sur la précision des forçages et le choix des paramètres. Afin de s'assurer du réalisme d'un modèle, les variables modélisées sont comparées à celles mesurées dans l'étang. Les paramètres sont ensuite ajustés afin d'obtenir la représentation la plus réaliste possible. Ce processus d'ajustement par itérations permet de comparer les simulations et de choisir la calibration la plus adaptée, tout en identifiant les paramètres sensibles ayant le plus d'impact sur les résultats.

5.1. Température et salinité

La masse d'eau simulée est initialisée homogène avec une salinité de 10 et une température de 12°C. Sous l'influence des forçages océaniques (*via* le grau), atmosphériques (en surface) et fluviaux (apports des bassins versants), les propriétés modélisées de la lagune varient dans le temps et dans l'espace. La Figure 10 montre l'évolution temporelle de la température (a) et de la salinité (b) modélisées à trois positions dans la lagune (nord - station S1, centre - station S2, sud - station S3), identifiées par les points colorés de la Figure 2 (respectivement bleu, rouge et vert). Les mesures sont représentées par des points colorés (sondes), des cercles (mesures faites par l'Ifremer) et des symboles (mesures faites par la Réserve Naturelle de l'Étang de Biguglia : croix en surface, losange au fond).

La température de l'eau de l'étang est très homogène (peu de différence entre les trois positions - nord, centre, sud) et suit globalement les tendances de la température de l'air (trait gris de la Figure 10a). Les températures modélisées (traits pleins) sont légèrement inférieures aux températures mesurées (points colorés), notamment au printemps et en été. À partir du mois d'octobre, le modèle représente très fidèlement la température de l'étang. Cet écart entre la température simulée et observée pourrait s'expliquer par une trop faible prise en compte du rayonnement solaire et une perte de chaleur trop importante près du fond dans le modèle.

Les données de salinité de l'étang présentent quant à elles davantage de variabilité. Notons d'abord la présence d'un gradient de salinité croissant du sud au nord, référencé par la littérature (i.e. Frisoni & Dutrieux 1992, Orsoni *et al.* 2001, Tunin-Ley *et al.* 2014, Pasqualini *et al.* 2017). La salinité est donc généralement plus faible au sud de la lagune (symboles verts sur la Figure 10b), et augmente vers le nord (symboles rouges et bleus sur la Figure 10b) pour atteindre des valeurs mesurées les plus élevées dans le grau (symboles noirs sur la Figure 10b). Ce gradient est bien représenté par le modèle, qui calcule assez bien la salinité, surtout pour les six premiers mois de simulations (traits bleu, rouge et vert sur la Figure 10b). La tendance générale d'augmentation estivale est bien modélisée, alors que la salinité s'accroît avec les entrées d'eau de mer par le grau et que les apports d'eau douce diminuent. Par ailleurs, la salinité des mois d'automne est surestimée par le modèle. Cette différence pourrait être due à une mauvaise estimation des débits des fleuves et des cours d'eau temporaires et/ou à une surestimation des échanges avec la mer *via* le grau, ce qui provoquerait une augmentation des apports d'eau de mer plus salée. Les variations de salinité dues aux crues ou entrées d'eau de mer semblent cependant bien représentées, alors qu'une importante diminution de 15 points de salinité est simulée mi-novembre et qu'une

augmentation d'environ 5 points de salinité est modélisée fin décembre. Ces variations sont de l'ordre de grandeur de celles mesurées.

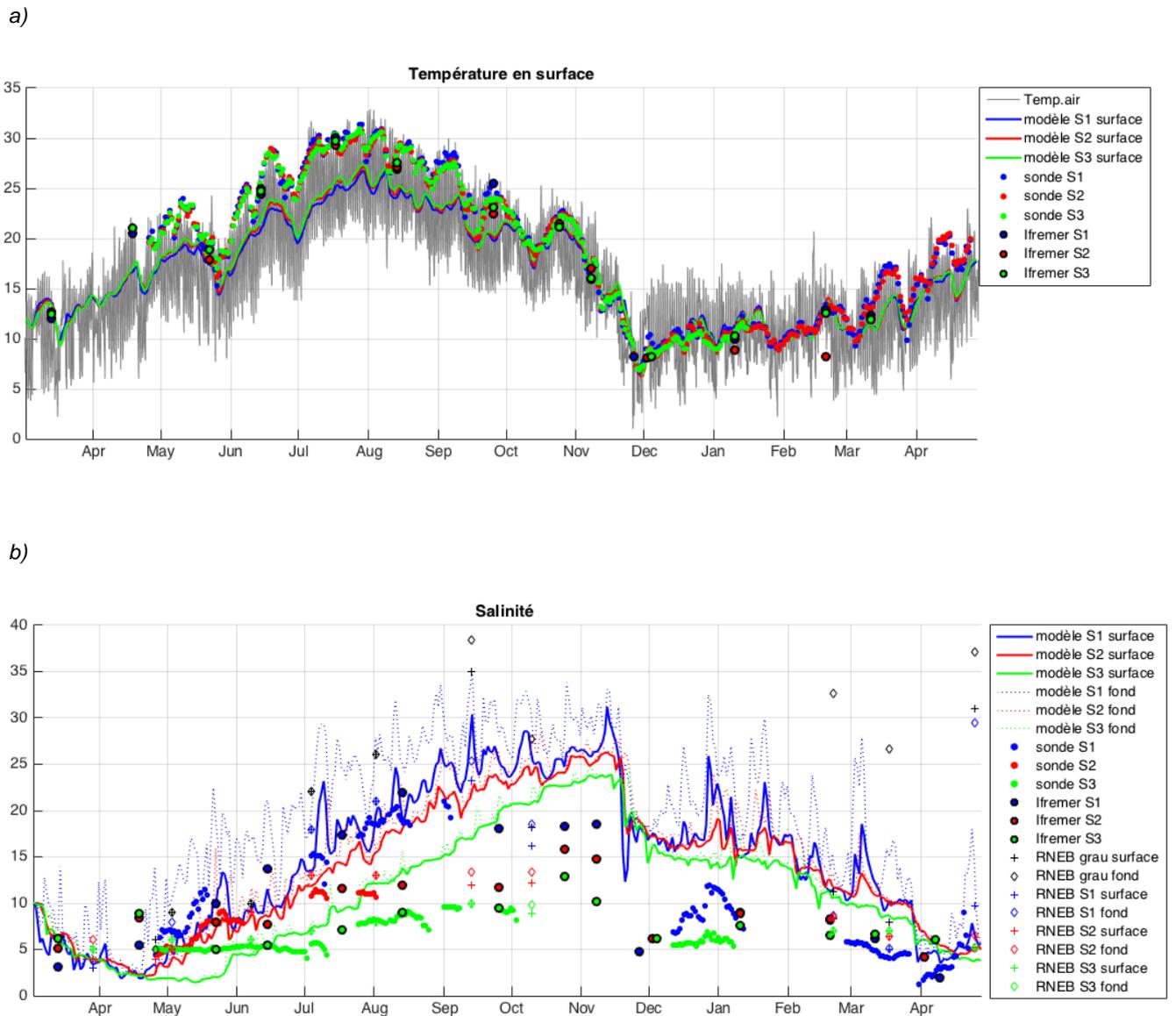


Figure 10 : (a) Température et (b) salinité de surface (trait plein) et au fond (pointillé) modélisées et mesurées (symboles - cercles, losanges, croix) aux positions S1 nord (bleu), S2 centre (rouge) et S3 sud (vert) telles qu'identifiées à la Figure 2. Le trait gris de la Figure 10a illustre la température de l'air.

Afin d'obtenir une salinité modélisée plus faible, il serait possible d'utiliser des débits plus élevés pour le Fossone, et d'estimer ses apports à 10% ou 20% ceux du Golo, par exemple. Par ailleurs, l'utilisation de tels forçages engendrerait une diminution de la salinité tout au long de la simulation, et non seulement à l'automne. Bien que la salinité serait alors mieux représentée, les valeurs modélisées pour les autres périodes seraient plus faibles. De plus, des débits plus élevés au Fossone engendreraient automatiquement une augmentation de l'apport total d'eau douce à l'étang, ce qui augmenterait le niveau

d'eau modélisé dans la lagune. Une telle élévation de niveau accentuerait ainsi les flux d'eau sortants par le grau. Une augmentation du volume d'eau sortant de la lagune n'est cependant pas souhaitable, puisqu'en plus de représenter avec justesse la température et la salinité de l'étang, le modèle doit aussi simuler de manière réaliste les échanges dans le grau.

5.2. Débits et volumes d'eau échangés

Les caractéristiques hydrologiques de la lagune reposent largement sur les interactions avec la mer *via* le grau. Afin d'obtenir une représentation réaliste, il est donc essentiel de valider les échanges de masse d'eau entre ces deux bassins. Les débits mesurés dans le grau et ceux calculés par le modèle sont comparés dans le but d'obtenir une simulation la plus réaliste possible. Les débits *in situ* sont estimés à partir de données de hauteurs d'eau enregistrées simultanément dans la lagune et en mer au printemps 2013 (Tunin-Ley *et al.* 2014). Des mesures ponctuelles de débits ont également été réalisées à l'aide de courantomètre en avril 2014 (Castaings communication personnelle), puis en mars 2017.

5.2.1. Débits au grau

À partir des simulations, le débit modélisé (D) est calculé à partir du courant (u) simulé dans la maille correspondant au grau, multiplié par la section. Cette dernière est estimée par le produit de la largeur de la maille (dy) et de la hauteur d'eau, représentée par la somme de la hauteur d'eau moyenne de la bathymétrie ($H0$) et de l'élévation du niveau d'eau (xe). Le calcul des débits modélisés D est représenté par l'équation Eq. 1:

$$D = u \cdot dy \cdot (H0 + xe)$$

Eq. 1

Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'obtenir des débits modélisés les plus près possibles de ceux mesurés *in situ*. Les paramètres modifiés pour quelques simulations sont synthétisés dans le Tableau 2. D'autres simulations ont aussi été réalisées pour calibrer le frottement au fond (*via* la longueur de rugosité $z0$) et le mélange vertical (non présentées). Pour toutes les simulations présentées ici, le frottement au fond a été augmenté sur toute la longueur du chenal du grau (où $z0$ est multiplié par 8), afin de freiner les courants et diminuer les intensités des débits. La largeur de la maille du grau a été modifiée afin de limiter les échanges mer/lagune. Enfin, différentes valeurs de forçages d'apports d'eau douce ont été prises en compte. Les débits du Fossone ont été estimés en proportion des débits du Golo et les cours d'eau temporaires ont été ajoutés.

Tableau 2 : Paramètres des simulations modélisées

Simulation	Largeur de la maille au grau	Débits du Fossone (% des débits du Golo)	Fleuves pris en compte
diag1	1/3	20	Bevinco, Fossone
diag2	1/2	20	Bevinco, Fossone
diag4	1/3	10	Bevinco, Fossone
diag9	1/3	10	Bevinco, Fossone + 6 cours d'eau temporaires
diag10	1/3	5	Bevinco, Fossone + 6 cours d'eau temporaires

Les débits modélisés pour toutes les simulations sont inférieurs à ceux calculés à partir des hauteurs d'eau (en gris sur la Figure 11) pour la période mai-juillet 2013. Par ailleurs, les débits modélisés pour les mois de mars et avril 2013 sont de l'ordre de grandeur de ceux calculés (mai-juillet 2013) et sont compris entre les valeurs maximales et minimales mesurées par courantométrie en avril 2014 et mars 2017 (traits noirs sur la Figure 11). Les débits quotidiens moyens sont toutefois difficiles à représenter avec précision par le modèle et le volume d'eau échangé demeure le paramètre essentiel à la bonne représentation de l'étang virtuel.

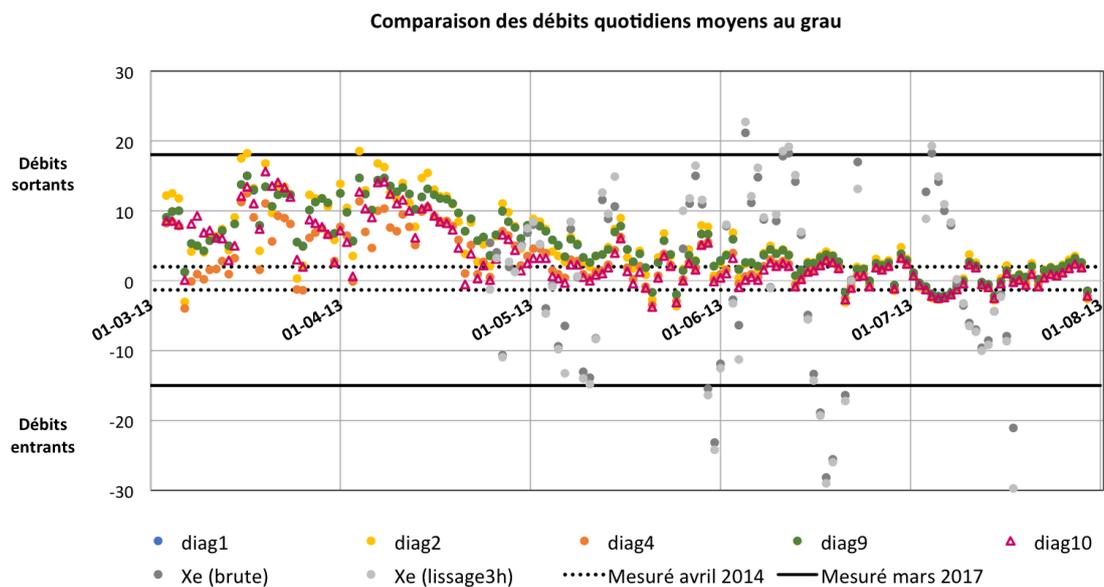


Figure 11 : Comparaison des débits quotidiens moyens au grau calculés par différences de mesures de hauteur d'eau (X_e) (gris) et calculés par le modèle pour différentes simulations (couleurs) entre mars et juillet 2013

5.2.2. Volumes échangés

Les volumes échangés correspondent aux volumes d'eau entrant et sortant de la lagune par le grau, dont la somme, positive ou négative, représente le bilan. Les volumes échangés au grau cumulés dans le temps sont présentés à Figure 12 pour les différentes

simulations (couleurs). Les valeurs des bilans annuels recensés dans la littérature (Frisoni & Dutrieux 1992, BCEOM 2006, Castaings communication personnelle) sont également représentées par les bandes grisées et regroupés dans le Tableau 3. Les simulations *diag1* (bleu) et *diag2* (jaune) montrent des volumes échangés cumulés qui atteignent les valeurs de l'ordre de ceux des bilans annuels après 4 mois seulement, ce qui dénote une surestimation des échanges modélisés. Ces gros volumes d'eau sortants sont probablement dus à l'utilisation des forçages du Fossone correspondant à 20% des débits du Golo. Avec un forçage au Fossone de 10% des apports du Golo, les volumes cumulés échangés au grau diminuent environ de moitié (*diag4* - orange). En tenant compte des cours d'eau temporaires (*diag9*, *diag10*), les échanges cumulés augmentent et une bonne estimation des volumes échangés est faite par la simulation *diag10* (rose), alors que les apports en eau douce du Fossone correspondent à 5% des débits du Golo. Cette simulation modélise en effet des volumes échangés du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans la littérature (Tableau 3).

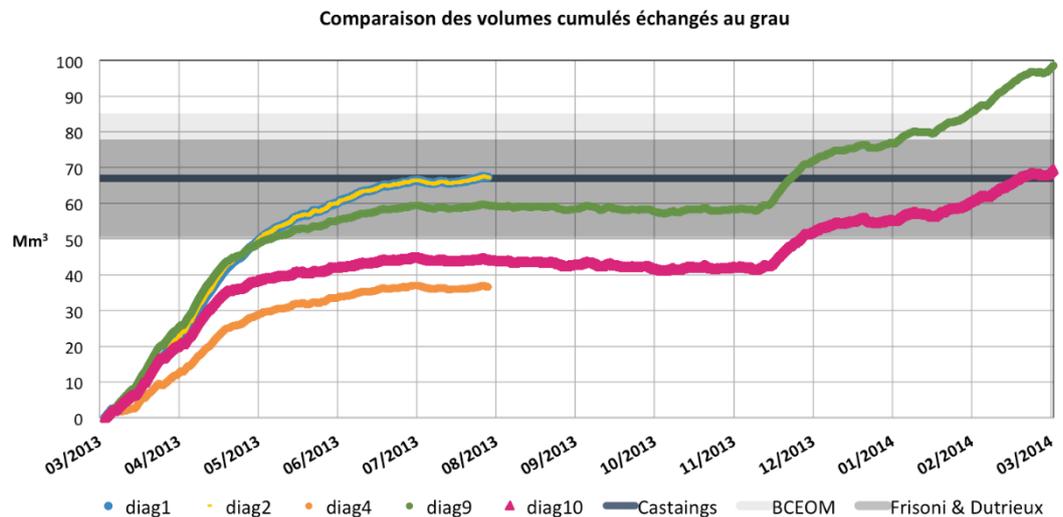


Figure 12 : Comparaison des volumes cumulés échangés au grau calculés par le modèle pour les simulations *diag1* (bleu), *diag2* (jaune) et *diag4* (orange) entre mars et juillet 2013 et pour les simulations *diag9* (vert) et *diag10* (rose) entre mars 2013 et mars 2014

Tableau 3 : Bilan hydrique au grau en Mm³/an pour les études référencées par la littérature et deux simulations (*diag9*, *diag10*).

Études ou simulations	Volumes entrants	Volumes sortants	Bilan
Frisoni & Dutrieux (1992)	-10 à -15	58 à 91	43 à 81
BCEOM (2006)	-10 à -91	26 à 155	43 à 93
Castaings (communication personnelle)	-	-	67
<i>diag9</i>	-66	161	95

diag10

-74

142

68

6. Conclusions et améliorations futures

Un modèle hydrodynamique de l'étang de Biguglia est mis en place à l'aide du code de calcul MARS-3D. La configuration est définie par une grille de 66x246 mailles horizontales de 60m et 5 niveaux verticaux. Les données météorologiques enregistrées à la station Bastia-Poretta constituent un forçage atmosphérique homogène, alors que les débits disponibles sur la BanqueHydro sont utilisés pour les forçages du Bevinco, du Fossone et des 6 cours d'eau temporaires. Les échanges au grau sont calculés à partir de données enregistrées en mer, sur la période simulée (mars 2013 – avril 2014). Les échanges et apports d'eau sont donc situés :

- Grau au nord de l'étang : échange avec la mer
- Bevinco (débits issus de la BanqueHydro)
- Cours d'eau temporaires : débits estimés selon la proportion de la superficie de leur bassin versant respectif par rapport à celle du Bevinco
- Fossone : considéré comme un cours d'eau dont les débits représentent 5% ceux du Golo

Une représentation fidèle de l'étang est simulée avec les paramètres de calibration synthétisés dans le Tableau 4. Bien que la salinité modélisée dans l'étang soit surestimée les mois d'été, les paramètres hydrologiques du modèle sont similaires à ceux mesurés. Les volumes d'eau échangés avec la mer sont aussi du même ordre de grandeur que ceux observés.

Tableau 4 : Paramètres de calibration du modèle de l'étang de Biguglia et forçages utilisés

Paramètres	
Largeur de la maille au grau	20 m
Longueur de rugosité du fond dans le chenal du grau	$8 \cdot z_0 = 0.028$ m
Débits des fleuves	
Fossone	5% des débits du Golo
Bevinco	Banque Hydro
Cours d'eau temporaires	Débits du Bevinco multipliés par le rapport entre la surface de leur bassin versant et de celui du Bevinco

Afin d'augmenter la fiabilité du modèle mis en place, certaines améliorations sont proposées. Des forçages précis permettraient dans un premier temps de mieux représenter la masse d'eau de la lagune. Les données d'entrée au grau sont issues de mesures en mer, réalisées à une profondeur d'environ 30 m, afin d'éviter la dégradation ou la perte d'instruments de mesures. Ces mesures peuvent donc induire un écart entre

les températures et salinités de la masse d'eau qui entre réellement dans le grau en surface, probablement plus chaude en été et plus froide en hiver que celles enregistrées à 30m. De plus, une meilleure connaissance des débits du Bevinco à son embouchure et des apports des cours d'eau temporaires permettrait notamment une représentation plus fidèle des variations de salinité à proximité des exutoires. Dans sa version actuelle, le modèle ne tient pas compte des apports d'eaux souterraines et des débits de stations de pompage. Bien que négligeables face aux autres apports d'eau douce, ces forçages pourraient être ajoutés afin d'en étudier l'impact.

Par ailleurs, une étude approfondie sur les échanges au Fossone apparaît essentielle. En effet, le canal reliant le Golo au bassin sud de la lagune peut agir comme un grau en période d'étiage (à l'exception des périodes de fermeture de l'estuaire), favorisant ainsi des échanges avec la mer. Les apports d'eau saumâtre du Fossone dépassent ainsi fréquemment les 10 points de salinité (mesures effectuées dans le canal par la RNEB), ce qui démontre une entrée d'eaux marines. Une campagne de mesures des débits ainsi que l'enregistrement de la température et de la salinité dans le Fossone amélioreraient notre compréhension des échanges mer-lagune. Par leur impact sur la salinité, les interactions entre l'étang et la mer influencent directement l'écosystème lagunaire, dont une meilleure compréhension s'appuiera sur une bonne connaissance de ces échanges.

Malgré une meilleure représentation de l'étang grâce aux perspectives d'amélioration proposées plus haut, une description fidèle de son fonctionnement pourra néanmoins être établie grâce à l'outil de modélisation dans son état actuel. Le prochain volet de cette étude portera sur la description du fonctionnement de l'étang de Biguglia à l'aide du modèle et d'une climatologie moyenne, ce qui permettra une étude plus approfondie des temps de résidence et de mélange, ainsi qu'une analyse de la variabilité spatio-temporelle de ses variables hydrologiques.

7. Références

BCEOM (2006). Etang de Biguglia. Etude hydrologique sur le périmètre de schéma d'aménagement et de gestion des eaux.

DiLorenzo, J. L. (1988). The overtide and filtering response of small inlet/bay systems. *Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*, Springer: 24-53.

Fiandrino, A., A. Giraud, S. Robin and C. Pinatel (2012). Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes et définition d'indicateurs hydrodynamiques associés, Ifremer.

Frisoni, G. and E. Dutrieux (1992). L'etang de Biguglia: Diagnostic écologique 1991-1992. Rapp. IARE, Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement.

Lazure, P. and F. Dumas (2008). "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)." *Advances in Water Resources* 31(2): 233-250.

Mehta, A. and E. Ozsoy (1978). "Inlet hydraulics." *Stability of Tidal Inlets*, Elsevier: 83-161.

Mouillot, D., A. Titeux, C. Migon, V. Sandroni, J.-P. Frodello and D. Viale (2000). "Anthropogenic influences on a mediterranean Nature Reserve: modelling and forecasting." *Environmental Modeling & Assessment* 5(4): 185-192.

Orsoni, V., P. Souchu and D. Sauzade (2001). Caractérisation de l'état d'eutrophisation des trois principaux étangs corses (Biguglia, Diana et Urbino), et proposition de renforcement de leur surveillance. Rapport final, Ifremer.

Orsoni, V. and C. Tomasino (2015). Bathymétrie de l'étang de Biguglia : Synthèse et cartographie, Ifremer.

Pasqualini, V., V. r. Derolez, M. Garrido, V. r. Orsoni, Y. Baldi, S. Etourneau, V. Leoni, P. Rébillout, T. Laugier, P. Souchu and N. Malet (2017). Spatiotemporal dynamics of submerged macrophyte status and watershed exploitation in a Mediterranean coastal lagoon: Understanding critical factors in ecosystem degradation and restoration. 102: 1-14.

Tunin-Ley, A., N. Malet, A. Fiandrino, V. Orsoni and Y. Baldi (2014). Estimation des Échanges entre la mer et la lagune de Biguglia: Utilisation de la méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes par différence de hauteurs d'eau, Ifremer: 22.