

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

Christiane Dufresne, Nathalie Malet

Juillet 2018 – RST.ODE/UL/LER/PAC/18-05

Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia

Rapport 2 : Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique

Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia

Rapport 2: Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique

Fiche documentaire IFREMER

Numéro d'identification du rapport : RST.ODE/UL/LER/PAC/18-05 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Annie Fiandrino	date de publication : Juil 2018 nombre de pages : 36 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : F
Titre de l'article Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 2 : Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique	
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteur(s) principal(aux) : Christiane Dufresne, Nathalie Malet	
Collaborateur (s) : Annie Fiandrino, Sylvain Coudray	
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">- Action 1 : Mise en place du modèle hydrodynamique de la lagune de Biguglia, développement d'indicateur hydrologiques opérationnels et test de scénarii hydrologiques et climatiques- Action 2 : Mise en place du modèle écosystémique sur la lagune de Biguglia, développement d'indicateur écologiques opérationnels et test de scénarii écologiques. <p>Dans le cadre de <u>l'action 1</u>, ce rapport fait suite à la mise en place du modèle hydrodynamique sur la lagune (rapport 1/3) et rend compte de la seconde partie de cette action, l'étude du fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de la lagune de Biguglia (rapport 2/3). Le modèle hydrodynamique développé ainsi que la description du fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de la lagune permettront la définition des indicateurs hydrodynamiques et hydrologiques et la simulation de plusieurs scénarii (rapport 3/3).</p>	
Mots-clés : Modèle hydrodynamique, MARS3D, lagune, Biguglia, indicateurs et scénarii hydro-climatiques	

Liste des figures

Figure 1 : 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 foncé).	11
Figure 2 : Rose des vents à Bastia-Poretta entre 1990-2017 pour les vents quotidiens moyens (a) et pour les vents quotidiens moyens d’intensité supérieure à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (b)	13
Figure 3 : « Heat-map plot » des journées de vent : (a) nombre de journées ventées mensuelle enregistrée à la Station Bastia-Poretta entre 1990 et 2017; (b) moyenne mensuelle du nombre de journées ventées ; (c) nombre de journées ventées cumulées annuellement et moyenne pluriannuelle (trait noir).....	14
Figure 4 : « 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 ^{ième} et 75 ^{ième} 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)	15
Figure 5 : Proportion (%) des cumuls de pluie d’octobre à décembre (bleu) et de janvier à avril (rouge) entre 1990 et 2017 à Bastia-Poretta.	16
Figure 6 : a) Température de l’air (gris) et de l’eau en surface mesurée (cercles) et modélisée (lignes) ; b) différences entre les températures modélisées et mesurées aux points aux points S1 (bleu), S2 (rouge) et S3 (vert). Les boxplot (c) représentent la valeur médiane (trait rouge), les 25 ^{ième} et 75 ^{ième} percentiles (bleu) et les valeurs minimales et maximales (pattes noires) aux points S1, S2, S3.	17
Figure 7 : (a) Mesures de salinité réalisées en été dans le cadre des RSL au point S1 (bleu), S2 (rouge) et S3 (vert) depuis 1999. Des mesures mensuelles ont été réalisées entre mai 2012 et novembre 2013 (b)..	18
Figure 8 : Condition d’ouverture ou de fermeture de l’embouchure du grau nord de la lagune à partir des observations du suivi d’intervention	19
Figure 9 : Synthèse de toutes les 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).....	21
Figure 10 : Hauteur d’eau (m) dans le bassin nord (S1) pour les 4 simulations	21
Figure 11: Carte de la moyenne annuelle de la tension de fond des roses des courant de surface pour les 3 points S1 (nord), S2 (centre), S3 (sud).....	22
Figure 12 : Roses des courants de surface aux points S1-nord (a), S2-centre (b) et S3-sud (c).....	23
Figure 13 : Débits modélisés au grau nord (bleu) et dans le canal du Fossone (rouge) pour l’année 2013 (simulation 1)	24
Figure 14 : Bilan hydrique des simulations 1 (—), 2 (---) et 3 (-·-·-) aux mailles correspondant au grau nord (bleu foncé), au grau sud (cyan), à l’embouchure du Bevinco (rouge) et à l’arrivée du Golo dans le Fossone (magenta). Les traits noirs représentent la somme de ces 4 apports (les cours d’eau temporaires sont négligés) et les zones grisées rappellent les bilans hydriques et les apports totaux du bassin versants estimés par la littérature.	26
Figure 15 : Temps de résidence (jours) calculés pour les simulations 1 (a), 2 (b) et 3 (c). Les cercles noirs (o) indiquent la localisation des temps les plus longs.	27
Figure 16 : Temps de renouvellement théoriques (jours) selon la proportion du volume de la lagune qui est mélangé.....	28
Figure 17 : Identification de zones hydrodynamiques d’après les volumes de mélange	29
Figure 18: a) Comparaison des salinités modélisées (trait) et mesurées (points) pour les station S1 (bleu), S2 (rouge) et S3(vert) (a) ; différences entre les valeurs modélisées et mesurées (b) ; et boxplot pour chaque station (c).	32
Figure 19: a) Comparaison des hauteurs d’eau modélisées (trait) et mesurées (points) pour les station S1 (bleu), S2 (rouge) et S3(vert) (a) ; différences entre les valeurs modélisées et mesurées (b) ; et boxplot pour chaque station (c).	33

Liste des tableaux

Tableau 1 : Scénarios simulés	19
Tableau 2 : Débits modélisés et mesurés au grau nord et débits modélisés à la maille d'arrivée du Fossone dans l'étang pour les quatre simulations dont les conditions d'ouverture (O) et de fermeture (F) et les débits du Golo sont rappelés. Les tirets (---) indiquent des valeurs aberrantes	24
Tableau 3 : Volumes (en million de m ³) échangés annuellement au grau nord et au Fossone pour les 4 simulations	25
Tableau 4 : Bilan hydrique au grau nord en Mm ³ /an pour les études référencées par la littérature et la configuration initiale* (Repris de Dufresne et al. 2017)	25
Tableau 5 : Temps de renouvellement et de résidence calculés dans la lagune pour les simulations 1 à 3	27

Sommaire

1. Introduction et motivations	8
2. Méthodologie	9
2.1. Site d'étude	9
2.2. Observations	10
2.2.1. Données météorologiques	10
2.2.2. Données hydrologiques	10
2.3. Modélisation	10
3. Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique	12
3.1. Contexte hydro-climatique	12
3.1.1. Le vent	12
3.1.2. La pluviométrie	14
3.2. Hydrologie	16
3.2.1. Température	16
3.2.2. Salinité	17
3.2.1. Impact de l'état des embouchures sur l'hydrologie	19
3.3. Circulation et hydrodynamique	21
3.3.1. Courants	21
3.3.2. Débits et volumes échangés	23
3.4. Indicateurs hydrodynamiques	26
3.4.1. Temps de renouvellement et de résidence	26
3.4.1. Volume de mélange	27
4. Conclusions et améliorations futures	30
5. Annexes	31
5.1. Annexe 1	31
5.2. Annexe 2	32
5.3. Annexe 3	33
5.4. Annexe 4	34
6. Références	35

1. Introduction et motivations

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.

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

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

Dans le cadre de **l'Action 1**, ce second rapport rend compte de l'étude du fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de l'étang de Biguglia. Après une brève description du site d'étude, des données utilisées et de la stratégie de modélisation, une description détaillée du contexte hydro-climatique, de l'hydrologie et de l'hydrodynamique est proposée. 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. La **description du fonctionnement hydrodynamique de la lagune** et des principales contraintes de fonctionnement permettront la **simulation de plusieurs scénarii**, 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 scénarios hydrolo-climatiques

- Rapport 1/3 : Mise en place de la modélisation numérique 3D
- Rapport 2/3 : Fonctionnement hydrologique de la lagune de Biguglia
- Rapport 3/3 : Indicateurs et test de scénarios 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 scénarios écologiques – Plan provisoire

- 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 scénarios écologiques

2. Méthodologie

2.1. Site d'étude

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 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, l'étang de Biguglia est le plus vaste des étangs de Corse et représente près de la moitié de ses zones humides. L'établissement d'une carte bathymétrique récente (Orsoni and Tomasino 2015) a permis la mise en place d'une configuration du modèle de l'étang qui suggère un volume estimé de 18 Mm³ (Dufresne et al. 2017). Dans le passé, le volume de l'étang avait été estimé entre 10,2 Mm³ (Frisoni and Dutrieux 1992) et 38 Mm³ (Orsoni et al. 2001).

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 (Frisoni & Dutrieux 1992). Les apports d'eau douce sont engendrés par le ruissellement (lessivage du bassin versant) et par les fleuves et les cours d'eau temporaires (localisés sur la Figure 1), 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 an (Frisoni & Dutrieux 1992, BCEOM 2006). Ce fleuve d'une longueur de 28,1 km compte une quinzaine d'affluents et draine un bassin versant d'environ 70 km². 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 Mm³ 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).

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). Les échanges hydrogéologiques, jugés comme faibles (BCEOM 2006), seront négligés pour cette étude.

2.2.Observations

2.2.1. Données météorologiques

Les données météorologiques étudiées sont issues des moyennes quotidiennes de la station Météo-France de l'aéroport Bastia-Poretta (10 m d'altitude), située à moins d'1 km au sud de l'étang. Les données d'intensité et de direction du vent enregistrées à 10m au dessus du sol et de cumul quotidien de pluie depuis 1990 sont étudiées.

2.2.2. Données hydrologiques

Des données de température et de salinité ont été mesurées à plusieurs localisations dans l'étang, dans le cadre de divers projets. Pour l'étude des Réseaux de Suivi Lagunaire (RSL), des mesures ponctuelles sont réalisées les mois d'été, depuis 1999. En 2010, des mesures mensuelles (Garrido et al. 2016) ont permis de couvrir une année entière. Le mouillage de sondes multiparamètres (NKE-STPS) a permis l'enregistrement en continu des mesures de température, salinité et hauteurs d'eau entre avril 2013 et avril 2014 dans le bassin nord et dans le bassin sud.

Les valeurs de volumes d'eau échangés et de débits *in situ* proviennent d'une étude sur les échanges entre l'étang et la mer et s'appuient sur la méthode des variations de hauteur d'eau (Tunin-Ley et al. 2014). Des mesures complémentaires de débits ont été réalisées ponctuellement en mars, avril et septembre 2017 (Kervella and Curti 2017).

2.3.Modélisation

Le modèle hydrodynamique de l'étang de Biguglia est une représentation virtuelle simplifiée de sa masse d'eau qui reproduit au mieux ses caractéristiques (ex : température, salinité, courants) et simule leurs évolutions temporelles et spatiales. Il s'appuie sur la résolution des équations hydrodynamiques du code MARS3D (Lazure & Dumas 2008) et sa configuration repose sur une grille de 66x246 mailles de 60 m et de 5 niveaux verticaux.

Détaillée et validée par Dufresne et al. (2017), la configuration s'appuie sur de nombreuses mesures *in situ*. Les données bathymétriques proviennent de mesures 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), et interpolées sur la grille du modèle hydrodynamique (Figure 1). La profondeur de l'étang est inférieure à 2m et d'une profondeur moyenne de 1,4 m.

La couche de surface est libre et interagit avec l'atmosphère, notamment par le transfert de chaleur et le frottement dû au vent. Les forçages atmosphériques utilisés sont issus d'enregistrement à la station météorologique de l'aéroport Bastia-Poretta, situé au sud de l'étang, et sont appliqués de manière homogène sur tout le domaine numérique. 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.

Les apports d'eau douce sont renseignés aux embouchures des fleuves et des exutoires des cours d'eau temporaires. Les débits du Bevinco sont issus de la BanqueHydro¹, géré par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Les débits des cours d'eau temporaires sont estimés à partir des débits du Bevinco, multipliés par leur coefficient de surface respectif. Ce coefficient représente le rapport entre la surface du bassin versant de chaque cours d'eau et celle du bassin versant du Bevinco (détails dans Dufresne et al. 2017). Les débits du canal du Fossone sont estimés à 5% de ceux du fleuve Golo, mesurés à la station Volpajola, située à une vingtaine de kilomètre en amont de l'étang (disponibles sur BanqueHydro). En période d'étiage, le canal peut aussi agir tel un grau et favoriser les échanges avec la mer.

Les échanges avec la mer ouverte sont simulés par des flux d'eau caractérisés par les variations de la hauteur d'eau en mer, issus du marégraphe de Solenzara (REFMAR- SHOM). La température et la salinité en mer sont renseignées par mesures mensuelles en mer de température et de salinité.

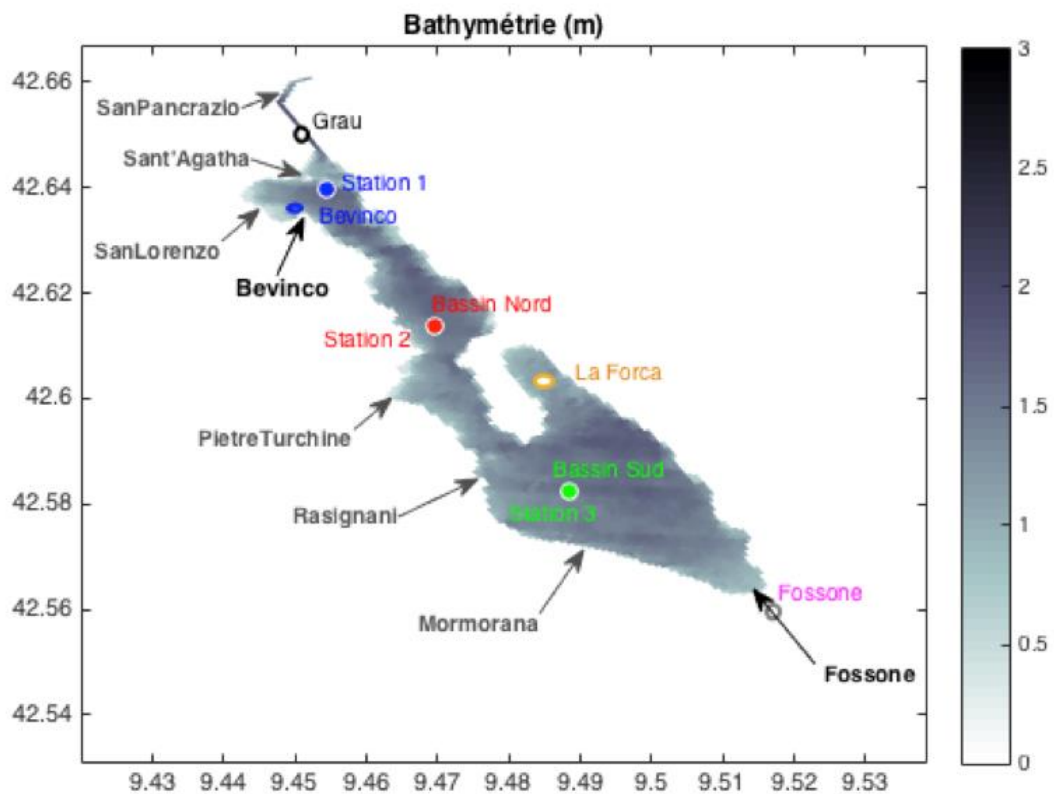


Figure 1 : Bathymétrie (m) de la lagune de Biguglia (teintes grises) interpolée sur la grille du modèle. Les points colorés représentent les points de mesures hydrologiques réalisées par l'Ifremer et la RNEB. Les flèches représentent les apports des fleuves Bevinco et Golo via le Fossone (en noir) et des cours d'eau temporaires (en gris foncé).

¹ <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

3. Fonctionnement hydrologique et hydrodynamique

Les conditions météorologiques, les apports d'eau douce et les échanges avec la mer influencent directement le fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Nous étudions d'abord le **contexte hydro-climatique** du site à l'aide des données de pluviométrie et de vent. Nous présentons ensuite les **conditions hydrologiques** (température, salinité) de l'étang et analysons la **circulation hydrodynamique** ainsi que les **échanges** avec la mer.

3.1. Contexte hydro-climatique

Les conditions météorologiques peuvent avoir un impact direct sur la lagune, par la pluviométrie qui alimente les apports d'eau douce du bassin versant, ainsi qu'à l'interface air-eau, où le vent et le rayonnement solaire influence la masse d'eau. Afin d'étudier le contexte hydro-climatique de la lagune, des données météorologiques quotidiennes moyennes enregistrées à la station Bastia-Poretta sont analysées.

3.1.1. Le vent

Le vent, dû au frottement qu'il induit sur la couche d'eau de surface, joue un rôle primordial sur l'hydrodynamique et la circulation des masses d'eau. La représentation des vents quotidiens moyens en rose des vents révèle leur faible intensité et leurs directions préférentielles (Figure 2). Le Sirroco (est à sud-est) souffle environ 30% du temps alors que le Libeccio (ouest / sud-ouest) est enregistré légèrement moins fréquemment (~25%) (Figure 2a). Le vent originaire du nord (nord-ouest à nord-est) représente environ 20% du temps. Moyennés sur la journée, les vents enregistrés à la station météorologique de Bastia-Poretta sont généralement inférieurs à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et ne dépassent ce seuil que 5% du temps, 3 fois moins souvent que les 16% suggérés par Mouillot et al. (2000). Notre utilisation de données moyennes quotidiennes pourrait toutefois expliquer la différence entre ces proportions d'événements de vent fort, alors qu'une telle analyse faite sur des données horaires montrait un ordre de grandeur similaire (Dufresne et al. 2017). Lorsque l'intensité du vent quotidien moyen dépasse $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, les directions préférentielles sont du nord au nord-est (~38% du temps) et de l'ouest (~28%) (Figure 2b).

Alors que le vent engendre un frottement à la surface de l'eau suffisant pour remobiliser le fond sédimentaire (Mouillot et al. 2000), le nombre de journées ventées devient un indicateur intéressant pour décrire le fonctionnement hydrodynamique de la lagune. La Figure 3 synthétise le nombre de jours dont l'intensité du vent quotidien moyen excède $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ entre 1990 et 2017. La fin du printemps et l'été (mai à septembre) est moins ventée et compte en moyenne moins d'un jour de vent par mois (Figure 3b). Les mois de novembre à mars dénombrent quant à eux plus de journées ventées. En moyenne, l'intensité du vent est supérieure à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ environ 20 jours par an (Figure 3c).

Cette saisonnalité marquée dans le régime de vent caractérise aussi la pluviométrie du climat corse. Directement influencés par la pluie, les apports d'eau douce des bassins versants joueront à leur tour

un rôle primordial dans le fonctionnement de la lagune. Les conditions pluviométriques sont donc étudiées ci-dessous.

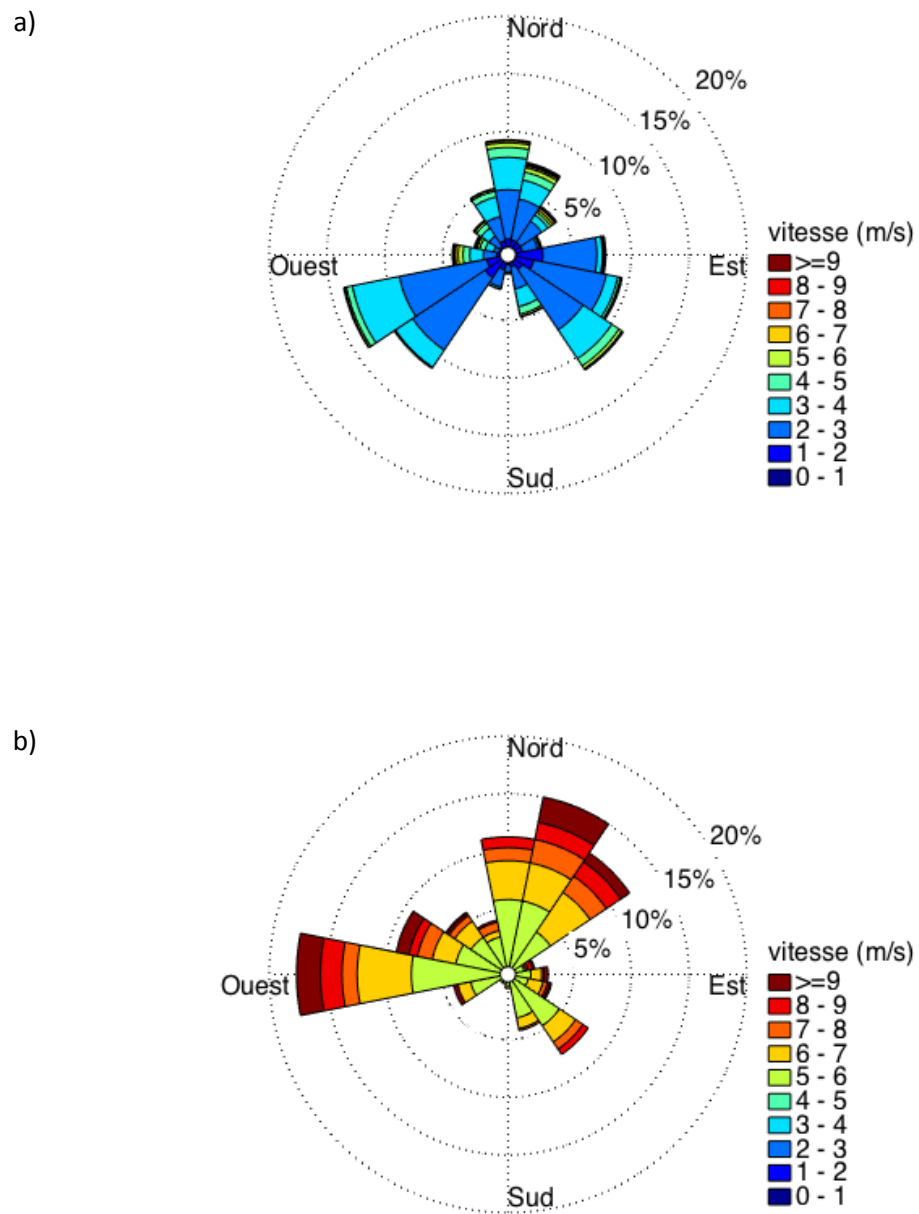


Figure 2 : Rose des vents à Bastia-Poretta entre 1990-2017 pour les vents quotidiens moyens (a) et pour les vents quotidiens moyens d'intensité supérieure à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (b)

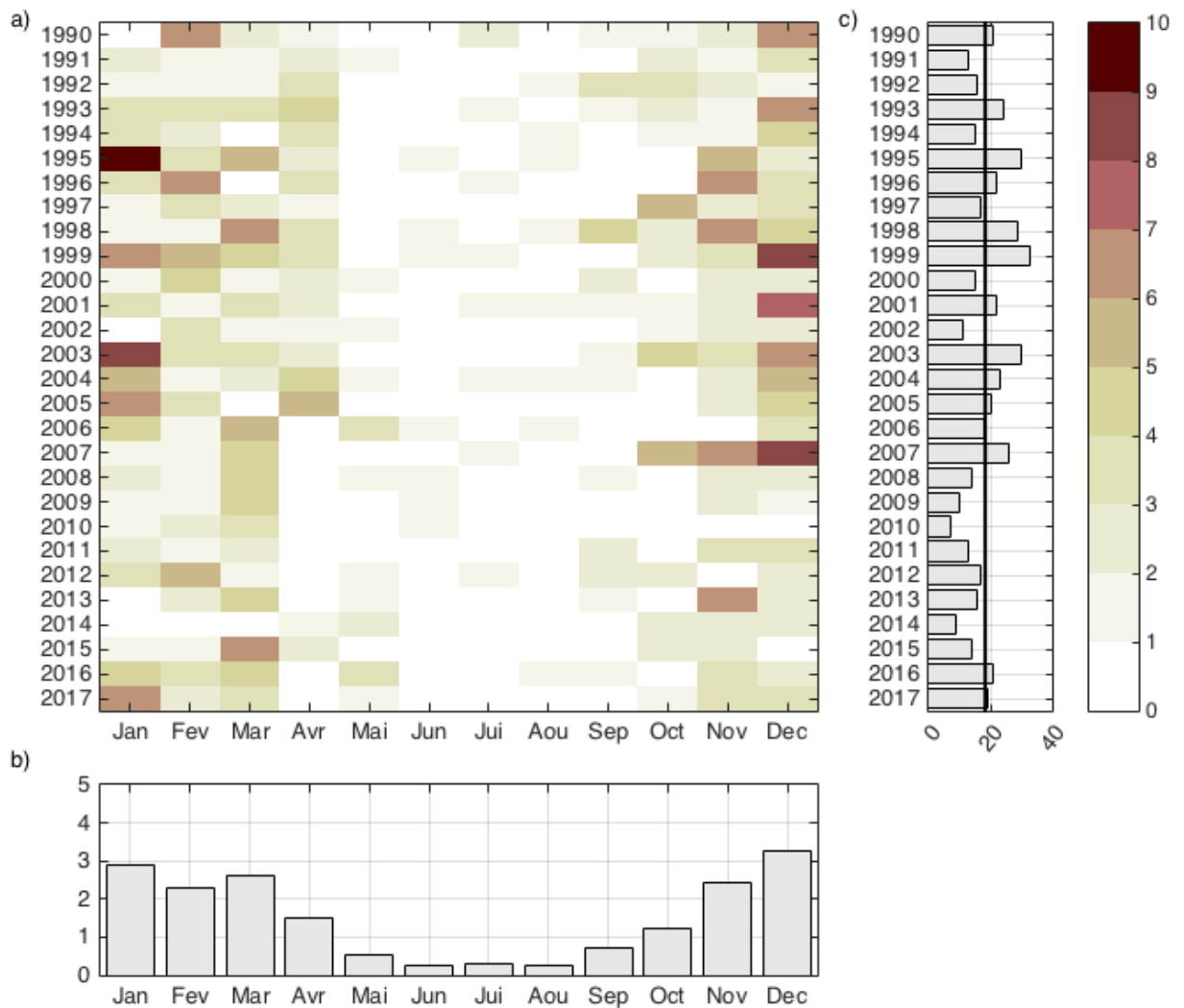


Figure 3 : « Heat-map plot » des journées de vent : (a) nombre de journées ventées mensuelle enregistrée à la Station Bastia-Poretta entre 1990 et 2017; (b) moyenne mensuelle du nombre de journées ventées ; (c) nombre de journées ventées cumulées annuellement et moyenne pluriannuelle (trait noir)

3.1.2. La pluviométrie

La pluviométrie joue un rôle essentiel dans les apports d'eau douce à l'étang et les 900 mm·an⁻¹ de pluie représentent un apport annuel d'environ 14 Mm³ (Mouillot et al. 2000). L'analyse des cumuls quotidiens de pluie des dernières 28 années révèle une moyenne annuelle légèrement inférieure (783 mm) ainsi qu'une importante variabilité pluriannuelle comprise entre 557 mm (en 1990) et 1375 mm (en 2008) (Figure 4c). La saisonnalité est très marquée, avec des mois secs en été et deux périodes pluvieuses à l'automne et au printemps (Figure 4b). 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, représentant parfois plus du quart de la pluviométrie annuelle (*e.g.* mars 2015). La proportion des cumuls de pluie d'automne (octobre à décembre), comprise entre 30% et 60% du cumul annuel, est

globalement supérieure au cumul des pluies de janvier à avril (20% à 55%). Cette tendance semble par ailleurs diminuer depuis 2010 alors que la proportion des pluies de janvier à avril augmente (Figure 5). La pluviométrie totale des 4 premiers mois de l'année apparaît comme la plus grande proportion du cumul annuel au cours des dernières 8 années. Les mois dont le cumul de pluie atteint des valeurs dites extrêmes (*outliers*) sont d'ailleurs plus fréquents en début d'année (à l'exception du mois de juin) (Figure 4b). Le nombre de jours de pluie dont le cumul quotidien dépasse 10 mm est plus élevé à l'automne et représente en moyenne 20 jours par an (voir détails en Annexe 1). Ces événements courts mais intenses se traduisent par un apport de 75% du cumul annuel moyen en 20 jours, soit en 5% du temps.

Le caractère très ponctuel des épisodes pluvieux génère des apports d'eau douce très irréguliers et une forte variabilité saisonnière et pluriannuelle. Le fonctionnement hydrologique de l'étang présenté ci-dessous aura par conséquent une empreinte marquée par des étés chauds et de faibles apports d'eau douce, et des hivers frais et un volume d'eau douce important.

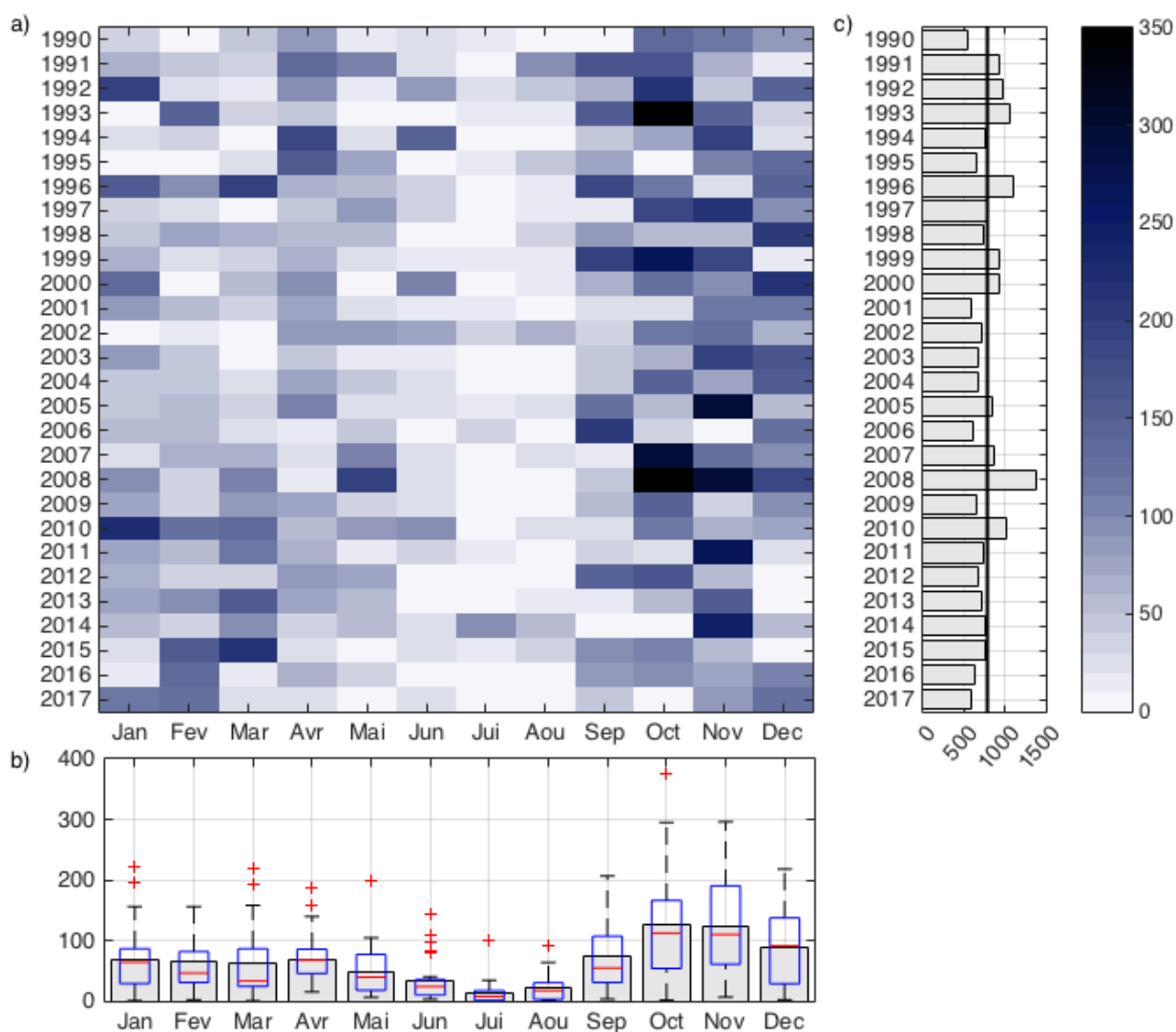


Figure 4 : « Heat-map plot » pluviométrique : (a) pluviométrie mensuelle totale (mm) enregistrée à la Station Bastia-Poretta entre 1990 et 2017; (b) pluviométrie mensuelle moyenne (grise), valeur

médiane (trait rouge), 25^{ième} et 75^{ième} 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)

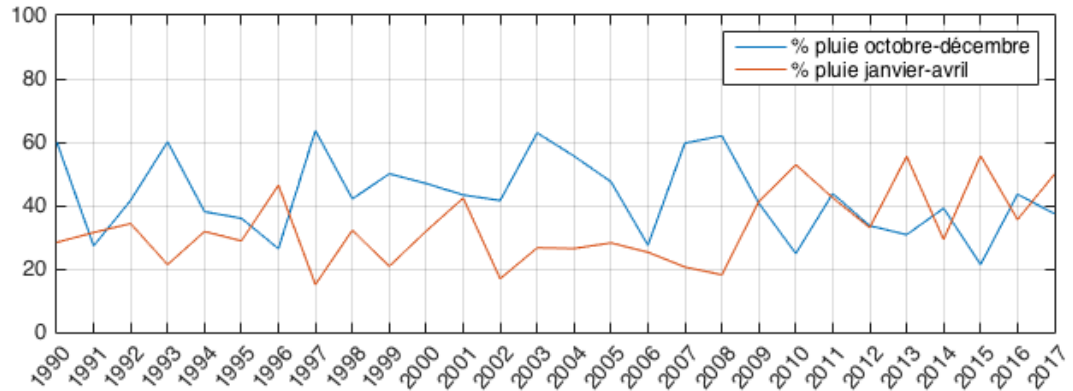


Figure 5 : Proportion (%) des cumuls de pluie d'octobre à décembre (bleu) et de janvier à avril (rouge) entre 1990 et 2017 à Bastia-Poretta.

3.2. Hydrologie

La forte variabilité saisonnière des conditions météorologiques porte à croire que l'étang se caractérisera par un fonctionnement distinct selon la saison et les apports fluviaux. Afin d'étudier le fonctionnement de l'étang, une simulation de janvier à décembre 2013 est étudiée et comparée aux données observées. Sous l'influence des forçages océaniques (*via* le grau), atmosphériques (en surface) et fluviaux (apports des bassins versants), les variables physiques et hydrologiques modélisées de la lagune varient dans le temps et dans l'espace.

3.2.1. Température

La température de l'eau de l'étang est très homogène (peu de différence entre les bassins nord et sud) et suit globalement les tendances de la température de l'air (trait gris de la Figure 6a). La représentation des mesures et des résultats du modèle montre une légère sous-estimation de la température modélisée, notamment au printemps et en été (Figure 6). Cet écart pourrait s'expliquer par une trop faible prise en compte du rayonnement solaire dans le modèle. L'analyse de la simulation révèle que la variabilité de la température de l'eau de l'étang s'explique très largement par la variabilité de la température de l'air et, dans une moindre mesure, par les apports d'eau de mer. Bien qu'ayant peu d'influence sur la température de l'étang, les échanges avec la mer *via* le grau seront par ailleurs déterminants pour la variabilité de la salinité.

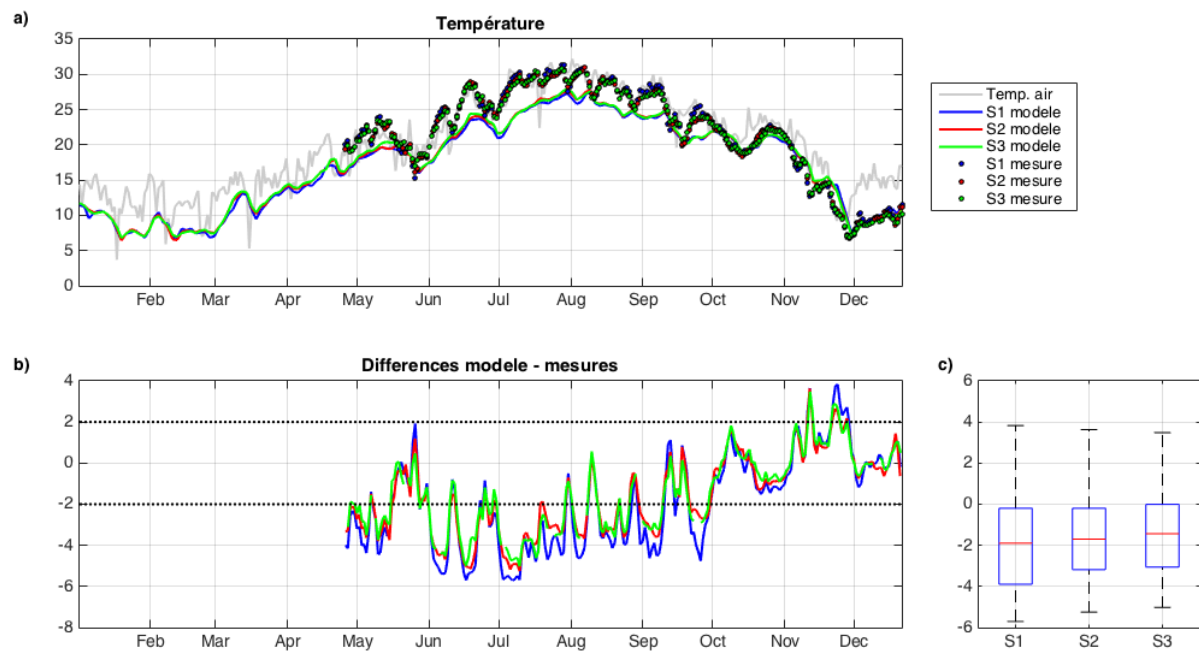


Figure 6 : a) Température de l'air (gris) et de l'eau en surface mesurée (cercles) et modélisée (lignes) ; b) différences entre les températures modélisées et mesurées aux points aux points S1 (bleu), S2 (rouge) et S3 (vert). Les boxplot (c) représentent la valeur médiane (trait rouge), les 25^{ième} et 75^{ième} percentiles (bleu) et les valeurs minimales et maximales (pattes noires) aux points S1, S2, S3.

3.2.2. Salinité

Très faible voire nulle en eau douce, 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 généralement plus élevées. Les mesures ponctuelles en surface s'échelonnent entre 3 et 37 et montrent une grande variabilité à la fois spatiale (nord, sud) et temporelle (saisonnalité) (Figure 7). Il est cependant important de mentionner que ces mesures ont été réalisées une fois par mois, uniquement en été (juin à août), dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire, à l'exception de mesures mensuelles ponctuelles faites entre mai 2012 et novembre 2013 (Figure 7b). Ces salinités se révèlent généralement plus élevées dans le bassin nord (S1) que dans le bassin sud (S3) (Figure 7a), et atteignent des valeurs plus élevées durant la saison estivale (Figure 7b). L'écart entre les salinités des bassins nord et sud est également plus prononcé les mois d'été. La présence de ce gradient de salinité croissant sud-nord est d'ailleurs bien référencée dans la littérature (i.e. Frisoni and Dutrieux 1992; Orsoni et al. 2001; Pasqualini et al. 2017; Tunin-Ley et al. 2014).

Par ailleurs, une diminution des salinités estivales est marquée entre 2002 et 2012, avec une tendance bien établie dans le bassin sud (Figure 7a). Au regard des pluviométries plutôt faibles les années concernées (Figure 4), cette diminution de salinité ne peut s'expliquer uniquement 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. Dans cette hypothèse, une embouchure restreinte diminuerait les échanges d'eau de mer avec le Golo et par conséquent les apports d'eau salée à l'étang. En plus de réduire les apports d'eau de mer, une plus petite embouchure limiterait l'évacuation d'eau douce en mer et favoriserait son écoulement par le Fossone vers la lagune. Une forte crue du fleuve Golo à l'automne-hiver 2011-2012 pourrait avoir ré-ouvert l'embouchure, ou alors par une intervention anthropique tel que suggéré par Pasqualini et al. (2017).

Le modèle, qui représente assez bien l'augmentation estivale de salinité (Dufresne et al. 2017), nous permettra de vérifier cette hypothèse. Afin d'estimer l'influence de l'état de l'embouchure du Golo sur l'hydrologie de l'étang, différentes simulations sont étudiées dans la section suivante.

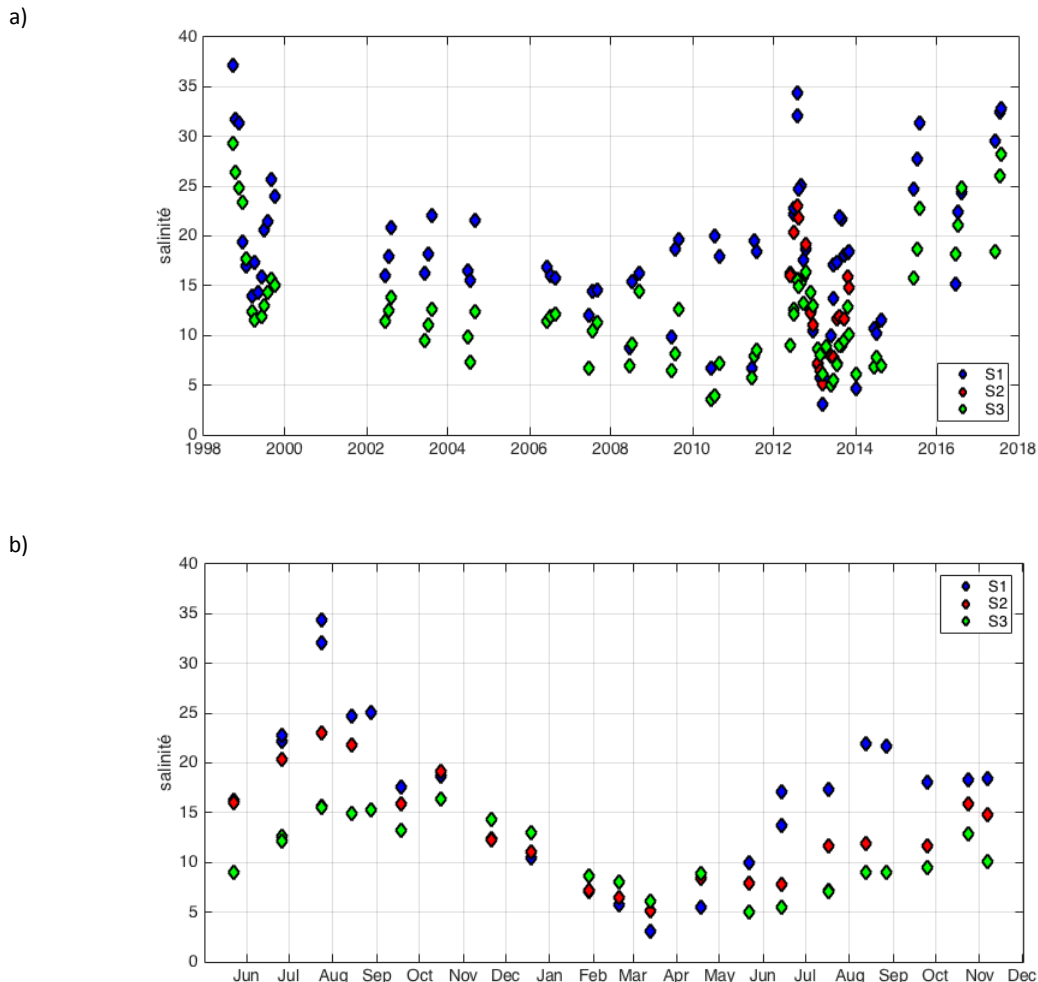


Figure 7 : (a) Mesures de salinité réalisées en été dans le cadre des RSL au point S1 (bleu), S2 (rouge) et S3 (vert) depuis 1999. Des mesures mensuelles ont été réalisées entre mai 2012 et novembre 2013 (b).

3.2.1. 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.

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 (Tableau 1). Toutes les simulations concernent l'année 2013, car elle s'apparente à la météorologie moyenne quant au nombre de journées ventées (Figure 3) et à la pluviométrie annuelle (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 changements d'état de l'embouchure du grau au nord de l'étang, également identiques pour toutes les simulations, sont ceux recensés par la RNEB et sont représentés à la Figure 8. Notons une ouverture plus large et plus profonde à la mi-mars et début avril 2013, qui est simulée par une embouchure plus profonde à ces périodes dans le modèle. Les scénarios modélisés diffèrent donc uniquement quant aux échanges avec le Fossone, qui représentent un pourcentage des débits du Golo mesurés à la station Volpajola, et qui dépendent de l'état de l'embouchure du Golo en mer (Tableau 1).

Tableau 1 : Scénarios simulés

Simulations	État de l'embouchure du Golo	Apports du Fossone
1	Ouverte	5% Golo
2	Fermée	5% Golo
3	Fermée	20% Golo
4	Ouverte : janvier à mai Fermée : juin à décembre	5% Golo 100% Golo

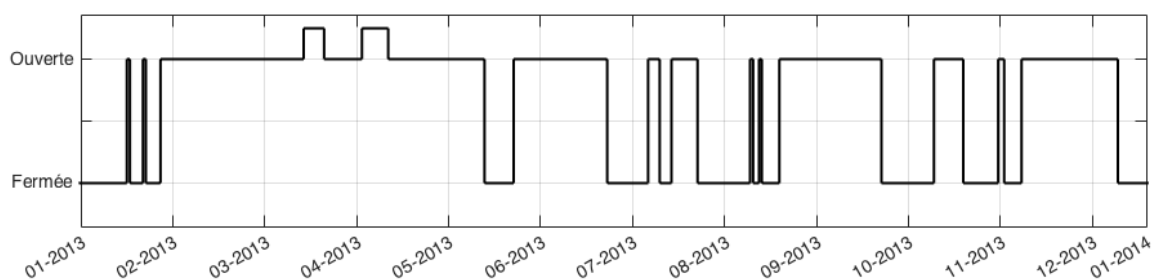


Figure 8 : Condition d'ouverture ou de fermeture de l'embouchure du grau nord de la lagune à partir des observations du suivi d'intervention

Les simulations (couleurs) sont comparées à l'ensemble des données observées (Ifremer-RSL et RNEB) toutes années confondues, représentées par des symboles en étoile (*) sur la

Figure 9 pour le bassin nord (haut) et le bassin sud (bas). La simulation 1 (bleu foncé sur la Figure 9) 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. Les valeurs modélisées sont du même ordre de grandeur que les salinités les plus élevées mesurées dans le bassin nord, et légèrement supérieures à celles du bassin sud. La simulation 2 (en gris sur la

Figure 9) 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 9). Enfin, le quatrième scénario 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 9) semble représenter la limite inférieure des valeurs mesurées.

Les variations de hauteurs d'eau dans l'étang sont influencées par le niveau en mer et les apports des fleuves. Ainsi, la modification des flux du Golo *via* le Fossone dans les différents scénarios présentés ci-dessus engendre des hauteurs d'eau différentes pour les quatre simulations (Figure 10). Bien que ces valeurs de hauteurs d'eau n'aient pu être validées par de comparaisons modèle-mesures et semblent parfois largement surestimées (*i.e.* simulation 4, pointillés bleus de la Figure 10), les valeurs modélisées peuvent indiquer d'éventuels risques d'inondation. Par exemple, l'importante crue de novembre 2013 engendre une augmentation de hauteur d'eau dans la lagune de plusieurs dizaines de centimètres (scénarios 1 à 3).

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. L'analyse hydrodynamique de la section suivante se concentre sur les échanges aux graus et la circulation dans de la lagune.

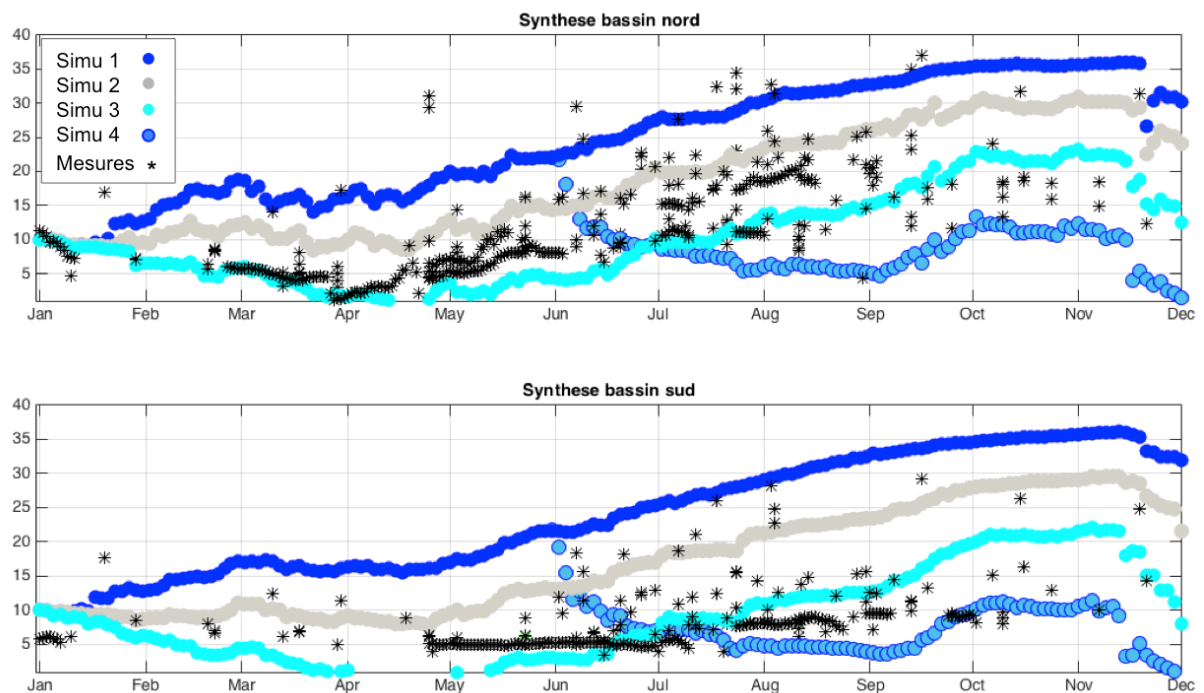


Figure 9 : Synthèse de toutes les mesures de salinité (*) entre 1998 et 2017 dans le bassin nord (haut) et le bassin sud (bas), et salinité modélisée pour les simulations 1 (bleu foncé), 2 (gris), 3 (cyan) et 4 (bleu clair)

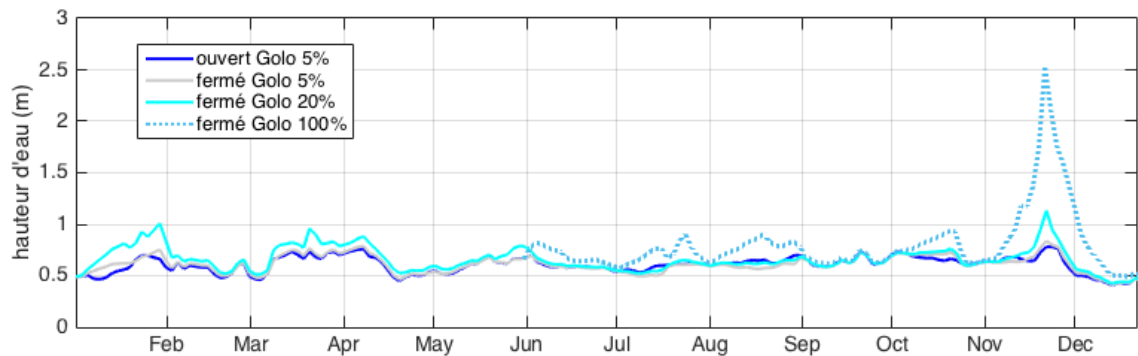


Figure 10 : Hauteur d'eau (m) dans le bassin nord (S1) pour les 4 simulations

3.3. Circulation et hydrodynamique

3.3.1. Courants

Les courants dans l'étang sont généralement faibles (quelques $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) et fortement dépendants des conditions climatiques. Les intensités les plus fortes sont simulées par vent fort et les courants sont alors dirigés dans le sens du vent. Au point S1 (nord) les directions de courant sont influencés par le

vent, mais également par le grau, et les écoulements du Bevinco, et des cours d'eau temporaire Sant'Agatha et San Lorenzo situé à proximité. Au point S2, les courants sont principalement dirigés vers le nord-ouest (60% du temps) et orienté dans le sens de la lagune. Au sud (S3), les courants sont dirigés vers le nord et sont compris entre le nord-ouest et le nord-est plus de 80% du temps.

Le vent, en plus d'avoir un impact direct sur la circulation dans la lagune, altère l'état de mer, qui à son tour, influence la dynamique d'échanges entre l'étang et la mer. Le fonctionnement de la lagune repose largement sur les échanges au grau et dans le canal du Fossone, et la section suivante se concentre sur les débits au grau et les volumes d'eau échangés.

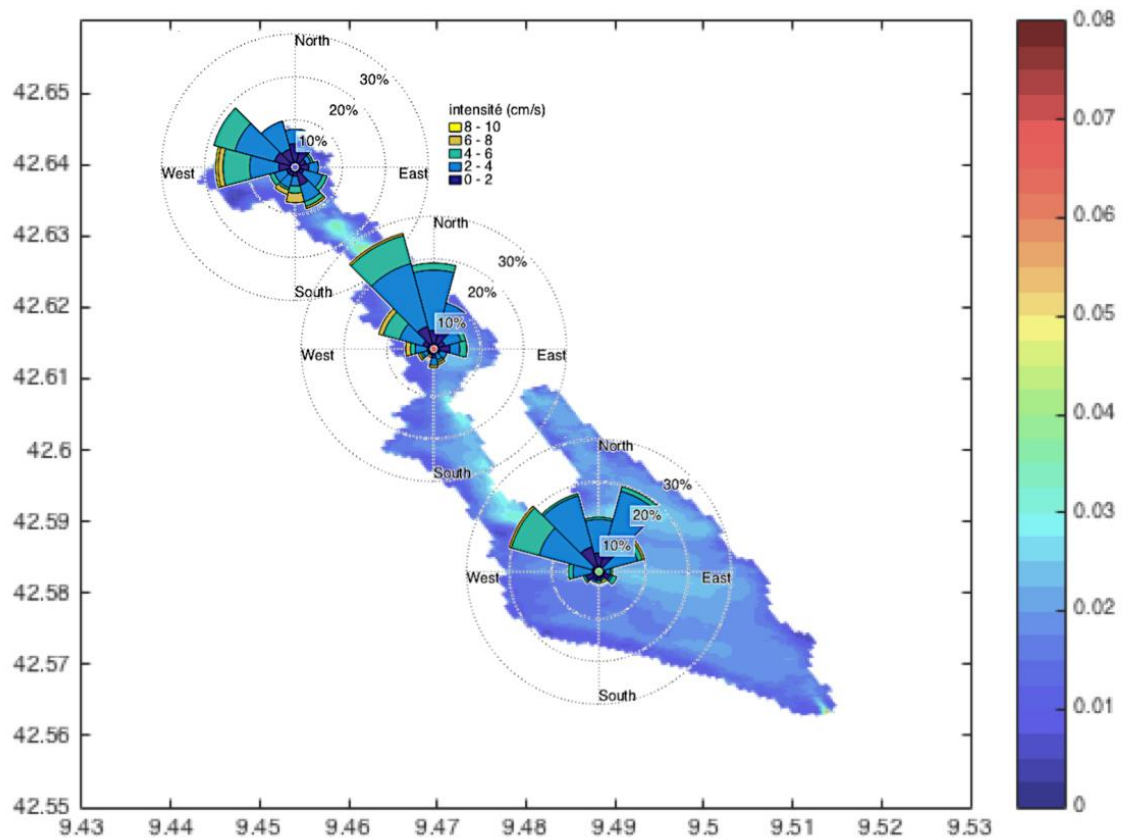


Figure 11: Carte de la moyenne annuelle de la tension de fond des roses des courant de surface pour les 3 points S1 (nord), S2 (centre), S3 (sud)

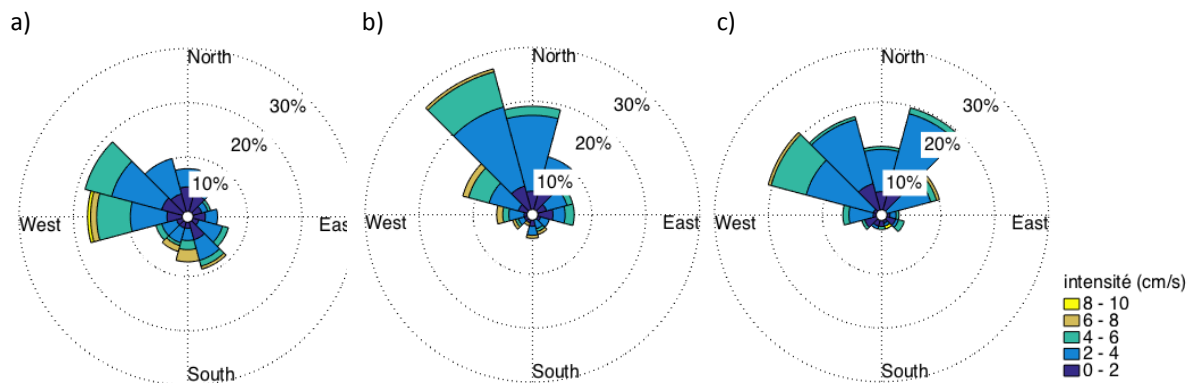


Figure 12 : Roses des courants de surface aux points S1-nord (a), S2-centre (b) et S3-sud (c)

3.3.2. Débits et volumes échangés

Le fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de la lagune dépend d'une part des apports d'eau douce et d'autre part des échanges avec la mer. Dans nos simulations représentant une année de pluviométrie moyenne, les apports annuels du Bevinco et des cours d'eau temporaires sont estimés à $29,7 \text{ Mm}^3$. Les apports du Fossone, qui peuvent être constitués d'eau saumâtre dont la salinité dépend des débits du Golo et de son embouchure en mer, varient selon la simulation. Pour la simulation 1, les apports d'eau douce au sud sont estimés à $12,3 \text{ Mm}^3$, ce qui suggère **un apport d'eau douce total annuel de 42 Mm^3** , en accord avec les valeurs recensées dans la littérature, estimé entre $27,6$ à $58 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ par Frisoni & Dutrieux (1992) et de 43 Mm^3 par Mouillot et al. (2000).

Afin d'estimer les échanges avec la mer, nous dressons un bilan des échanges au niveau du grau nord et du canal du Fossone. Au nord, les flux sont estimés dans la maille du modèle qui correspond à l'embouchure du grau et quantifient les échanges entre la mer et la lagune. Au sud, les flux sont calculés dans la maille d'arrivée du Fossone dans la lagune et tiennent compte à la fois des échanges avec la mer et des apports du Golo. Par convention, nous définissons des flux positifs entrants et négatifs sortants.

Pouvant atteindre $\pm 24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (entrants et sortants), les débits simulés au grau nord (en bleu sur la Figure 13) varient généralement entre $5,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $-9,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et sont du même ordre de grandeur que les débits mesurés ponctuellement dans le grau (Kervella and Curti 2017; Tunin-Ley et al. 2014). Les débits entrants moyens sont de $10,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et les débits sortants moyens de $-11,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les débits nuls indiquent les périodes de fermeture du grau (illustrés à la Figure 8) et ne sont pas pris en compte dans les estimations de débits. Au sud de l'étang, les débits modélisés dans le canal du Fossone (en rouge sur la Figure 13) sont principalement compris entre $5,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $-4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et peuvent atteindre $13,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $-13,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les débits entrants moyens sont de $4,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et les débits sortants moyens sont de $-3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En mars et novembre 2013, les débits entrants plus importants au Fossone montrent l'influence du Golo sur les apports à la lagune.

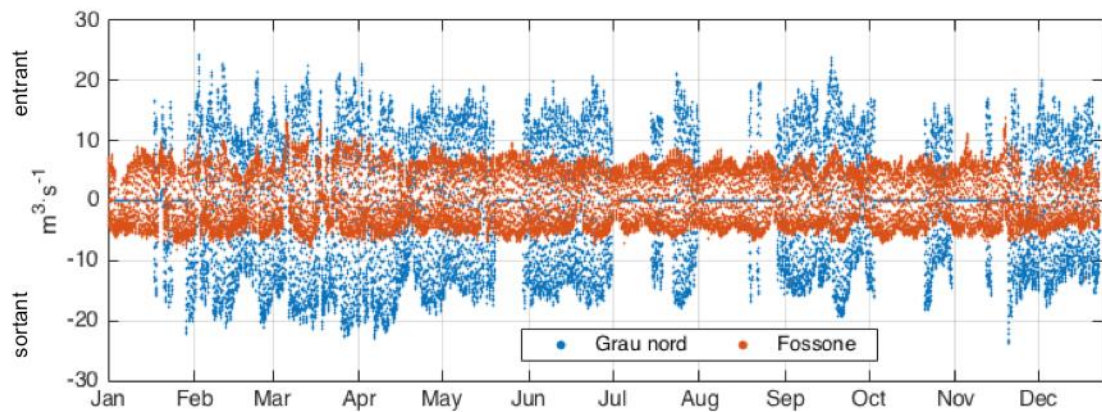


Figure 13 : Débits modélisés au grau nord (bleu) et dans le canal du Fossone (rouge) pour l'année 2013 (simulation 1)

Tableau 2 : Débits modélisés et mesurés au grau nord et débits modélisés à la maille d'arrivée du Fossone dans l'étang pour les quatre simulations dont les conditions d'ouverture (O) et de fermeture (F) et les débits du Golo sont rappelés. Les tirets (---) indiquent des valeurs aberrantes

	Débit (75 ^{ième} percentile)	Débit (25 ^{ième} percentile)	Débit entrant maximal	Débit sortant maximal	Débit entrant moyen	Débit sortant moyen
Grau Nord						
Mesures	8,8	-8,3	21,2	-31,0	9,6	-10,7
Simu 1 (O – 5%)	5,4	-9,8	24,3	-23,9	10,5	-11,3
Simu 2 (F – 5%)	4,0	-10,3	24,4	-27,0	10,7	-12,0
Simu 3 (F – 20%)	0,0	-13,7	24,2	-40,3	10,3	-14,1
Simu 4 (jun à déc. F – 100%)	0,0	-15,8	23,5	---	8,8	-19,9
Fossone						
Simu 1 (O – 5%)	5,1	-4,0	13,9	-13,5	4,9	-3,8
Simu 2 (F – 5%)	1,3	0,16	21,3	-11,0	0,97	-0,96
Simu 3 (F – 20%)	5,3	0,7	40,8	-7,6	3,8	-1,2
Simu 4 (jun à déc. F – 100%)	9,9	2,5	125,3	-7,8	8,9	-2,1

Les débits des quatre simulations (Tableau 1) sont regroupés dans le Tableau 2, dont les représentations statistiques sont montrées en Annexe 4. Sans surprise, les débits au grau nord augmentent lorsque l'embouchure du Golo est fermée. Ne pouvant s'écouler en mer, les apports du fleuve *via* le Fossone sont déviés dans la lagune et le grau nord permet d'évacuer le surplus d'eau. Les débits sortants au grau nord augmentent aussi avec les débits du Golo. Les débits entrants moyens au grau nord restent similaires, à l'exception de la simulation 4 pour laquelle ils sont diminués. Au sud de la lagune, les échanges avec le Fossone sont évidemment liés aux débits du Golo. Plus les apports du

fleuve augmentent, plus les débits maximaux entrants dans l'étang augmentent. Les débits sortants maximaux tendent à diminuer avec l'augmentation des apports du Golo. L'ouverture de l'estuaire favorise largement les échanges aux Fossone, comme l'indique les valeurs plus élevées des débits moyens entrants et sortants ainsi que la plus grande répartition des valeurs de débits (25^{ième} et 75^{ième} percentiles) pour la simulation 1.

Intégrés sur la durée de la simulation, les débits permettent d'étudier le bilan hydrique annuel de l'étang et d'estimer les volumes d'eau entrants et sortants au grau nord et au Fossone (Tableau 3). Les volumes entrants par le grau nord semblent légèrement élevés aux regards des valeurs recensées dans la littérature (Tableau 4), bien qu'ils se situent dans la gamme haute des valeurs indiquées par le rapport du BCEOM (2006). Pour les simulations 3 et 4, les volumes sortants sont supérieurs à ceux suggérés par la littérature. Les volumes annuels au grau nord présentent toujours un bilan négatif, indiquant qu'un plus grand volume d'eau quitte la lagune par le grau que ce qu'il n'en entre. Inversement, le Fossone constitue une source d'apport (bilan positif) pour toutes les simulations. Le volume sortant de la simulation 1 montre l'importance du Fossone dans les échanges avec la mer. Globalement, le bilan des deux graus montre un export d'eau vers la mer. L'évolution temporelle du bilan hydrique pour les simulations 1 à 3 est représentée à la Figure 14 (par soucis de clarté, la simulation 4 qui engendre des volumes très importants n'est pas représentée).

Tableau 3 : Volumes (en million de m³) échangés annuellement au grau nord et au Fossone pour les 4 simulations

Mm ³	Volume entrant Grau nord	Volume sortant Grau nord	Bilan Grau nord	Volume entrant Fossone	Volume sortant Fossone	Bilan Fossone	Bilan 2 graus
Simu 1	96,4	-133,1	-36,7	74,1	-58,7	15,4	-21,2
Simu 2	94,7	-144,3	-49,6	29,8	-0,5	29,3	-20,3
Simu 3	67,8	-202,7	-134,9	118,5	-0,32	118,2	-16,8
Simu 4	70,6	-252,2	-181,6	198,7	-25,9	172,8	-8,8

Tableau 4 : Bilan hydrique au grau nord en Mm³/an pour les études référencées par la littérature et la configuration initiale* (Repris de Dufresne et al. 2017)

Études ou simulations	Volumes entrants	Volumes sortants	Bilan
Frisoni and Dutrieux (1992)	10 à 15	-58 à -91	-43 à -81
BCEOM (2006)	10 à 91	-26 à -155	-43 à -93
Mouillot et al. (2000)	13,1	-87,7	
Castaings (communication personnelle)	-	-	-67
Configuration initiale*	74	-142	-68

* Mise en place de la configuration initiale dans le rapport 1 (Dufresne et al. 2017)

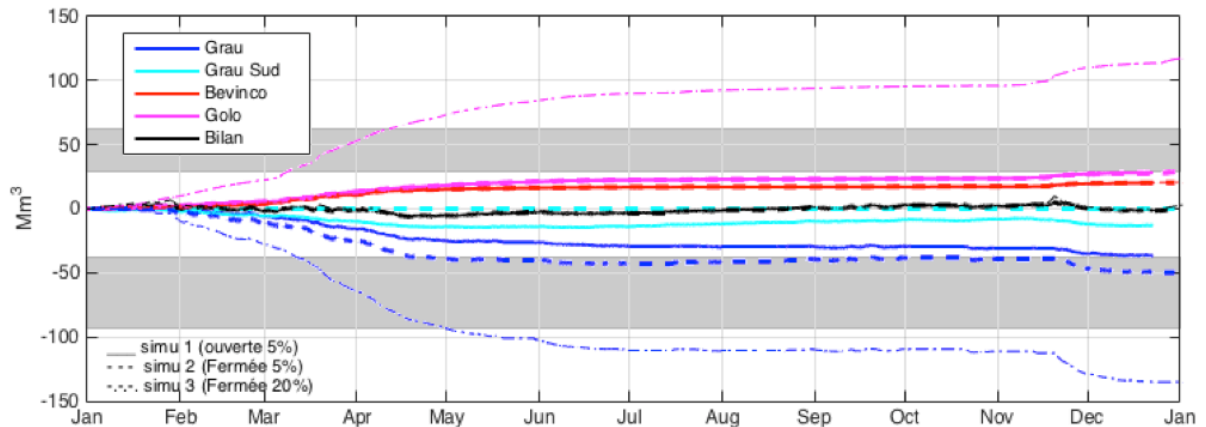


Figure 14 : Bilan hydrique des simulations 1 (—), 2 (----) et 3 (-·-·-) aux mailles correspondant au grau nord (bleu foncé), au grau sud (cyan), à l'embouchure du Bevinco (rouge) et à l'arrivée du Golo dans le Fossone (magenta). Les traits noirs représentent la somme de ces 4 apports (les cours d'eau temporaires sont négligés) et les zones grisées rappellent les bilans hydriques et les apports totaux du bassin versants estimés par la littérature.

3.4. 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%).

3.4.1. Temps de renouvellement et de résidence

Le temps de renouvellement correspond au temps nécessaire afin d'échanger un volume d'eau équivalent au volume de la lagune. 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 estimé à 59 jours (Fiandrino et al. 2017) et la lagune Lesina (45 Mm³, Italie) a un temps de renouvellement estimé à 87 jours (Umgiesser et al. 2014). Par ailleurs, cette méthode ne tient pas compte du mélange de la masse d'eau, et ne permet pas de certifier que la totalité de la masse d'eau ait été renouvelée.

Le temps de résidence, qui quantifie le temps qu'une particule d'eau passe dans la lagune, peut être évalué pour chaque maille du modèle et permet de caractériser le processus de mélange et de transport. Les temps de résidence calculés pour les différentes simulations ne sont pas homogènes spatialement dans la lagune (Figure 15) et dépendent des apports du Golo et des conditions de son embouchure (Tableau 5). Lorsque l'embouchure du Golo est ouverte (simulation 1) et que le Fossone agit comme un grau, les temps de résidence les plus courts se situent aux abords du grau nord (45 jours) et du Fossone (61 jours) (Figure 15 a). Le temps de résidence moyen est alors de 73 jours. Lorsque l'embouchure est fermée (simulation 2), les temps les plus longs (> 90 jours) se situent dans

le bassin sud (Figure 15 b). Pour ces deux premières simulations, les temps de résidence les plus long sont calculés dans l'anse Forca (« o » sur la Figure 15 a,b). Lorsque les apports du Golo augmentent (simulation 3), les temps de résidence sont globalement plus courts (45 jours en moyenne) et le temps de résidence maximal est calculé au nord de la presqu'île San Damiano (Figure 15 c).

Tableau 5 : Temps de renouvellement et de résidence calculés dans la lagune pour les simulations 1 à 3

Simulations	État de l'embouchure du Golo	Apports du Fossone	Temps de renouvellement théorique	Temps de résidence moyen (jours)	Temps de résidence maximal (jours)
1	Ouverte	5% Golo	68	73	85
2	Fermée	5% Golo	75	84	96
3	Fermée	20% Golo	47	45	50

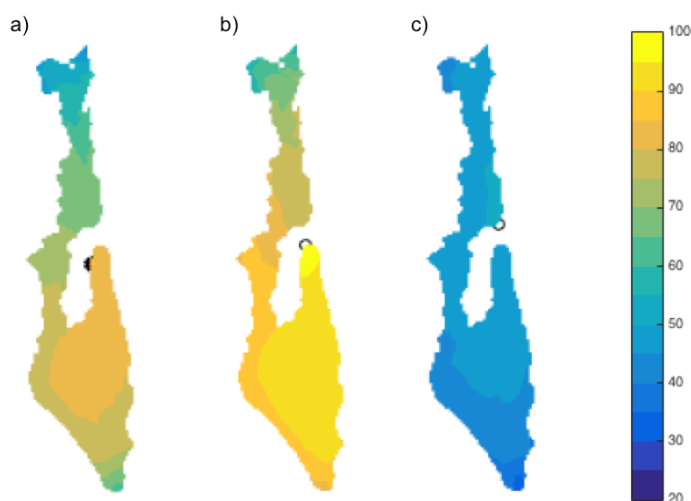


Figure 15 : Temps de résidence (jours) calculés pour les simulations 1 (a), 2 (b) et 3 (c). Les cercles noirs (o) indiquent la localisation des temps les plus longs.

3.4.1. Volume de mélange

Afin de quantifier et caractériser l'échelle de temps d'une intrusion marine et l'efficacité de son mélange, Fiandrino et al. (2017) ont défini un indicateur appelé volume de mélange. Cet indicateur renseigne sur la connectivité d'une lagune avec la mer et permet de représenter spatialement l'influence des entrées d'eaux marines.

Pour cette analyse, les temps de résidence sont calculés pour des volumes représentant différentes proportions du volume total de la lagune afin d'étudier l'évolution du mélange de la masse d'eau. Les temps de résidence pour des sous-volumes correspondant à des proportions comprises entre 50% et 200% du volume de l'étang sont calculés. La proportion du volume total qui est parfaitement mélangé est ensuite représenté en fonction du temps (Figure 16). 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%.

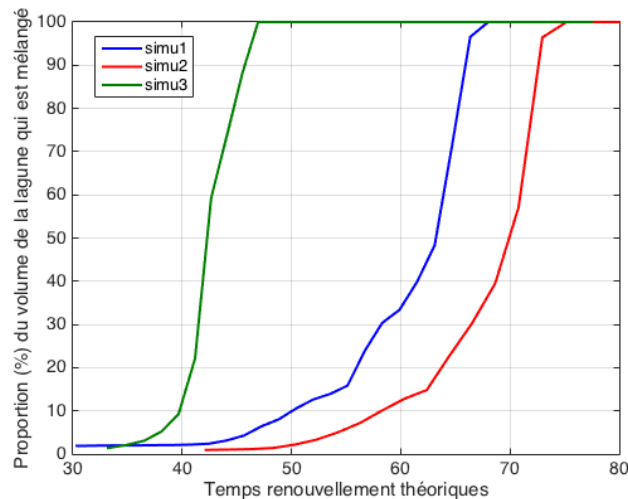


Figure 16 : Temps de renouvellement théoriques (jours) selon la proportion du volume de la lagune qui est mélangé

Les volumes mélangés correspondant à chacun de ces seuils fournissent une représentation spatiale des zones parfaitement mélangées (Figure 17) et mettent en évidence des frontières hydrodynamiques du mélange de la masse d'eau. 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).

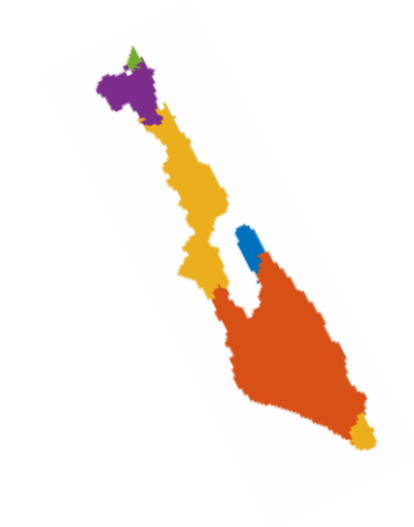


Figure 17 : Identification de zones hydrodynamiques d'après les volumes de mélange

4. Conclusions et améliorations futures

Le modèle hydrodynamique mis en place lors du premier volet de l'étude est utilisé pour étudier le fonctionnement hydrologique et hydrodynamique de l'étang de Biguglia. Les différents scénarios présentés permettent de rendre compte de l'importance du canal du Fossone pour les échanges d'eau entre la mer, la lagune et le Golo. L'analyse des résultats du modèle montre une forte **variabilité spatio-temporelle** de l'hydrologie et de l'hydrodynamique de l'étang, où le grau nord et le canal du Fossone jouent un rôle essentiel. La variabilité temporelle de la température de l'eau est expliquée par la température de l'air, alors que sa variabilité spatiale est quasi inexistante. La salinité de l'étang se révèle également très variable et s'explique par **l'importance des échanges avec la mer**, qui dépendent du grau nord et de l'embouchure du Golo. Les directions de courant indiquent une circulation globalement dirigée vers le nord et les échanges au grau nord sont prépondérants, bien que les échanges au Fossone soient déterminants pour l'hydrologie du bassin sud.

L'analyse d'indicateurs hydrodynamiques démontre aussi l'importance des graus pour la santé de l'étang. Les temps de renouvellement les plus longs sont obtenus lors d'années sèches (peu pluvieuse) et pour une embouchure du Golo fermée. Les cartes de zones de mélanges corroborent **la distinction des bassins nord et sud** et illustrent l'influence des apports du bassin versant et du grau sur le renouvellement de la masse d'eau.

Les résultats présentés suggèrent qu'une gestion facilitée de la lagune pourrait être obtenue par de simples aménagements concernant les échanges avec la mer et la **surveillance des paramètres hydrologiques**, notamment de la salinité. D'abord, une meilleure connaissance des apports à l'étang (*e.g.* cours d'eau temporaires, les échanges Fossone) améliorerait notre compréhension de son fonctionnement et leurs éventuels impacts. Les interactions entre l'étang, l'eau douce et la mer influencent directement l'écosystème lagunaire, dont une meilleure compréhension et une meilleure protection s'appuiera sur une bonne connaissance de ces échanges.

Ensuite, un **suivi régulier** des données hydrologiques (température, salinité) pourrait s'avérer un **indicateur simple et efficace** du bon état de l'étang. Les variations de salinité traduisent en effet de la qualité de échanges, et la mise en évidence d'une forte dessalure pourrait indiquer la nécessité d'améliorer les échanges avec la mer. Par ailleurs, la localisation du point de mesure S1 montre une très forte variabilité (salinité, température, courant), probablement à cause de la proximité du grau nord et des apports d'eau douce du Bevinco et des cours d'eau temporaires Sant'Agatha et San Lorenzo. Une autre localisation permettrait de s'affranchir de ces fluctuations et assurerait des mesures plus représentatives de l'hydrologie de l'étang.

Enfin, **l'entretien du canal du Fossone** et le maintien de **l'ouverture du grau et de l'embouchure du Golo** semblent essentiels au maintien de l'équilibre de la lagune. La gestion d'ouverture de l'embouchure du Golo apparaît comme un élément clé pour **minimiser le risque d'inondation** aux abords de l'étang et pour éviter la dessalure prolongée ou pérenne du bassin sud et ainsi **limiter l'intrusion d'espèces lacustres** (carpes, herbiers, etc.).

5. Annexes

5.1. Annexe 1

Journées pluvieuses

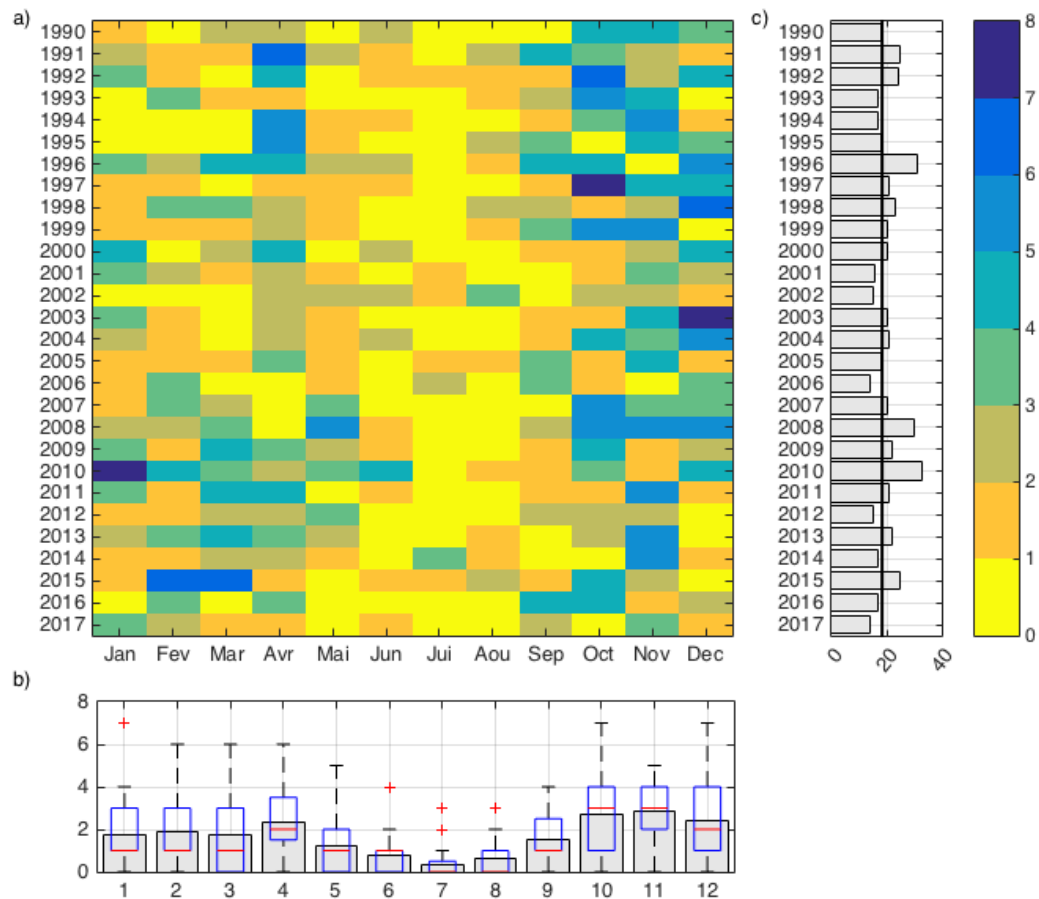


Fig.A 1: « Heat-map plot » du nombre de jours de pluie : (a) nombre de jour de pluie mensuel total entre 1990 et 2017; (b) nombre de jour de pluie mensuel moyen (gris), valeur médiane (trait rouge), 25^{ième} et 75^{ième} percentile (bleu), les valeurs minimales et maximales (pattes noires) et valeurs extrêmes (croix rouges); (c) nombre de jour de pluie annuel total et moyen (trait noir)

5.2. Annexe 2

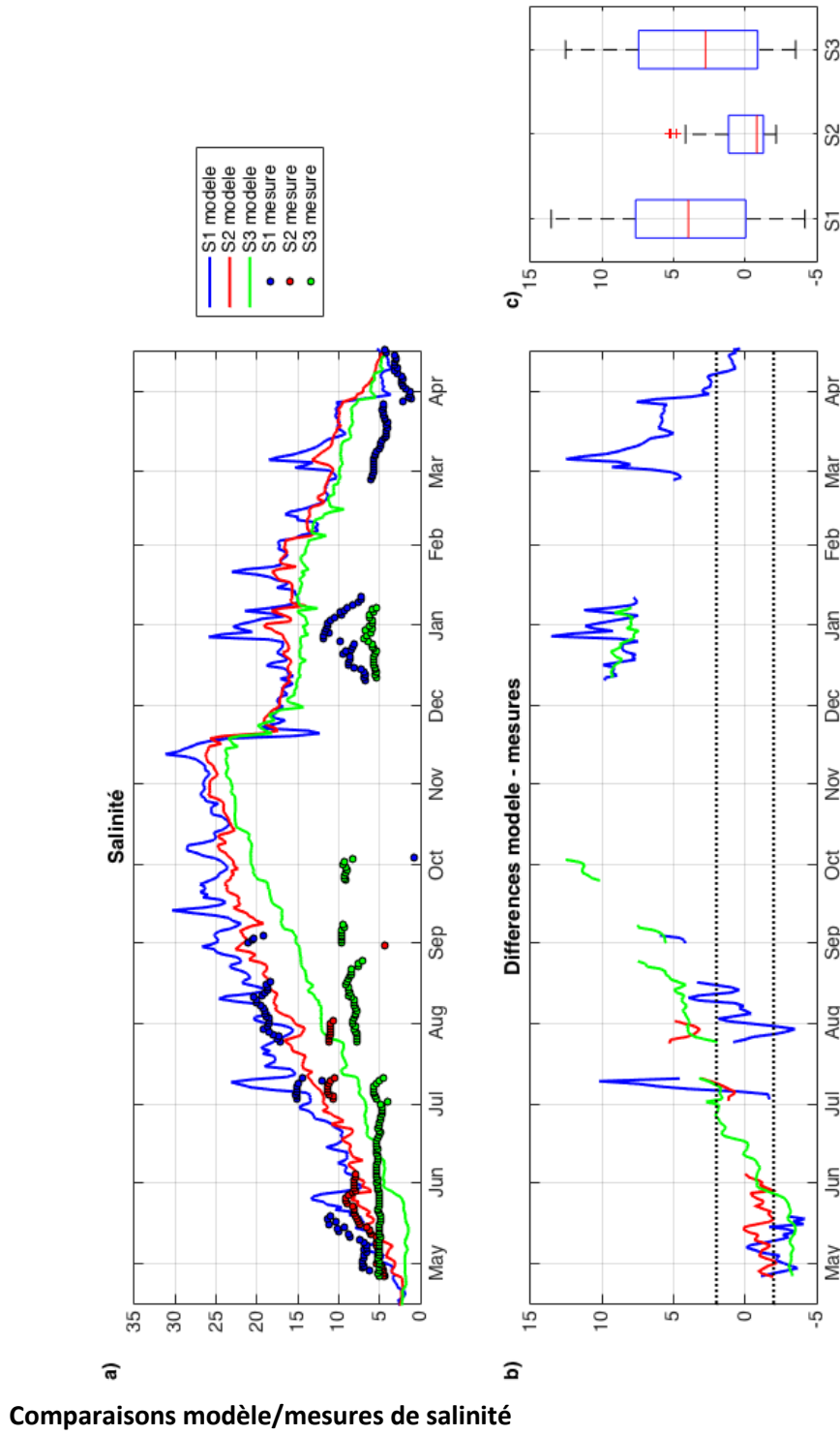


Figure 18: a) Comparaison des salinités modélisées (trait) et mesurées (points) pour les stations S1 (bleu), S2 (rouge) et S3(vert) (a) ; différences entre les valeurs modélisées et mesurées (b) ; et boxplot pour chaque station (c).

5.3. Annexe 3

Comparaisons modèle/mesures de hauteurs d'eau (xe)

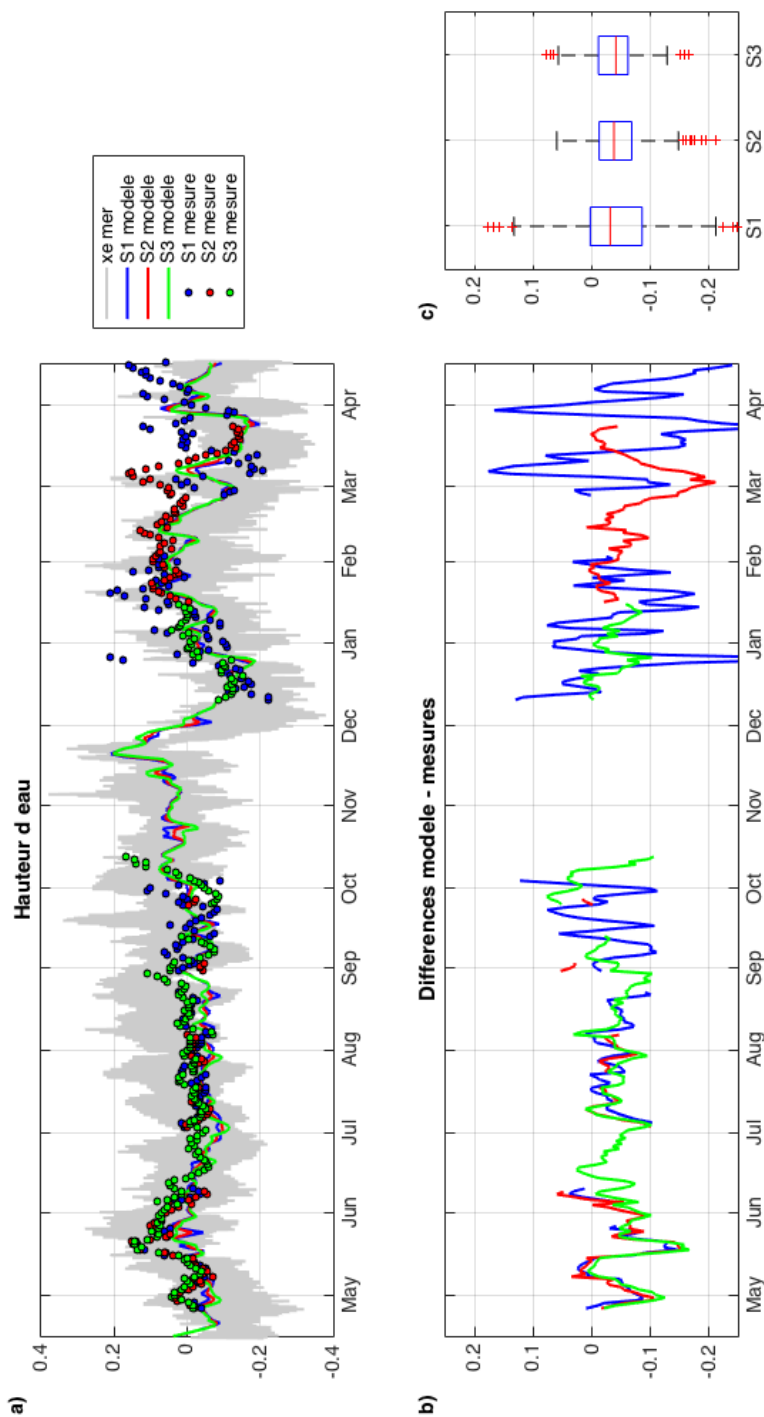
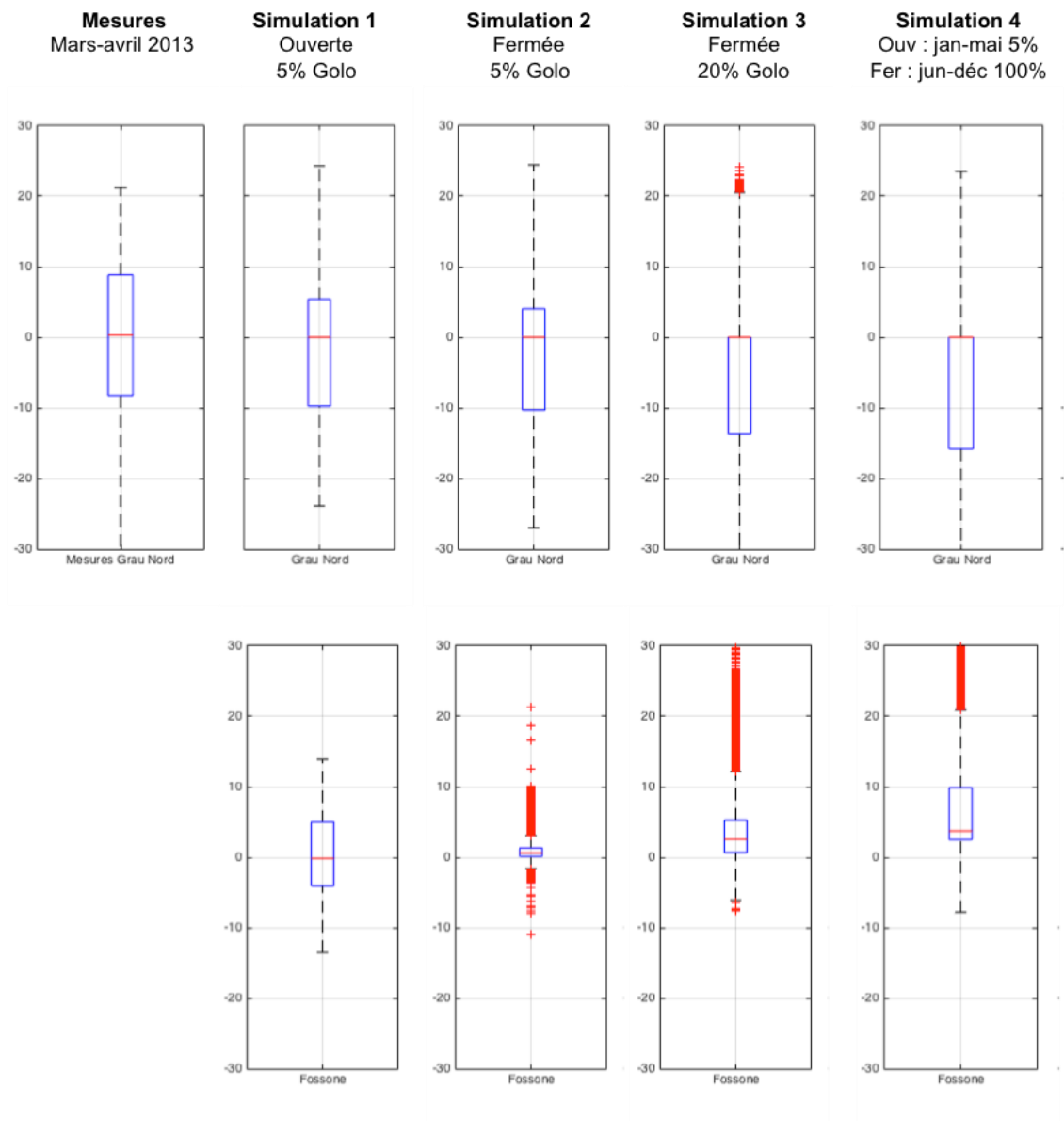


Figure 19: a) Comparaison des hauteurs d'eau modélisées (trait) et mesurées (points) pour les stations S1 (bleu), S2 (rouge) et S3 (vert) (a) ; différences entre les valeurs modélisées et mesurées (b) ; et boxplot pour chaque station (c).

5.4. Annexe 4

Débits entrants et sortants au grau nord et au Fossone



6. Références

- BCEOM (2006) Etang de Biguglia. Etude hydrologique sur le périmètre de schéma d'aménagement et de gestion des eaux. Report
- Castaigns J. (communication personnelle) Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'étang de Biguglia (Corse).
- Dufresne C., Malet N., Fiandrino A., Coudray S. (2017) Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1: Mise en place de la modélisation numérique 3D. Ifremer, Report RST.ODE/UL/LER/PAC/17-14. 29p
- Fiandrino A., Ouisse V., Dumas F., Lagarde F., Pete R., Malet N., Le Noc S., de Wit R. (2017) Spatial patterns in coastal lagoons related to the hydrodynamics of seawater intrusion. 119:132-144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.006>
- Frisoni G., Dutrieux E. (1992) L'etang de Biguglia: Diagnostic écologique 1991-1992. Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement, Report
- Garrido M., Cecchi P., Collos Y., Agostini S., Pasqualini V. (2016) Water flux management and phytoplankton communities in a Mediterranean coastal lagoon. Part I: How to promote dinoflagellate dominance? Marine Pollution Bulletin 104:139-152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.049>
- Kervella S., Curti C. (2017) Réalisation des études de édbits entre la lagune de Biguglia (Haute-Corse) et la mer. i-sea, Report
- Mouillot D., Titeux A., Migon C., Sandroni V., Frodello J.-P., Viale D. (2000) Anthropogenic influences on a mediterranean Nature Reserve: modelling and forecasting. Environmental Modeling & Assessment 5:185-192. doi: 10.1023/a:1011533811237
- Orsoni V., Souchu P., Sauzade D. (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, Report
- Orsoni V., Tomasino C. (2015) Bathymétrie de l'étang de Biguglia : Synthèse et cartographie. Ifremer, Report ODE/LITTORAL/LER-PAC/15/06.
- Pasqualini V., Derolez V., Garrido M., et al. (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., Malet N., Fiandrino A., Orsoni V., Baldi Y. (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, Report 22p
- Umgiesser G., Ferrarin C., Cucco A., Pascalis F. D., Bellafiore D., Ghezzi M., Bajo M. (2014) Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling. Journal of Geophysical Research: Oceans 119:2212-2226. doi: doi:10.1002/2013JC009512