

Rapport final du projet "Etude de l'équilibre hydrologique entre les apports d'eau douce et d'eau salée dans le système Vaccarès et les étangs et marais des salins de Camargue"

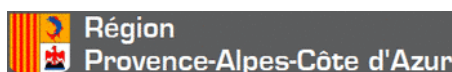
Fiche action GR1 du contrat de delta



Auteurs : Olivier Boutron, Emilie Luna-Laurent, Fondation Tour du Valat.

Yves Chérain, SNPN Réserve naturelle nationale de Camargue.

Date : Février 2021



Sommaire

Rapport final du projet "Etude de l'équilibre hydrologique entre les apports d'eau douce et d'eau salée dans le système Vaccarès et les étangs et marais des salins de Camargue"	1
<i>Fiche action GR1 du contrat de delta</i>	1
1. Introduction.....	6
2. Méthodologie	9
2.1. Modèle numérique.....	9
2.2. Temps de résidence dans les différents étangs	13
2.2.1. Méthodologie	13
2.3. Génération d'un jeu complet de données de terrain validées sur la période de l'étude	15
2.3.1. Extension du réseau existant par l'installation de nouvelles sondes.....	16
2.3.2. Etablissement de lois hydrauliques calibrées pour les ouvrages du site, suivis des manipulations des ouvrages.....	20
3. Période d'étude considéré	22
4. Résultats	23
4.1. Données de terrain.....	23
4.1.1. Données météorologiques	23
4.1.2. Nouvelles sondes installées sur le site	24
4.1.3. Données des sondes déjà existantes sur le site des EMSC.....	29
4.1.4. Etablissement de lois hydrauliques calibrées pour les ouvrages du site	36
4.2. Résultats de modélisation	38
4.2.1. Calage et validation du modèle	38
4.2.2. Initialisation du modèle.....	39
4.2.3. Résultats des simulations hydro-salines.....	43
4.2.4. Temps de résidence.....	58
5. ConclusionS et Perspectives	64
6. Références.....	65

Liste des Figures

Figure 1 : Localisations des étangs et marais des salins de Camargue (en vert) et de l'hydrosystème Vaccarès (en jaune). La double flèche rouge représente la connexion quasiment permanente entre ces deux systèmes par l'ouvrage de la Comtesse.....	6
Figure 2 : représentation schématique des entrées et sorties d'eau douce (flèches bleues) et d'eau salée (flèches rouges) pour les sites des étangs et marais des salins de Camargue (EMSC) et l'hydrosystème Vaccarès.....	7
Figure 3 : Emprise du modèle développé dans le cadre du projet, et bathymétrie associée (en m NGF).	11
Figure 4 : Noms des étangs pris en compte dans le modèle hydro-salin.....	12
Figure 5 : Maillage du modèle TELEMAC-2D développé dans le cadre du projet.....	13
Figure 6 : représentation des sondes déjà existantes sur le site sur la durée de l'étude (sondes de la SNPN Camargue ou de la Tour du Valat ou du PNRC).....	16
Figure 7 : Localisation des 4 sondes installées dans le cadre du projet. Les sondes n°2, 3 et 4 ont été acquises dans le cadre du projet. La sonde n°1 est une sonde de la SNPN Camargue.....	17
Figure 8 : photographies de l'installation de la sonde de niveau à l'exutoire du canal du Versadou (n°1 sur la Figure 7).....	18
Figure 9 : photographies de l'installation de la sonde CTD dans l'étang de Sablons (sonde n°2 sur la Figure 7).....	19
Figure 10 : localisation des ouvrages hydrauliques dont les manipulations ont été suivies sur la période d'étude.	21
Figure 11 : Données de pluie et d'évaporation du 16/11/2017 au 29/09/2018. Evaporation calculée avec la méthode de Penman (1948).....	23
Figure 12 : Niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7).....	24
Figure 13 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7).....	25
Figure 14 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7).....	25
Figure 15 : niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7).....	26
Figure 16 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7).....	26
Figure 17 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7).....	27
Figure 18 : niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7).....	27
Figure 19 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7).....	28
Figure 20 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7).....	28
Figure 21 : niveau d'eau enregistré par la sonde de pression installée à l'exutoire du canal du Versadou (n°1 sur la Figure 7)	29
Figure 22 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Beauduc pour l'année 2018. <i>En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Problème d'instrument ayant entraîné la perte de données du 27 Avril au 26 Juin 2018 (remplacement par nouvel instrument le 26 Juin)</i>	30
Figure 23 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Sainte Anne pour l'année 2018. La sonde de Sainte Anne a été désinstallée le 6 Août 2018, pour	

permettre de remplacer celle défectueuse du Fangassier 1 Centre. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 30

Figure 24 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Vaisseau 1 (Sud) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 31

Figure 25 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Vaisseau 1 (Nord) pour l'année 2018. La sonde de Vaisseau 1 Nord a été désinstallée le 27 Juin 2018 afin de remplacer celle défectueuse de Beauduc. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 32

Figure 26 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Pourtour 2 (Sud) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Le plateau observé pendant la période estivale/automnale correspond à un dépôt du flotteur de la sonde de mesure sur le fond lors de l'assèchement de l'étang.* 32

Figure 27 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Pourtour 2 (Nord) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 33

Figure 28 : Evolution des niveaux d'eau (surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Galabert 2 (Sud) pour l'année 2018. Données manquantes du 3 au 31 Décembre 2018 : un décalage important avec les observations ponctuelles a été constaté lors du premier relevé de 2019, ne permettant pas la correction des données instrumentales sur le mois de Décembre 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Le plateau observé pendant la période estivale correspond à un dépôt sur le fond des flotteurs des sondes de mesure lors de l'assèchement de l'étang.* 34

Figure 29 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Grand Rascaillan (Sud) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 35

Figure 30 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Grand Rascaillan (Nord) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 35

Figure 31 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour l'étang du Fangassier 1 (Centre) pour l'année 2018. Données manquantes du 1^{er} Janvier au 19 Février puis du 19 Juin au 21 Septembre 2018 : des décalages importants avec les observations ponctuelles ont été constatés, ne permettant pas la correction des données instrumentales sur ces périodes. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.* 36

Figure 32 : illustration du traitement d'une campagne de jaugeage faite avec un courantomètre électromagnétique le 10/09/2018 sur un des ouvrages du site. Dans un souci de lisibilité seules 3 sections de mesures sont indiquées. 37

Figure 33 : Illustration du modèle en cours de développement sous Openfoam de l'ouvrage situé entre l'étang du Fangassier et celui du Galabert 2. (a) Photographie de l'ouvrage ; (b) et (c) vues du modèle. 39

Figure 34 : Hauteur d'eau initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h. 40

Figure 35 : Salinité initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h. Les zones en gris correspondent à des zones sans eau. 41

Figure 36 : Concentration initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h pour la simulation des temps de résidence. La concentration est uniforme dans tous les étangs, et égale à 1 g/L.....	42
Figure 37 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.	44
Figure 38 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.....	45
Figure 39 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.....	46
Figure 40 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.	48
Figure 41 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.	49
Figure 42 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.	50
Figure 43 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.	52
Figure 44 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.	53
Figure 45 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.	54
Figure 46 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.	56
Figure 47 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.	57
Figure 48 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.	58
Figure 49 : Masses initiale (16 Novembre 2017) et finale (16 novembre 2018) de traceur dans l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC ». Les masses sont exprimées en tonnes (t).	59
Figure 50 : Masses initiale (16 Novembre 2017) et finale (16 novembre 2018) de traceur dans l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC ». Les masses sont les mêmes que celles de la Figure 49, mais exprimées en pourcentages par rapport à la masse initiale.....	60
Figure 51 : Temps de résidences locaux « intermédiaires » estimés avec l'équation n°6 sur une période de simulation d'une année, soit sur une durée de 365 jours.....	61
Figure 52 : Ecoulements générés dans l'hydrosystème Vaccarès par un vent de type Mistral de 7,6 m/s (Boutron et al., 2015)	63

1. INTRODUCTION

Le site des étangs et marais des salins de Camargue (EMSC, représenté en vert sur la Figure 1) a été acquis par le Conservatoire du littoral entre 2008 et 2012 (6500 ha). La plus grande partie de ce site est constituée d'anciens salins, où d'importants travaux hydrauliques (création d'ouvrages, créations de chenaux, décloisonnement d'étangs, etc.) ont été mis en œuvre dans le but de restaurer la connectivité avec la mer au sud et l'hydrosystème Vaccarès au nord. L'hydrosystème Vaccarès, représenté en jaune sur la Figure 1, est constitué des étangs du Lion, de la Dame, du Vaccarès et des Impériaux. Une connexion quasiment permanente (représentée par la double flèche rouge sur la Figure 1) existe dorénavant entre ces deux systèmes, au niveau de l'ouvrage de la Comtesse dont au moins une vanne est ouverte en permanence, hormis en période d'évènements extrêmes (par exemple par fort niveau marin).

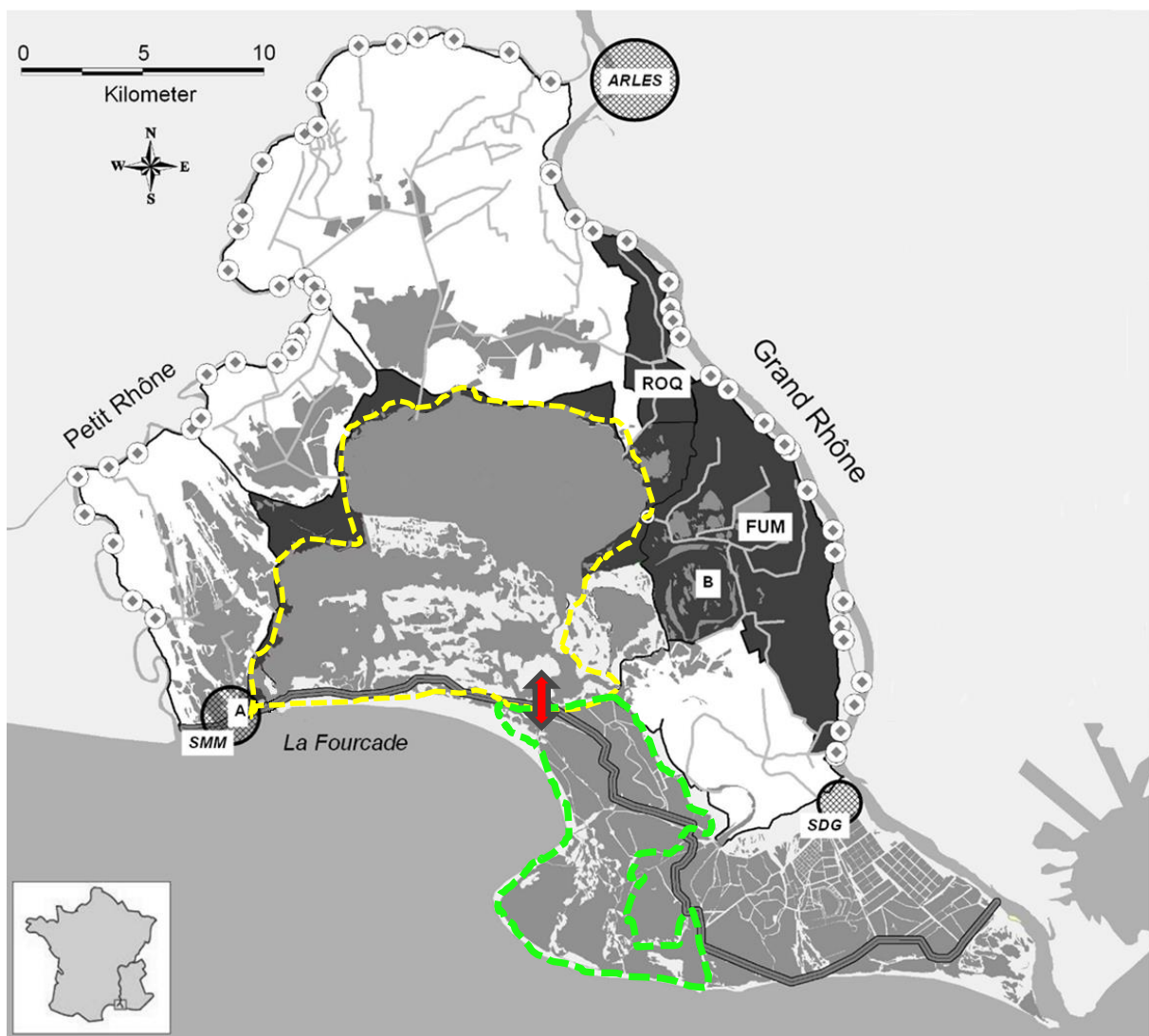


Figure 1 : Localisations des étangs et marais des salins de Camargue (en vert) et de l'hydrosystème Vaccarès (en jaune). La double flèche rouge représente la connexion quasiment permanente entre ces deux systèmes par l'ouvrage de la Comtesse.

La dynamique hydro-saline joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement des écosystèmes lagunaires. Cette dynamique est très complexe pour les EMSC et l'hydrosystème Vaccarès, sujets à de nombreuses entrées et sorties d'eau douce et d'eau salée, comme indiqué sur la Figure 2.

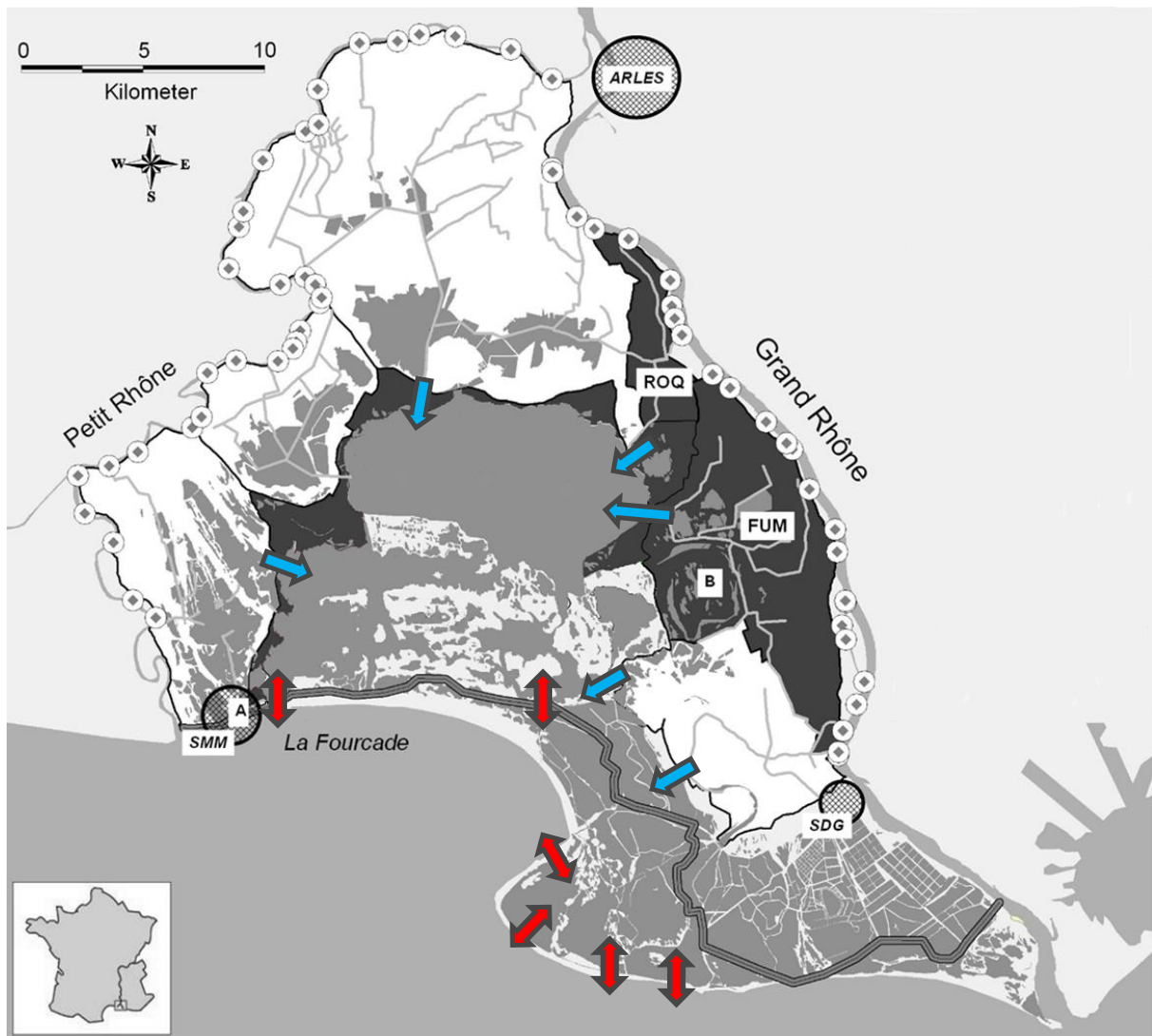


Figure 2 : représentation schématique des entrées et sorties d'eau douce (flèches bleues) et d'eau salée (flèches rouges) pour les sites des étangs et marais des salins de Camargue (EMSC) et l'hydrosystème Vaccarès

A l'heure actuelle, les gestionnaires disposent de connaissances sur le fonctionnement hydro-salin global de l'hydrosystème Vaccarès, et sur le fonctionnement hydraulique des EMSC (la dynamique en terme de salinité reste à y être caractérisée suite aux récents travaux hydrauliques).

Cependant, les conséquences de la reconnexion hydraulique récente de ces deux zones sur leurs dynamiques hydro-salines respectives, et sur celle de l'ensemble de cette "nouvelle entité hydraulique" de 16000 ha, ne sont quant à elles pas bien connues.

Les gestionnaires ont donc besoin d'avoir des éléments quantitatifs sur les conséquences que vont avoir :

- la reconnexion hydraulique récente entre l'hydrosystème Vaccarès et les EMSC,
- les différents choix de gestion de l'eau sur ces espaces (travaux hydrauliques, gestion des ouvrages, aménagements des bassins versants, ...),
- les changements climatiques à venir.

Le réseau de suivi actuellement en place ne permettant pas à lui seul de caractériser cette dynamique hydro-saline, il est nécessaire de lui associer une approche de modélisation spatialisée.

Le projet décrit dans ce rapport consiste donc à **développer un modèle hydro-salin de l'ensemble de cette zone afin d'en caractériser les dynamiques en termes de salinité et de temps de résidence (exprimant le degré de confinement des différents étangs)**. L'outil développé permettra à l'avenir d'étudier la dynamique "eau douce / eau salée" de ce vaste système, en fonction des forçages marin, météorologique (pluie, évapotranspiration, vent), et des choix de gestion de l'eau (ouvrages hydrauliques, bassins versants limitrophes). Ce modèle pourra in fine être utilisé pour guider les gestionnaires sur la gestion à mettre en œuvre sur cette zone et sur les conséquences des changements climatiques à venir.

Par ailleurs, le modèle développé dans ce projet est une étape indispensable aux futures études à mener sur cette zone, concernant la dynamique des herbiers, le devenir des produits phytosanitaires et des nutriments, la dynamique hydro-sédimentaire du site, la dynamique des peuplements de poissons.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE NUMERIQUE

Dans le cadre de ce projet un modèle hydro-salin a été élaboré. Ce modèle permet de simuler le fonctionnement hydro-salin de l'ensemble constitué des étangs du Vaccarès, des Impériaux, du Lion et de la Dame, et des Etangs et Marais des Salins de Camargue. Il a été développé sous TELEMAC-2D (<http://www.opentelemac.org/>) par la Tour du Valat. Il se base sur les précédents modèles développés pour l'hydrosystème Vaccarès (Boutron et al., 2015) et pour les Etangs et Marais des Salins de Camargue (Boutron and Chauvelon, 2016).

TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à deux dimensions d'espace horizontales :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \vec{\nabla} u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \vec{\nabla} v) \quad (3)$$

avec :

- h (m) : la hauteur d'eau,
- u,v (m/s) : les composantes de la vitesse d'écoulement,
- g (m/s²) : l'accélération de la pesanteur,
- ν_t : coefficient de diffusion de la vitesse,
- Z (m) : cote de la surface libre,
- t (s) : temps,
- x,y (m) : composantes d'espaces horizontales,
- S_h (m/s) : source ou puits d'eau,
- S_x, S_y (m/s²) : termes source ou puits des équations dynamiques. Ce sont des termes sources représentant par exemple le vent, le frottement sur le fond, ...

Pour la salinité, l'équation ci-dessous est également résolue :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_T \vec{\nabla} T) \quad (4)$$

Avec

- T la salinité (PSU) moyennée sur la colonne d'eau,
- ν_T le coefficient de diffusion du traceur (m².s⁻¹),
- S_T terme source ou puits de sel (kg.m⁻³.s⁻¹).

h, u, v et T (salinité) sont les inconnues que TELEMAC 2D calcule à chaque pas de temps. Les résultats principaux de TELEMAC-2D sont donc entre autre, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau, la vitesse et la salinité moyennes sur la verticale. Le pas de temps de calcul du modèle "Hydrosystème Vaccarès / EMSC" est de 5 secondes. Les résultats sont ensuite agrégés temporellement au pas de temps horaire. Le maillage du modèle est constitué d'environ 70 000 nœuds.

Les processus de cristallisation/dissolution des différents sels contenus dans l'eau des systèmes lagunaires sont des processus complexes, faisant intervenir de nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques différentes (Usiglio, 1849). Ainsi, concernant les dynamiques de salinité, il a été décidé de modéliser celle-ci comme une seule grandeur, et de ne pas détailler l'ensemble des réactions chimiques des différents sels qui la définissent (la salinité étant la somme des différents sels contenus dans l'eau). Ce choix se justifie par 1/ la grande complexité des phénomènes de cristallisation/dissolution de ces sels, et 2/ par les temps de calculs rédhibitoires qu'entraînerait la modélisation sous Telemac-2D de l'ensemble de ces sels.

Dans l'approche de modélisation utilisée, lorsque la salinité dépasse le seuil de 350 PSU, une partie du sel de la colonne d'eau cristallise et se dépose au fond de l'étang. Lorsque les conditions de salinité dans la colonne d'eau le permettent, ce sel cristallisé peut se dissoudre et être à nouveau transféré dans la colonne d'eau.

La description théorique complète de TELEMAC-2D est présentée dans l'ouvrage : "Hydrodynamique des écoulements à surface libre - modélisation numérique avec la méthode des éléments finis", de Jean-Michel Hervouet (Presse des Ponts et Chaussées - 2003).

L'emprise du modèle et la bathymétrie associée sont indiquées sur la Figure 3 ci-après.

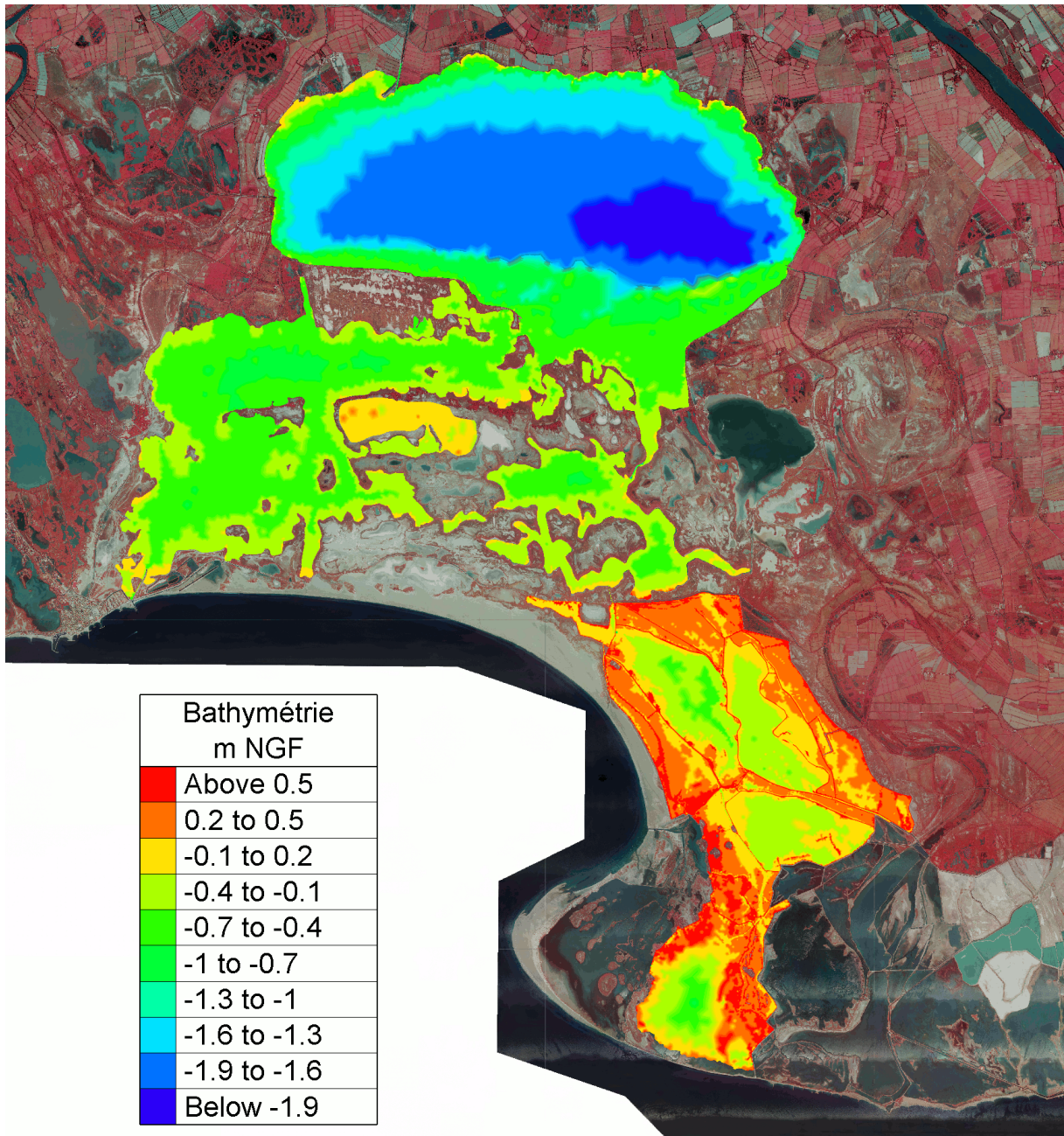


Figure 3 : Emprise du modèle développé dans le cadre du projet, et bathymétrie associée (en m NGF).

Les noms des étangs modélisés sont quant à eux indiqués sur la Figure 4 ci-dessous :

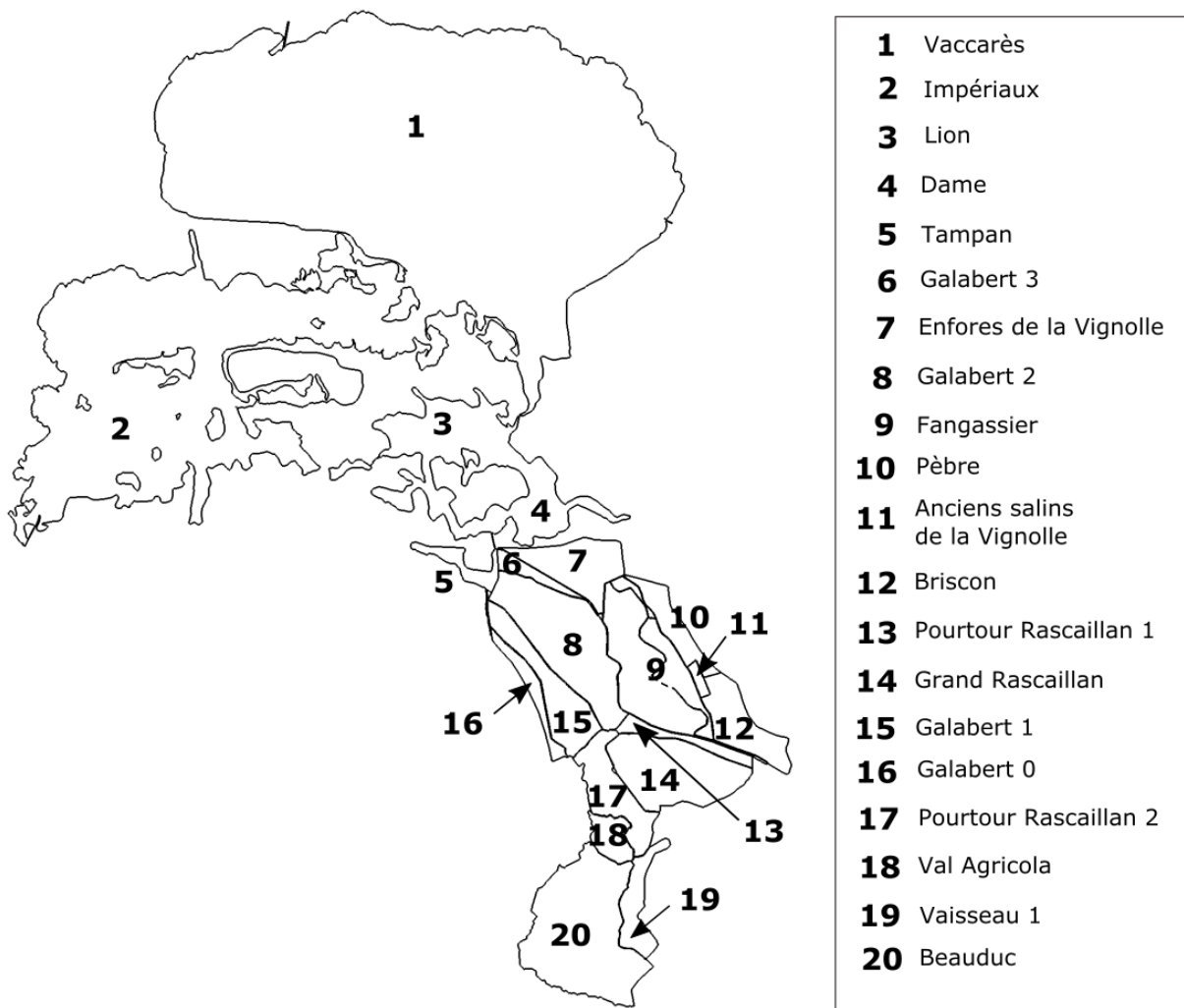


Figure 4 : Noms des étangs pris en compte dans le modèle hydro-salin

Enfin, le maillage du modèle TELEMAC-2D est représenté sur la Figure 5.

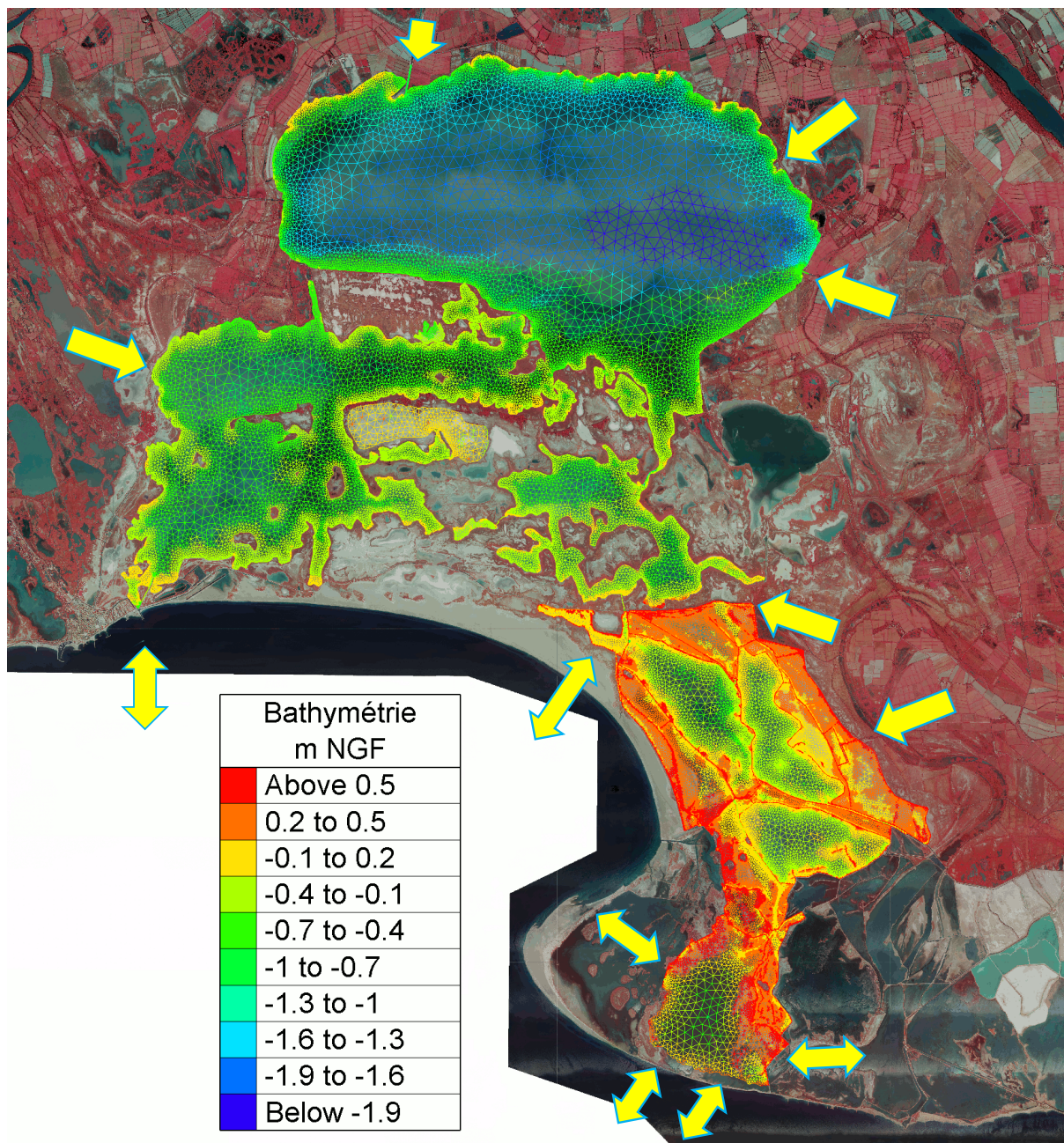


Figure 5 : Maillage du modèle TELEMAC-2D développé dans le cadre du projet.

Lors des simulations, le modèle prend en compte les effets de la pluie, de l'évaporation et du vent, ainsi que les entrées et sorties d'eau par échanges avec la mer ou les bassins versants périphériques (dont les principales sont représentées par des flèches ou double flèches jaunes sur la Figure 5).

2.2. TEMPS DE RESIDENCE DANS LES DIFFERENTS ETANGS

2.2.1. Méthodologie

Le calcul des temps de résidence dans les différents étangs de l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC » a nécessité des développements spécifiques par rapport aux méthodologies existantes dans la littérature.

En système lagunaire, une méthode classique (Cucco et al., 2009; Cucco and Umgiesser, 2006; Ferrarin et al., 2013, 2013, 2010, 2008; Takeoka, 1984a, 1984b; Umgiesser et al., 2014, 2005) pour déterminer le temps de résidence est de réaliser des simulations hydrodynamique du devenir d'un traceur inerte (i.e. non soumis à des transformations chimiques et biologiques) réparti uniformément dans le système en début de simulation (i.e. la concentration du traceur est la même partout dans le système en début de simulation).

L'évolution des concentrations de ce traceur en chaque point du maillage sont ensuite calculées par le modèle en fonction du temps, ce qui permet de calculer un temps de résidence local $\tau(x, y)$ selon l'équation :

$$\tau(x, y) = \int_0^{\infty} \frac{c(x, y, t)}{c_0(x, y, t = 0)} dt \quad (5)$$

Avec :

- $\tau(x, y)$: temps de résidence local au nœud de coordonnées (x, y)
- $c_0(x, y, t = 0)$: concentration initiale du traceur au nœud de coordonnées (x, y)
- $c(x, y, t)$: concentration du traceur au nœud de coordonnées (x, y) et au temps t .

Les simulations sont réalisées jusqu'à ce que la masse totale de traceur restante dans le système soit proche de zéro. A partir des différents temps de résidence locaux, on peut alors déterminer un temps de résidence global τ_{Global} égal au maximum de l'ensemble des temps de résidence locaux.

Une des limitations dans ce type d'approche est que les phénomènes de pluie et d'évaporation ne sont pas pris en comptes dans les modélisations correspondantes. Les simulations se font à niveaux d'eau constants. La concentration du traceur $c(x, y, t)$ ne peut ainsi pas augmenter au court du temps, et sa diminution est uniquement liée à des sorties d'eau du système lagunaire vers la mer.

Dans le cadre de l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC », l'évaporation et la pluie ont une très grande influence sur les écoulement internes de lagunes, mais également sur leurs échanges hydro-salins avec les systèmes périphériques comme la mer Méditerranée, ils ne peuvent donc pas être négligés lors de la détermination des temps de résidence.

Nous avons donc dans le cadre de ce projet adapté la méthodologie précédente en calculant les temps de résidence locaux avec la nouvelle équation :

$$\tau_{adapté}(x, y) = \int_0^{\infty} \frac{M(x, y, t)}{M_0(x, y, t = 0)} dt \quad (6)$$

Avec :

- $\tau_{adapté}(x, y)$: temps de résidence local du nœud de coordonnées (x, y)
- $M_0(x, y, t = 0)$: masse de traceur initiale au nœud de coordonnées (x, y)
- $M(x, y, t)$: masse de traceur au nœud de coordonnées (x, y) et au temps t .

Les simulations sont comme dans l'approche classique réalisées jusqu'à que la masse totale de traceur restante dans le système soit proche de zéro. A partir des différents temps de résidence locaux, on peut alors déterminer un temps de résidence global $\tau_{Globaladapté}$ égal au maximum de l'ensemble des temps de résidence locaux.

2.3. GENERATION D'UN JEU COMPLET DE DONNEES DE TERRAIN VALIDEES SUR LA PERIODE DE L'ETUDE

Pour pouvoir réaliser les simulations de la dynamique hydro-saline et des temps de résidence, il est nécessaire de disposer de données de terrain, pour :

1/ indiquer au modèle les entrées et sorties d'eau (par pluie, évaporation, échanges avec la mer et les bassins versants agricoles, stations de pompage, etc),

2/ Initialiser le modèle (i.e. définir les niveaux d'eau et les salinités dans les différents étangs en début de simulation),

3/ Disposer de mesures au sein des étangs pour pouvoir calibrer et valider le modèle.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, nous avons avec la SNPN Camargue et le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC) pu générer un ensemble de données de terrain calibrées et validées grâce aux sondes représentées sur la Figure 6.



Figure 6 : représentation des sondes déjà existantes sur le site sur la durée de l'étude (sondes de la SNPN Camargue ou de la Tour du Valat ou du PNRC).

2.3.1. Extension du réseau existant par l'installation de nouvelles sondes

Le réseau de mesure existant avant le présent projet ne permettait pas de quantifier certaines entrées/sorties d'eau dans le système, comme notamment les apports d'eau par le Versadou dans le site, où les entrées/sorties d'eau dans l'étang de Beauduc, par échanges avec la mer, avec l'étang de

Sablons ou avec celui de Saint Anne. Il a donc été installé au cours du projet 4 sondes supplémentaires aux positions indiquées sur la Figure 7.

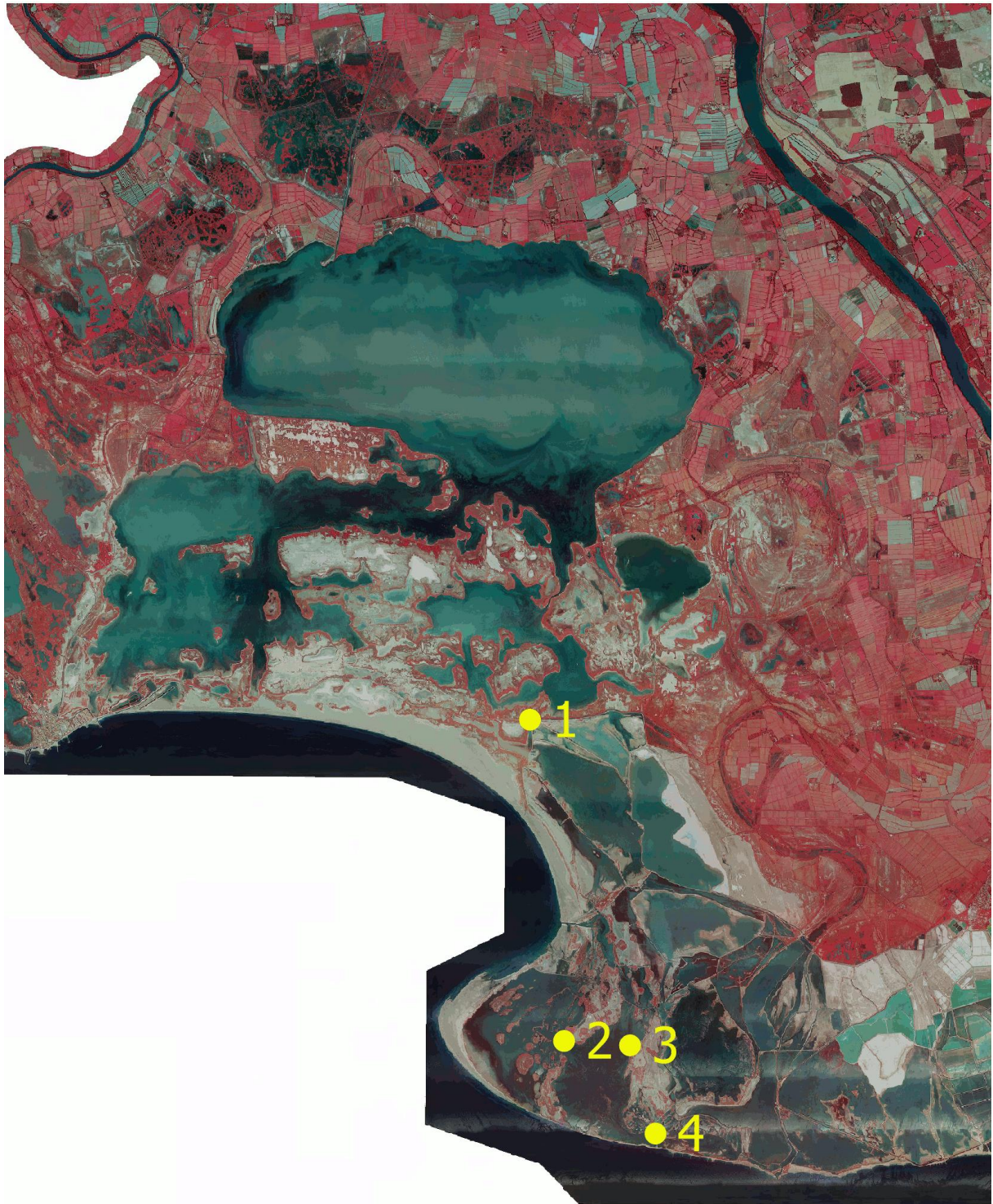


Figure 7 : Localisation des 4 sondes installées dans le cadre du projet. Les sondes n°2, 3 et 4 ont été acquises dans le cadre du projet. La sonde n°1 est une sonde de la SNPN Camargue.

L'installation de ces sondes s'est faite en collaboration avec la SNPN Camargue. Les Figure 8 et Figure 9 illustrent l'installation des sondes n°1 et 2 de la Figure 7.



Figure 8 : photographies de l'installation de la sonde de niveau à l'exutoire du canal du Versadou (n°1 sur la Figure 7)





Figure 9 : photographies de l'installation de la sonde CTD dans l'étang de Sablons (sonde n°2 sur la Figure 7).

2.3.2. Etablissement de lois hydrauliques calibrées pour les ouvrages du site, suivis des manipulations des ouvrages

Par ailleurs, des campagnes de jaugeage ont été faites pour estimer les pertes de charges de plusieurs des ouvrages du site. Lors de ces campagnes, les niveaux d'eau ont été mesurés de chaque côté de l'ouvrage et le champ des vitesses d'écoulements a été mesuré au sein de l'ouvrage à l'aide d'un courantomètre électromagnétique. Grâce à ces mesures les coefficients de pertes de charge relatifs à chaque ouvrage ont pu être déterminés, rendant possible l'estimation des volumes d'eau qui transitent dans chaque ouvrage par utilisation d'une loi hydraulique.

De plus, avec les services techniques de la ville des Saintes-Maries de la Mer (gestionnaires de l'ouvrage de la Fourcade), de la SNPN (ouvrage de la Comtesse) et du PNRC (ouvrages des EMSC), une base de données des manipulations faites sur les différents ouvrages du site a pu être construite sur la période d'étude. Les ouvrages concernés sont indiqués en vert sur la Figure 10.



Figure 10 : localisation des ouvrages hydrauliques dont les manipulations ont été suivies sur la période d'étude.

3. PERIODE D'ETUDE CONSIDEREE

Dans le cadre de ce projet, **la période considérée s'étend du 16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h.**

Le 16/11/2017 correspond à la date pour laquelle l'ensemble des sondes du projet ont été installées. Nous n'avons pour la plupart des modélisations pas considéré la période postérieure au 29/09/2018, de par la fin du contrat de travail à cette date de la personne du PNRC en charge 1/ de la manipulation de tous les ouvrages du site des EMSC et 2/ du remplissage des fiches de suivis de ces ouvrages. L'état d'ouverture de ces ouvrages n'était donc pour cette période pas connu de façon fiable, et générerait trop d'incertitude sur les résultats de modélisation.

4. RESULTATS

4.1. DONNEES DE TERRAIN

4.1.1. Données météorologiques

Concernant les aspects météorologiques, la Figure 11 présente les données de pluie et d'évaporation pour cette période, enregistrées à la station Météo France située à proximité de la Tour du Valat. L'évaporation a été estimée par la Tour du Valat en utilisant la méthode de (Penman, 1948).

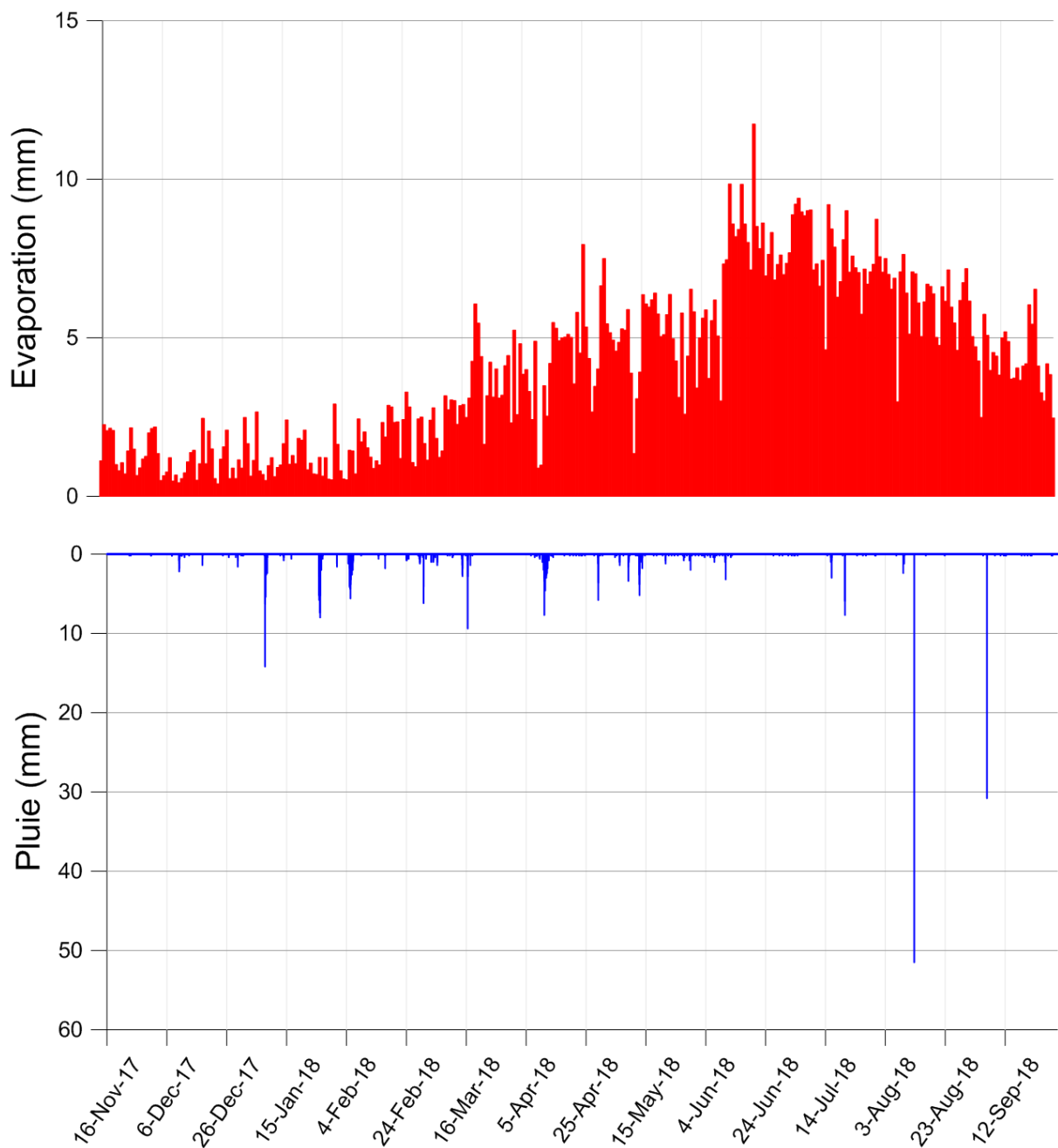


Figure 11 : Données de pluie et d'évaporation du 16/11/2017 au 29/09/2018. Evaporation calculée avec la méthode de Penman (1948).

Sur la période considérée, l'évaporation cumulée est de 1294 mm, pour une pluie cumulée de 464 mm.

4.1.2. Nouvelles sondes installées sur le site

Les 4 nouvelles sondes installées (voir Figure 7) ont été relevées chaque mois par la SNPN Camargue (sonde 1) et par la Tour du Valat (sondes 2, 3 et 4), puis validées pour générer des jeux de données exploitables pour la modélisation. Les données de ces sondes sur la période du 16/11/2017 au 31/12/2018 sont illustrées de la Figure 12 à la Figure 21, en termes de niveau d'eau, conductivité et température.

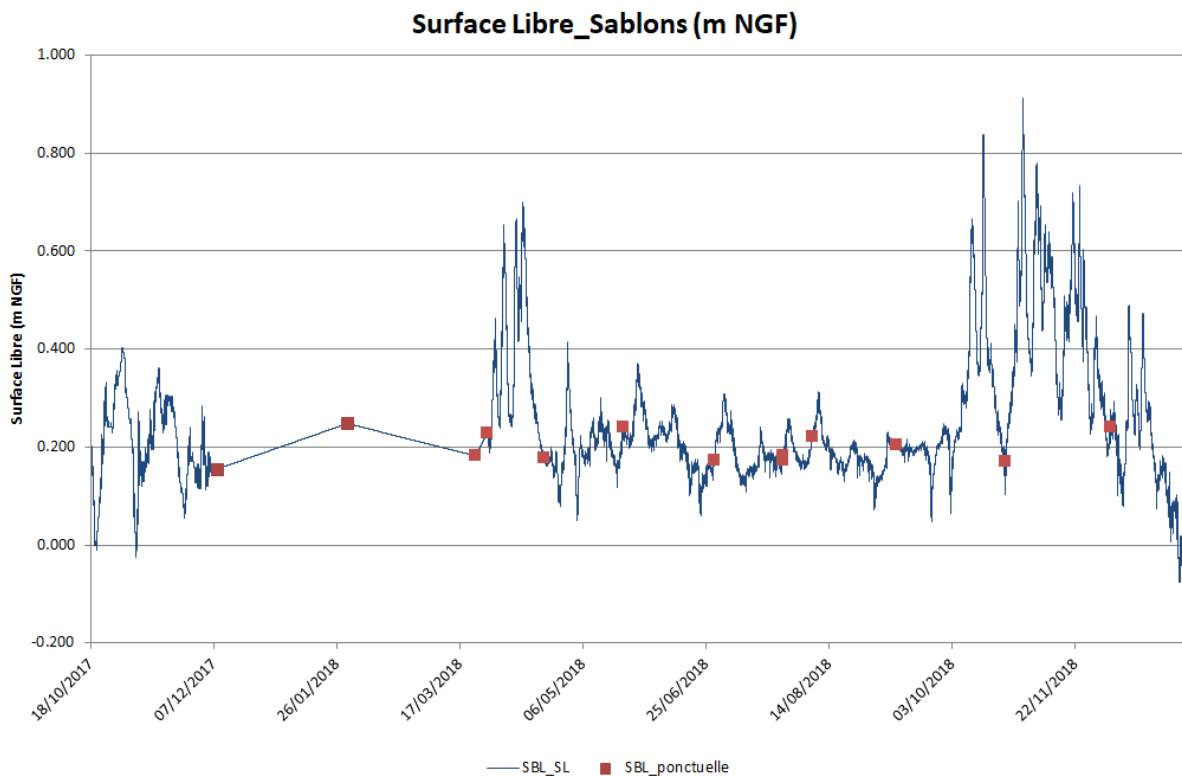


Figure 12 : Niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7)

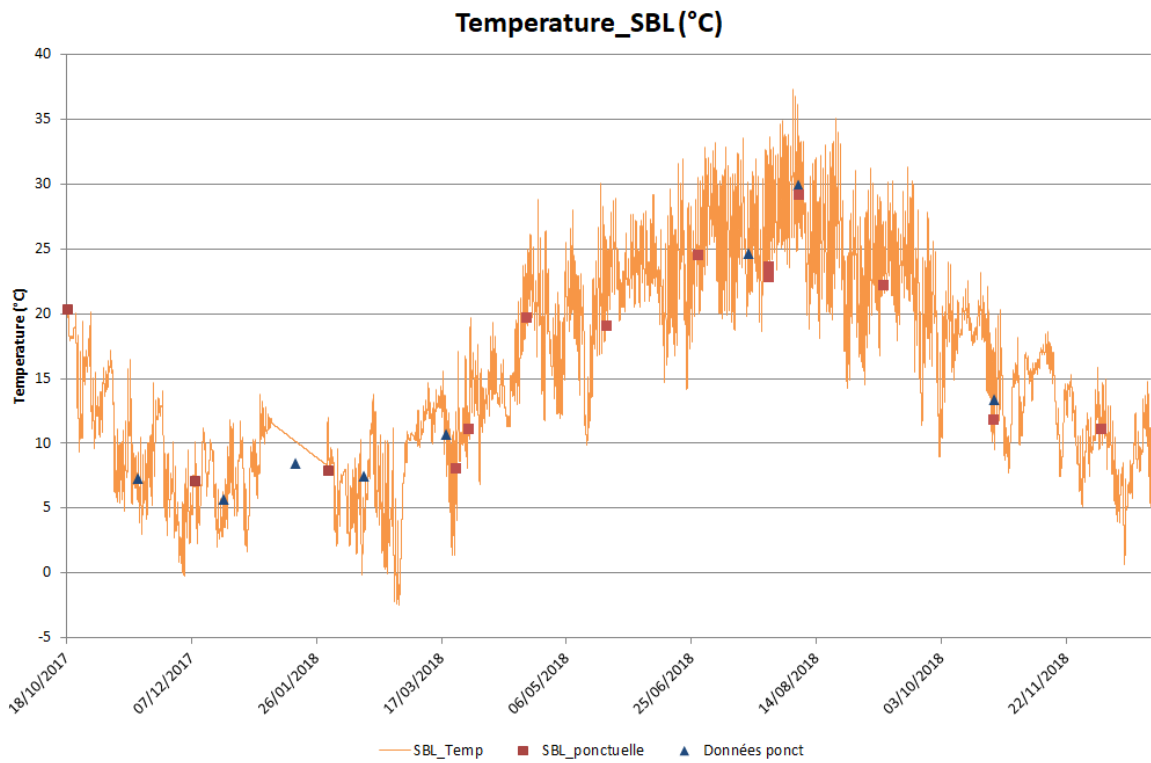


Figure 13 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7)

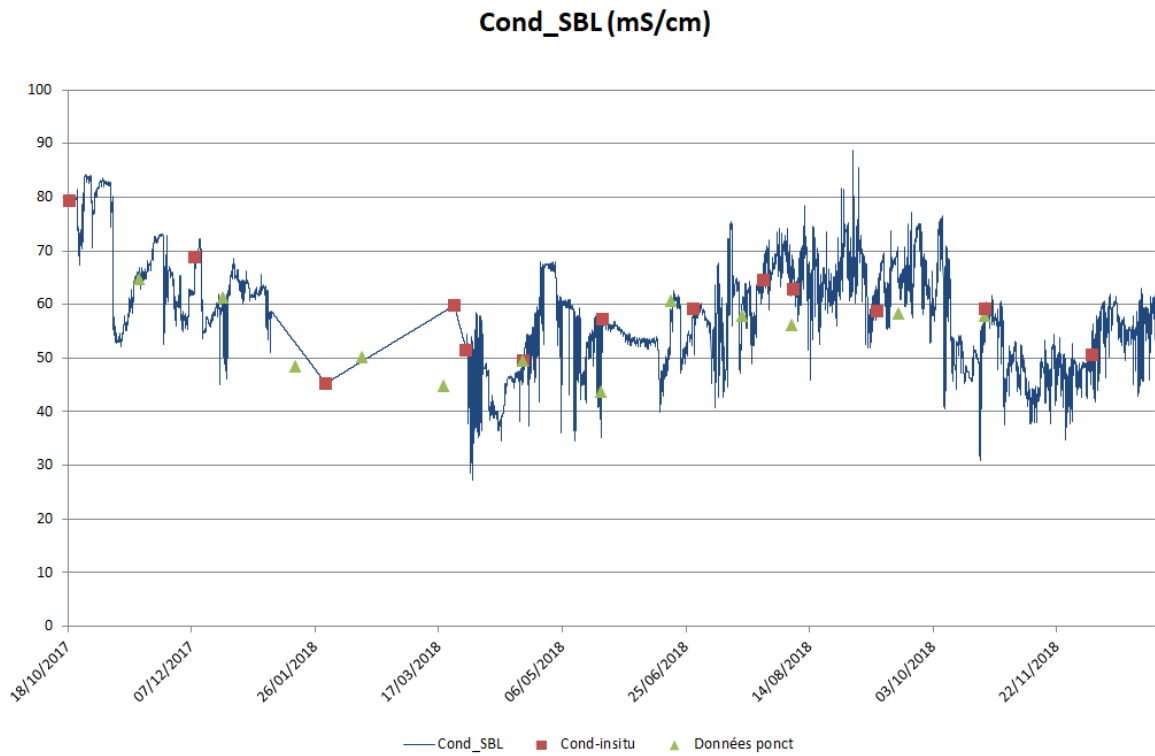


Figure 14 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Sablons (n°2 sur la Figure 7)

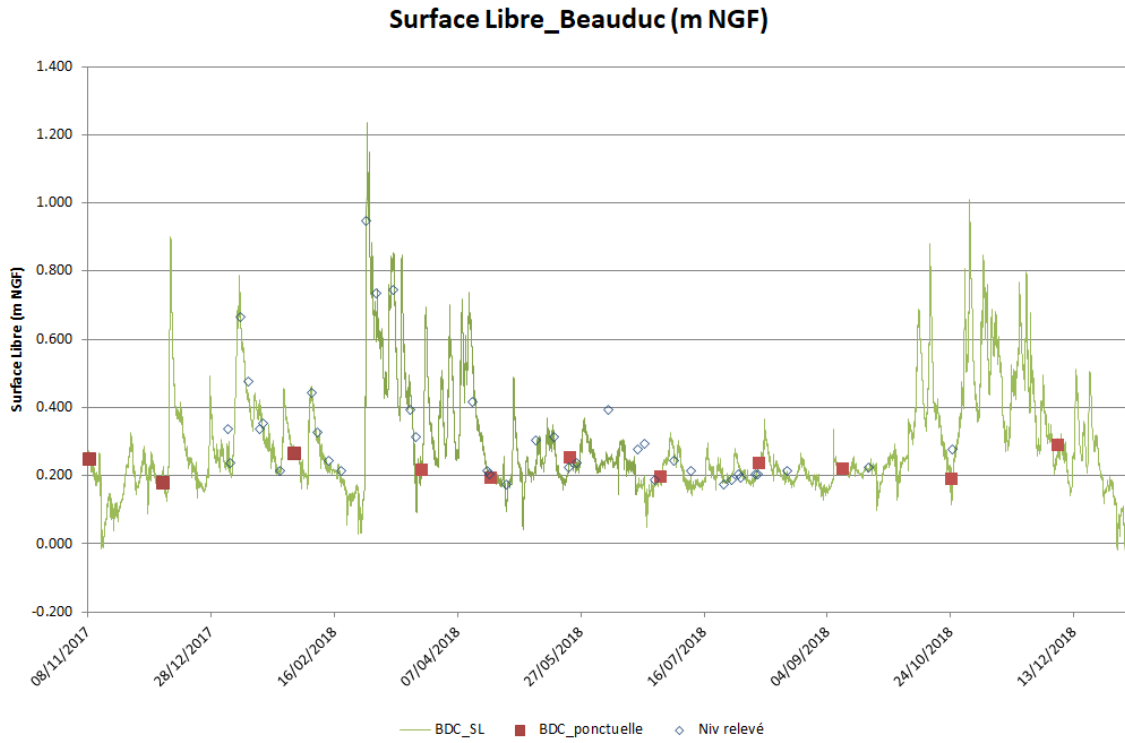


Figure 15 : niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7)

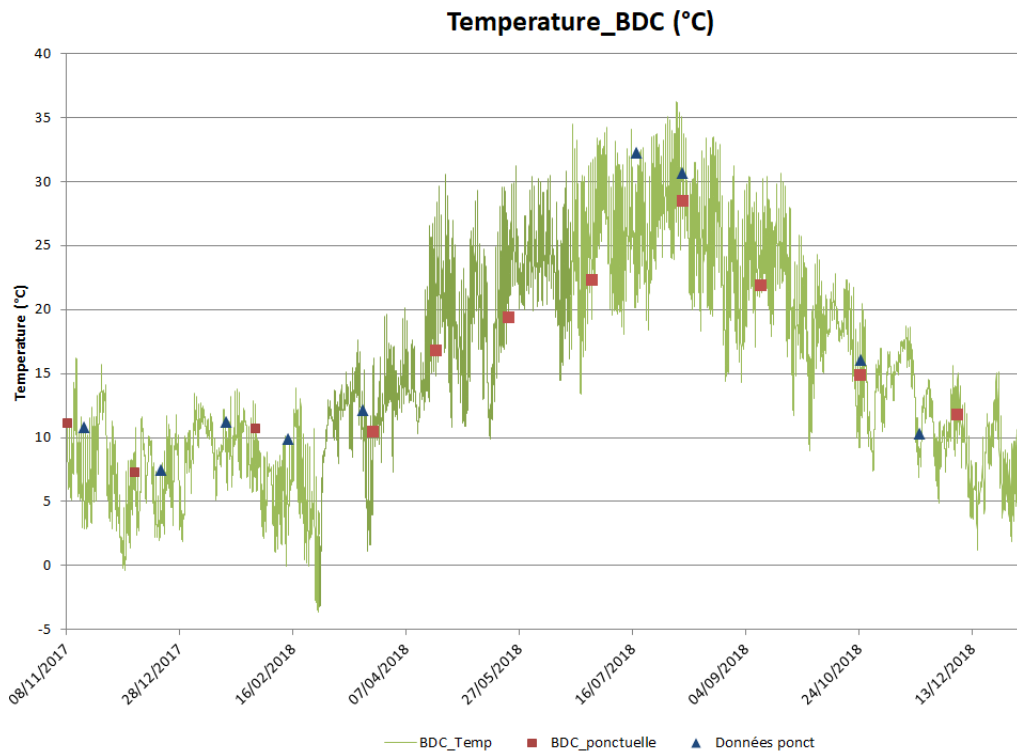


Figure 16 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7)

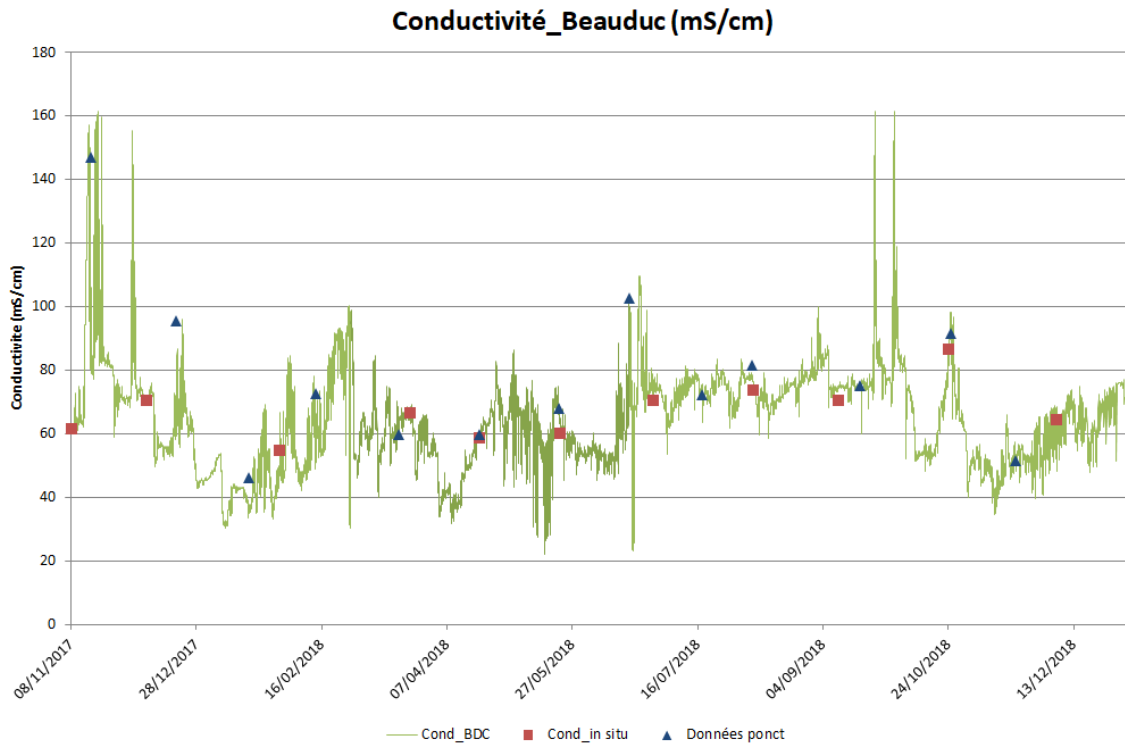


Figure 17 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Beauduc (n°3 sur la Figure 7)

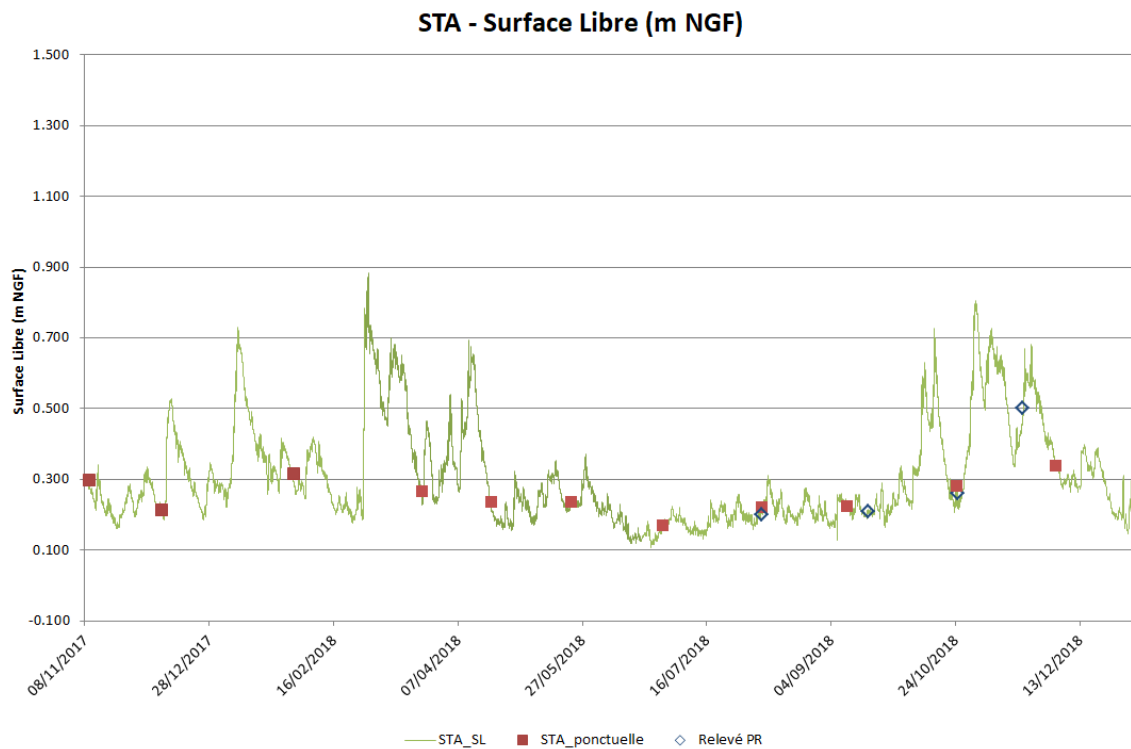


Figure 18 : niveau d'eau enregistré par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7)

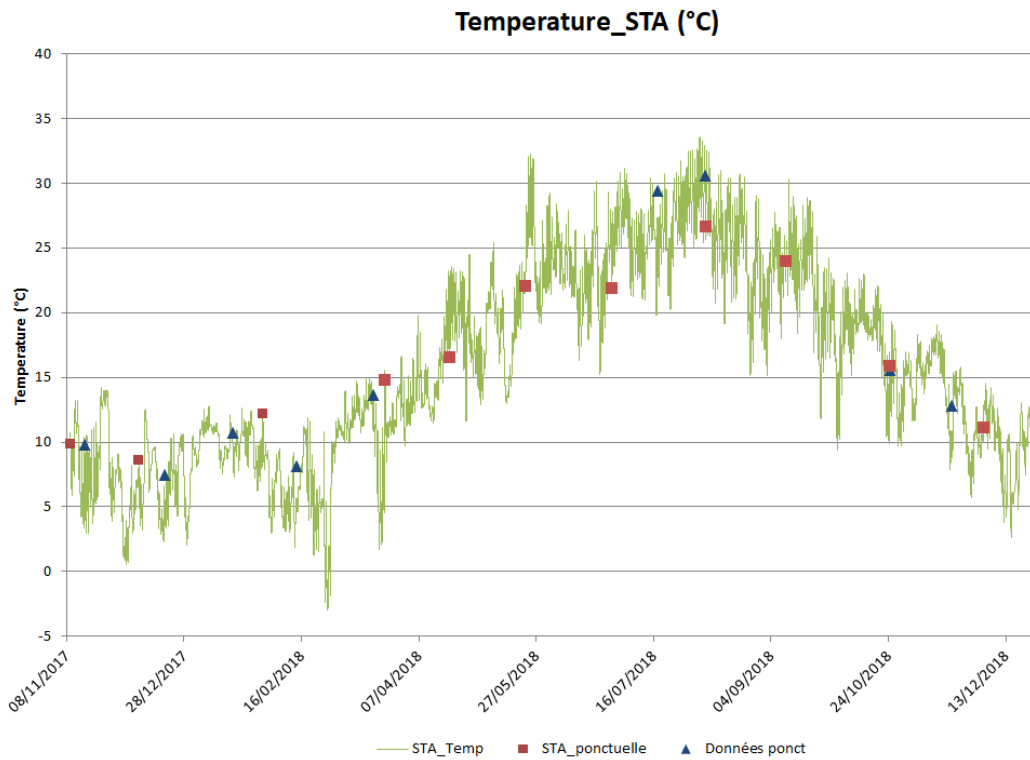


Figure 19 : température enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7)

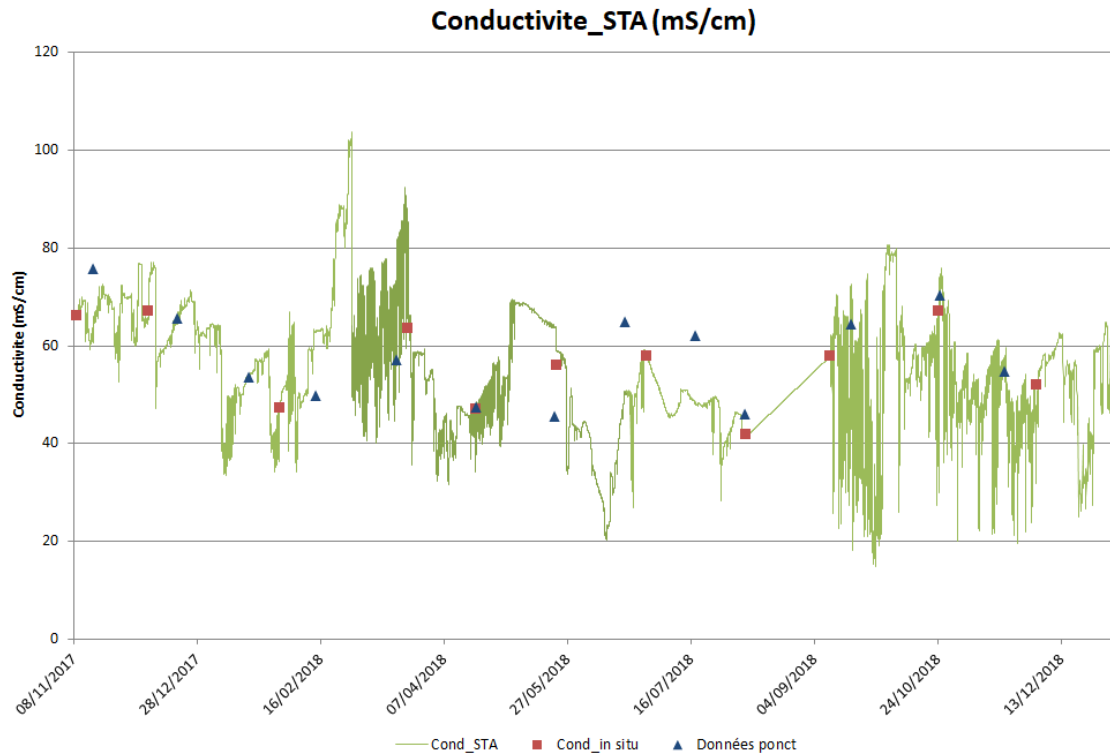


Figure 20 : conductivité enregistrée par la sonde CTD installée dans l'étang de Saint Anne (n°4 sur la Figure 7)

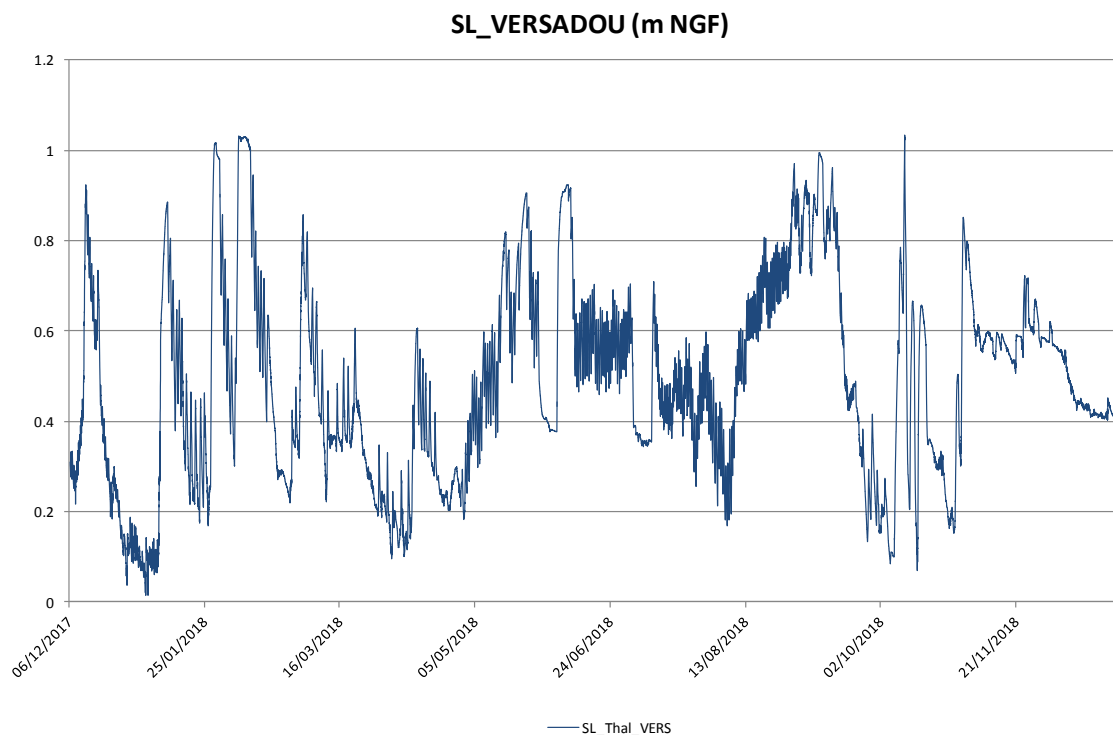


Figure 21 : niveau d'eau enregistré par la sonde de pression installée à l'exutoire du canal du Versadou (n°1 sur la Figure 7)

4.1.3. Données des sondes déjà existantes sur le site des EMSC

En collaboration avec M. Patrick Rigaud du PNR Camargue, les données des sondes déjà existantes sur le site des EMSC ont été récoltées, validées et synthétisées sous une forme utilisable pour la mise en œuvre du modèle. Les données résultantes de ce travail sont indiquées de la Figure 22 à la Figure 31.

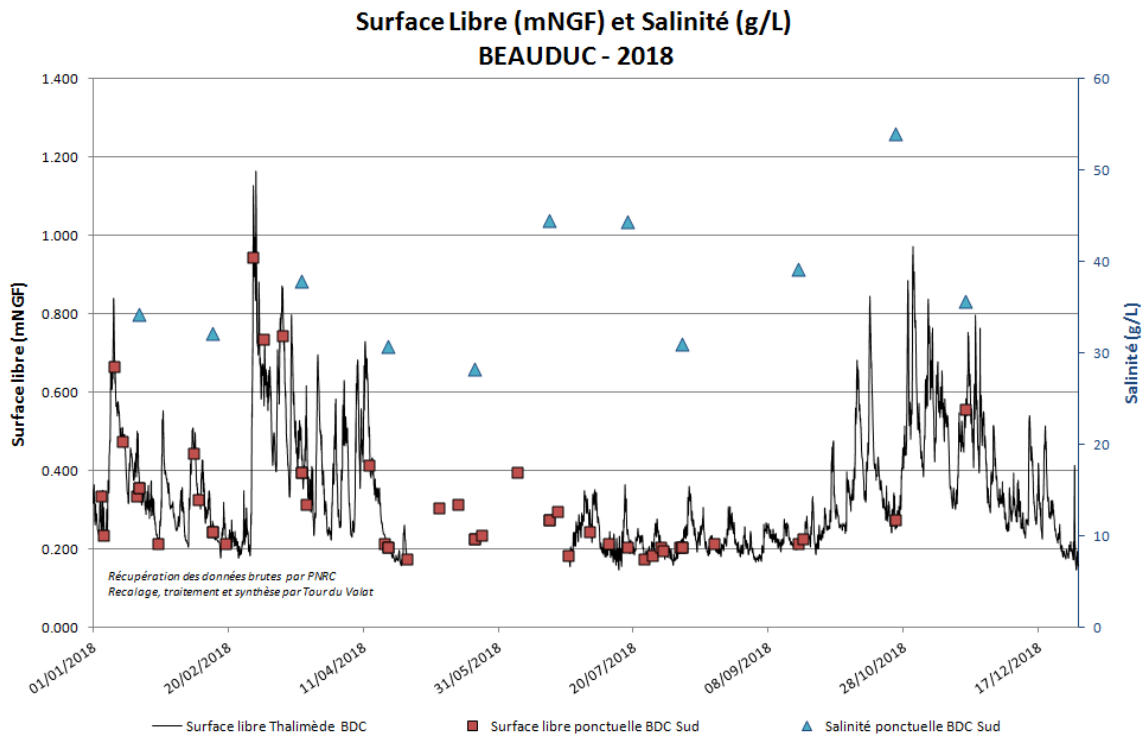


Figure 22 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Beauduc pour l'année 2018. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Problème d'instrument ayant entraîné la perte de données du 27 Avril au 26 Juin 2018 (remplacement par nouvel instrument le 26 Juin)

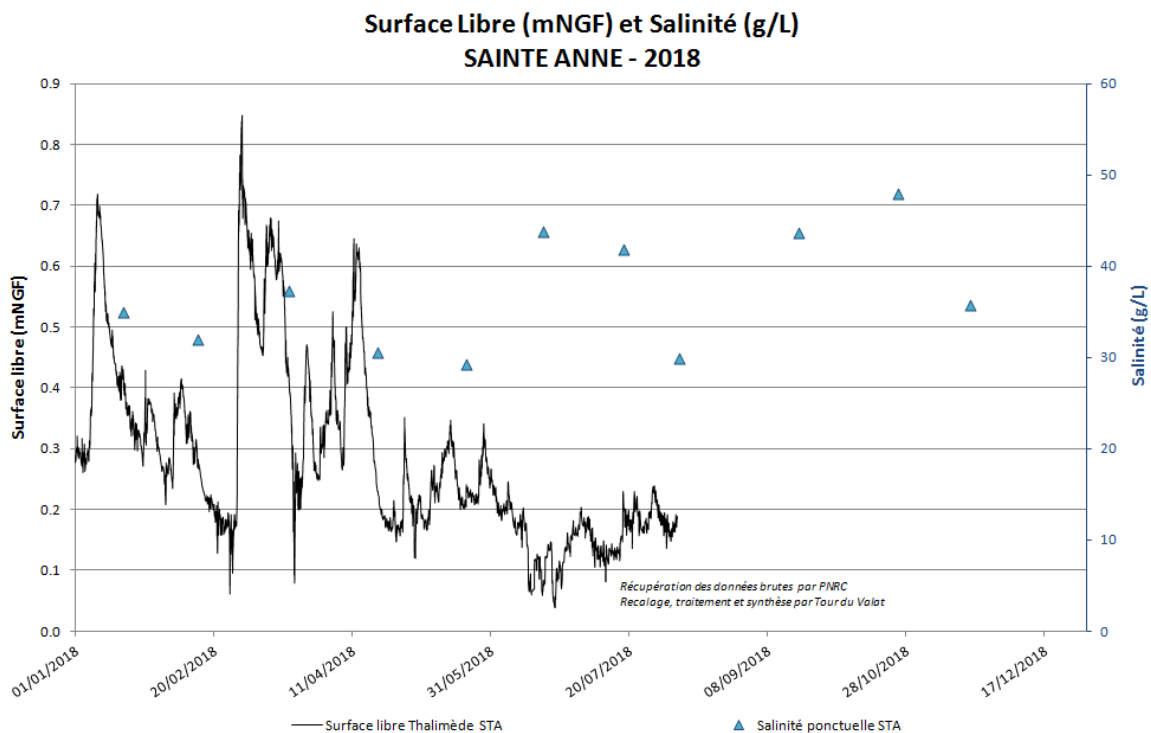


Figure 23 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Sainte Anne pour l'année 2018. La sonde de Sainte Anne a été désinstallée le 6 Août 2018, pour

permettre de remplacer celle défectueuse du Fangassier 1 Centre. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.*

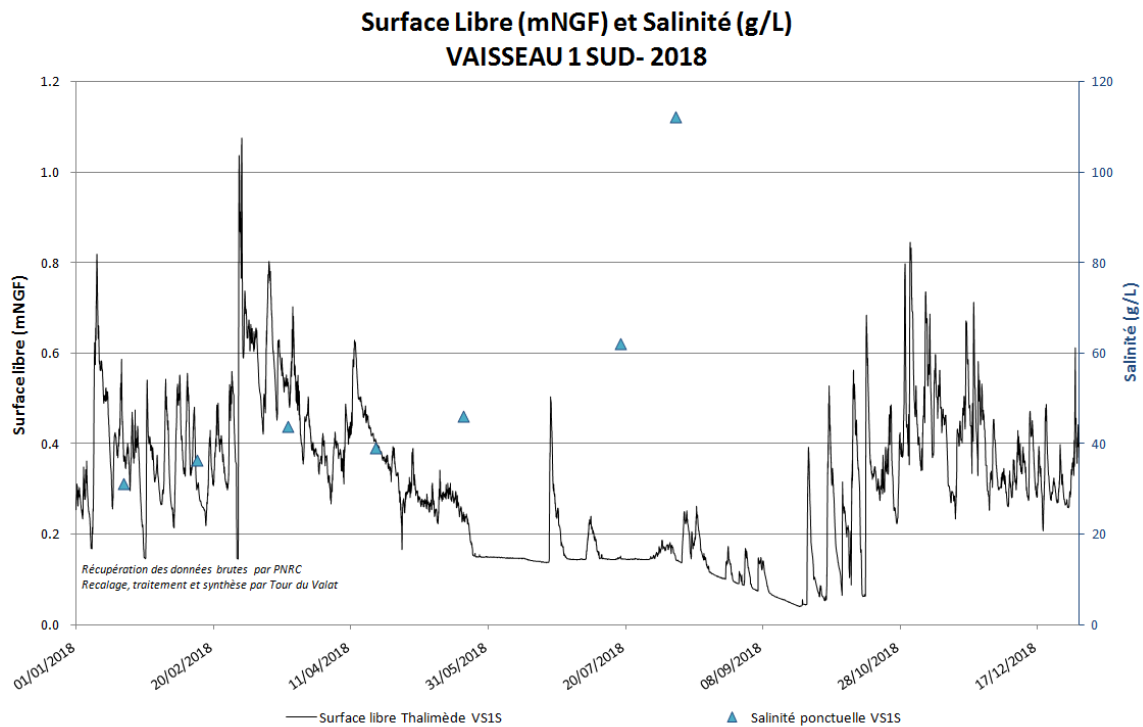


Figure 24 : Evolution des niveaux d'eau (niveau relatif de la surface libre) et de la salinité pour l'étang de Vaisseau 1 (Sud) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.*

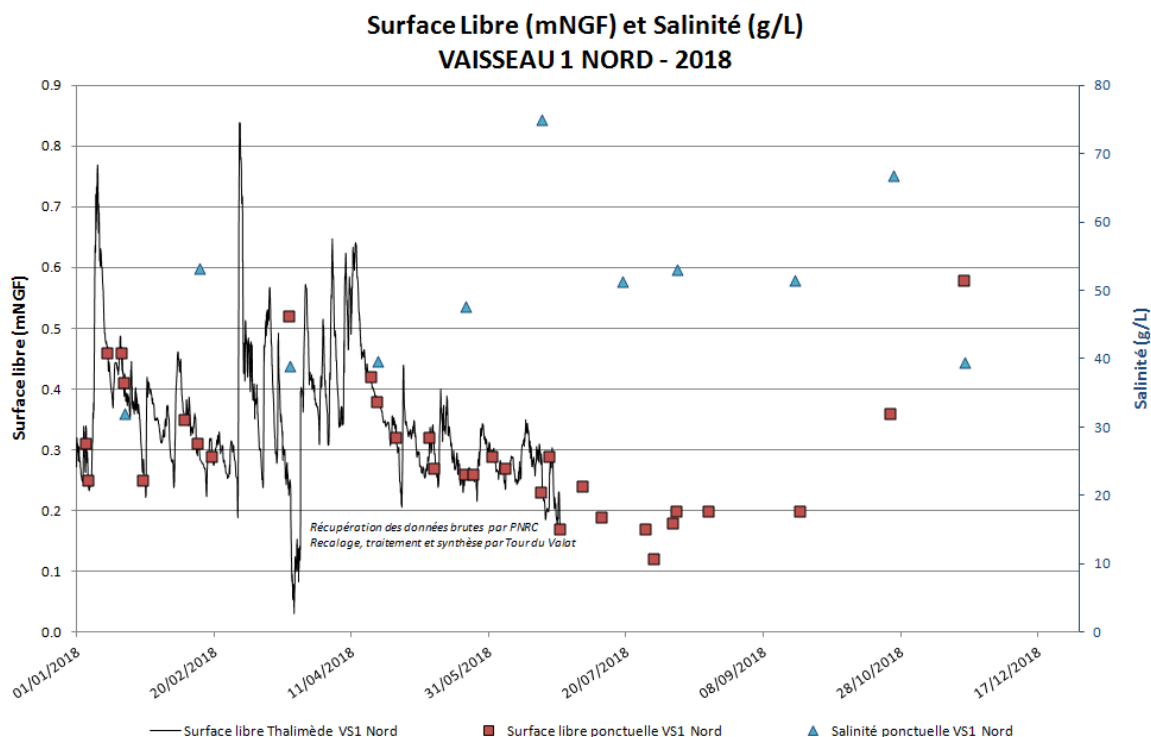


Figure 25 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Vaisseau 1 (Nord) pour l'année 2018. La sonde de Vaisseau 1 Nord a été désinstallée le 27 Juin 2018 afin de remplacer celle défectueuse de Beauduc. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.*

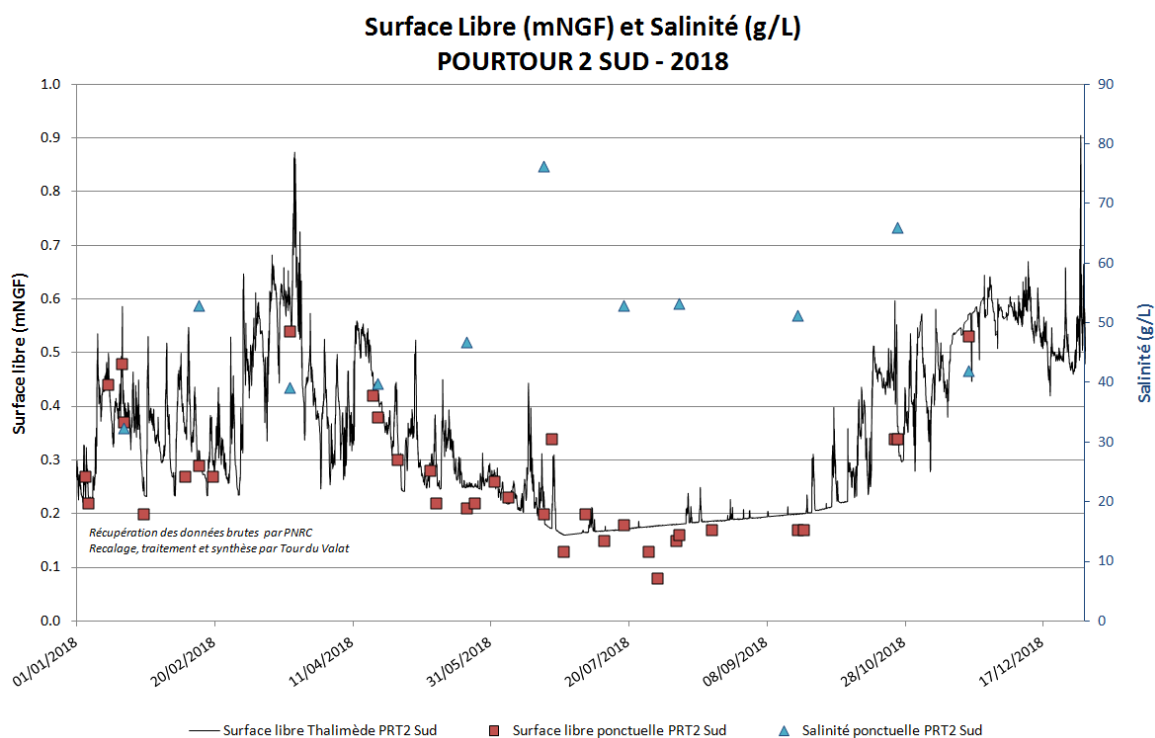


Figure 26 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Pourtour 2 (Sud) pour l'année 2018. *En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle*

limnimétrie. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Le plateau observé pendant la période estivale/automnale correspond à un dépôt du flotteur de la sonde de mesure sur le fond lors de l'assèchement de l'étang.

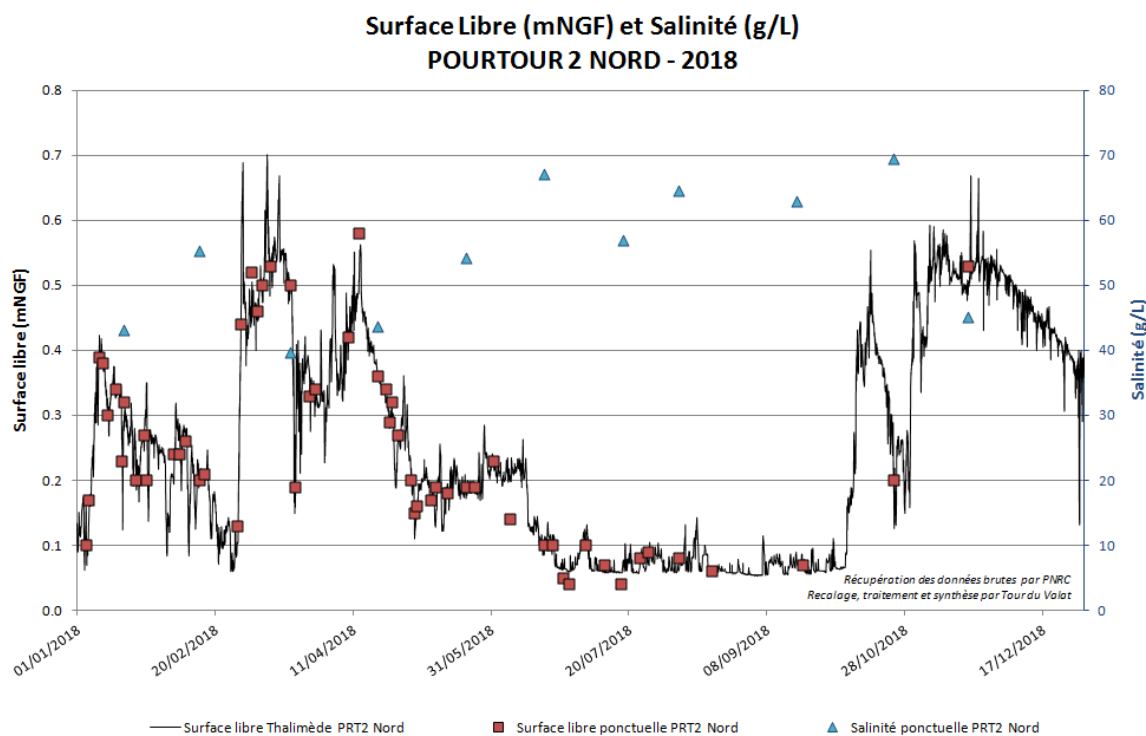


Figure 27 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Pourtour 2 (Nord) pour l'année 2018. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrie. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.

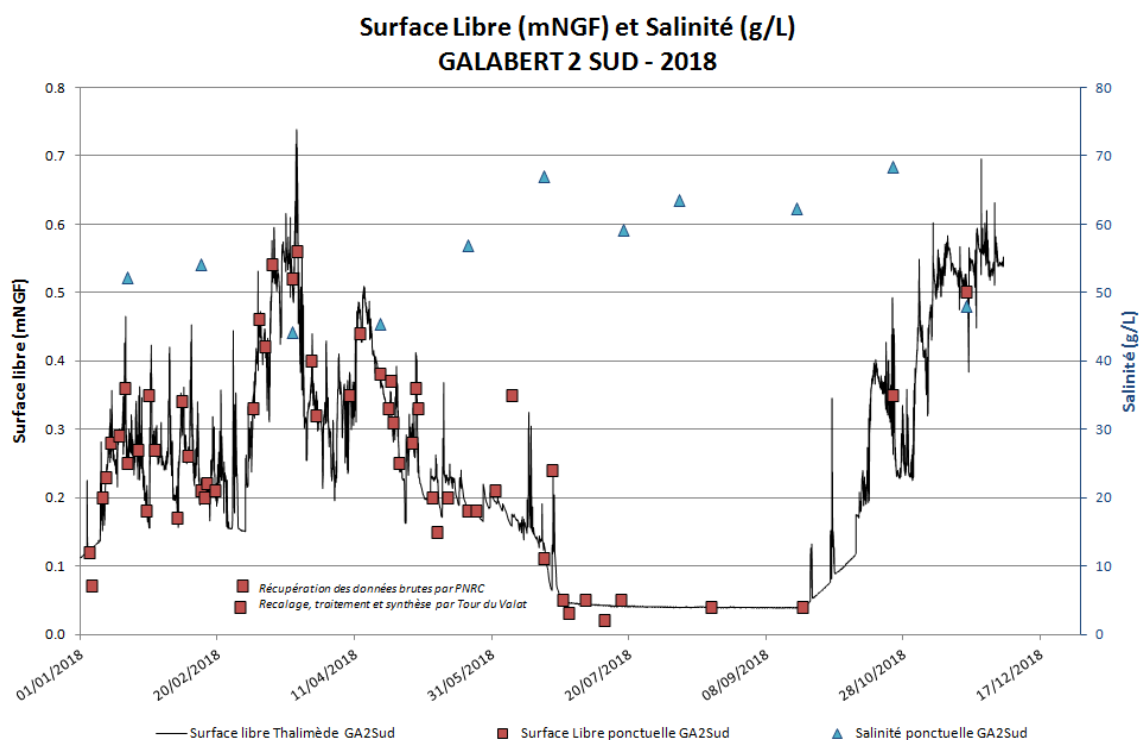


Figure 28 : Evolution des niveaux d'eau (surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Galabert 2 (Sud) pour l'année 2018. Données manquantes du 3 au 31 Décembre 2018 : un décalage important avec les observations ponctuelles a été constaté lors du premier relevé de 2019, ne permettant pas la correction des données instrumentales sur le mois de Décembre 2018. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ. Le plateau observé pendant la période estivale correspond à un dépôt sur le fond des flotteurs des sondes de mesure lors de l'assèchement de l'étang.

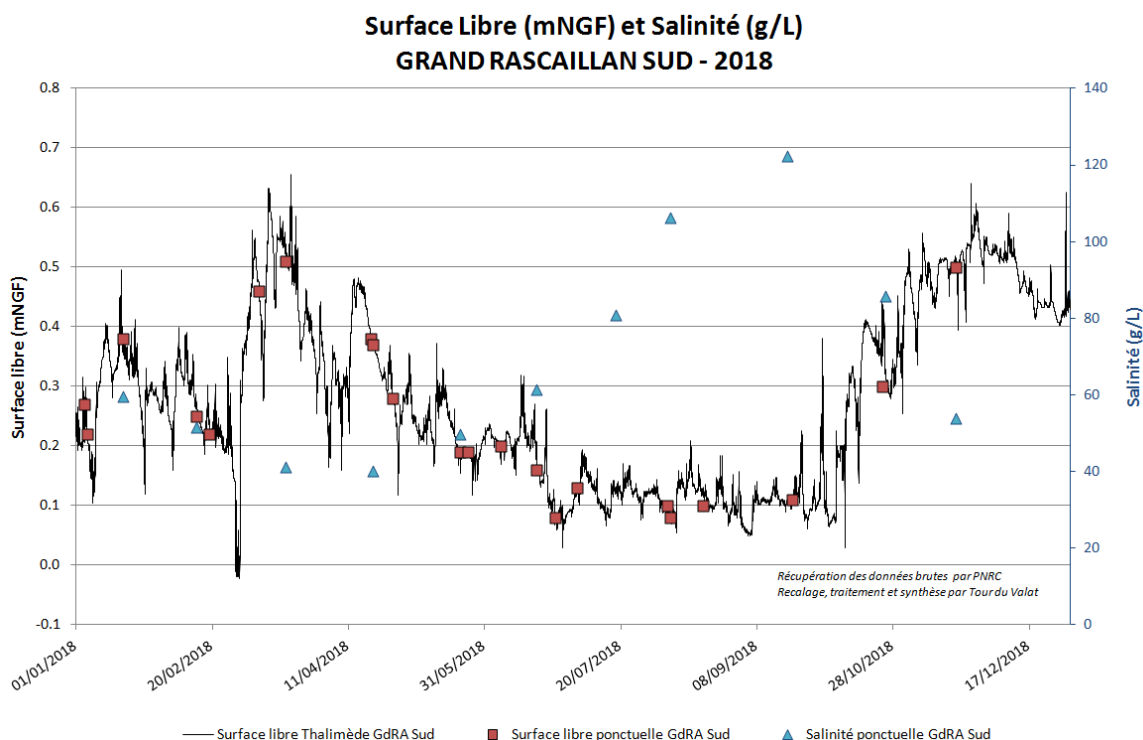


Figure 29 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Grand Rascaillan (Sud) pour l'année 2018. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.

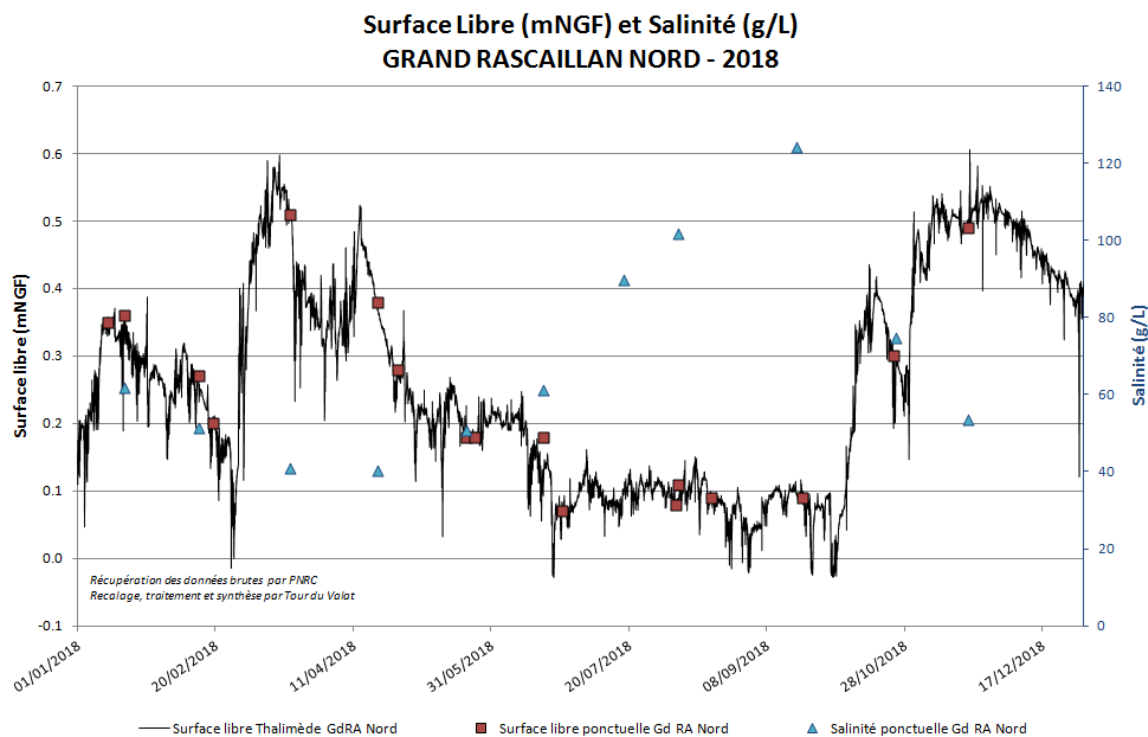


Figure 30 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour le Grand Rascaillan (Nord) pour l'année 2018. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.

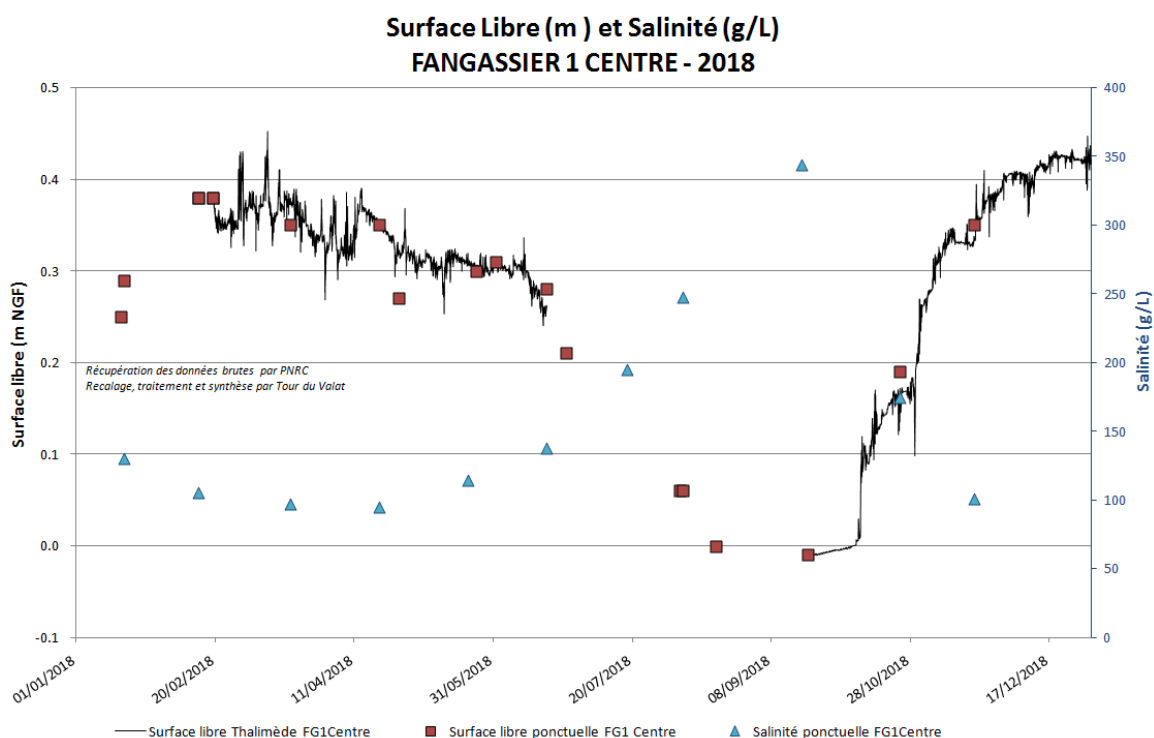


Figure 31 : Evolution des niveaux d'eau (niveau surface libre en mNGF) et de la salinité pour l'étang du Fangassier 1 (Centre) pour l'année 2018. Données manquantes du 1^{er} Janvier au 19 Février puis du 19 Juin au 21 Septembre 2018 : des décalages importants avec les observations ponctuelles ont été constatés, ne permettant pas la correction des données instrumentales sur ces périodes. En rouge sont indiquées les lectures faites sur l'échelle limnimétrique. En noir sont indiqués les niveaux d'eau enregistrés par la sonde. En bleu sont indiquées les lectures de salinité faites in situ.

4.1.4. Etablissement de lois hydrauliques calibrées pour les ouvrages du site

Plusieurs campagnes de jaugeages au courantomètre électromagnétique ont été réalisées sur différents ouvrages du site. Un exemple de traitement d'une de ces campagnes de jaugeage par la méthode d'exploration du champ de vitesse est indiqué sur la Figure 32.

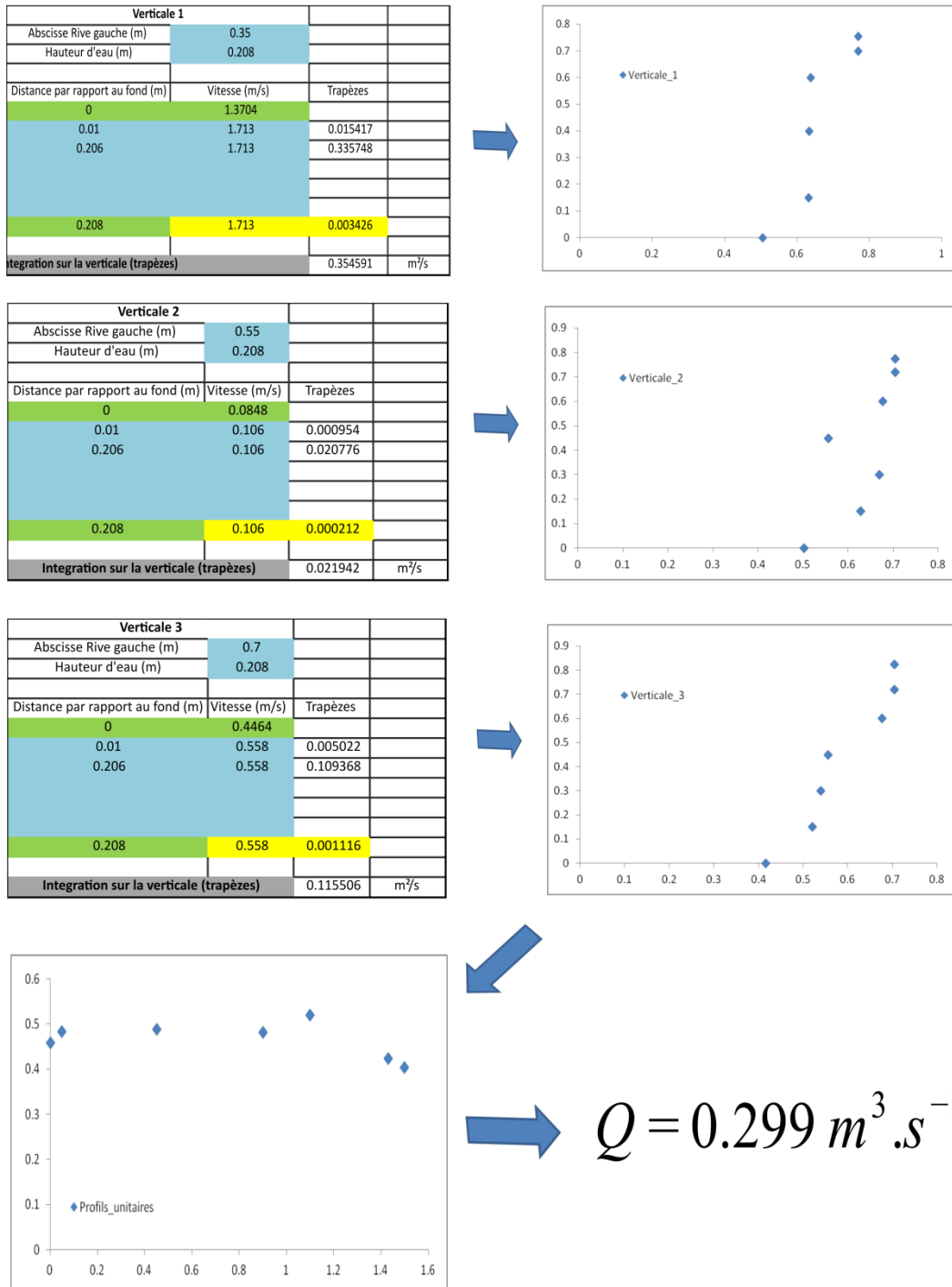


Figure 32 : illustration du traitement d'une campagne de jaugeage faite avec un courantomètre électromagnétique le 10/09/2018 sur un des ouvrages du site. Dans un souci de lisibilité seules 3 sections de mesures sont indiquées.

A partir de ces données de jaugeage, les coefficients de pertes de charges (i.e. de pertes d'énergie) utilisés dans la modélisation ont pu être déterminés pour les différents ouvrages par utilisation de méthodes numériques d'optimisation (méthode **minimize** de la librairie **scipy**, langage python).

4.2. RESULTATS DE MODELISATION

4.2.1. Calage et validation du modèle

Il n'a pas été possible de caler et valider par les méthodes classiques le modèle hydro-salin sur une période continue d'une année, de par :

1/ une dynamique géomorphologique très rapide dans les étangs du sud des EMSC, modifiant la bathymétrie de ces zones et les écoulements associés (modification notamment des échanges avec la mer). Les données bathymétriques à notre disposition pour cette étude proviennent d'une campagne LIDAR bathymétrique réalisée en septembre 2016. Etant donné la taille du site, il n'a pas été possible de réaliser des campagnes de terrain pour mettre à jour cette bathymétrie sur l'ensemble du site, après chaque surcote marine notamment.

2/ des ruptures de digues successives apparues entre différents étangs des EMSC (modification des écoulements). Les brèches apparues dans les digues ont dans la mesure du possible été intégrées dans le modèle pour les périodes correspondantes, mais avec une incertitude sur i) la date précise d'apparition de ces brèches sur le site, et ii) leurs dimensions (largeur, profondeur) qui évoluent rapidement, notamment à chaque épisode de surcote marine.

3/ une fuite d'eau conséquente apparue dans l'ouvrage hydraulique au Nord Est de l'étang des Enfores de la Vignolle (étang n°7 sur la Figure 4) qui a généré des entrées d'eau non mesurées d'un canal de drainage (le « Versadou ») dans le site. Les dates d'occurrence de cette fuite sont connues de manière approximative.

4/ le fait que l'ouvrage situé entre l'étang de Galabert 2 et du Fangassier soit particulier, avec la présence de clapets mobiles rendant les lois classiques de calcul de débits au sein des ouvrages non applicables sur ce cas particulier. Pour le moment, le modèle global "hydrosystème-Vaccarès-EMSC" permet de simuler une ouverture ou une fermeture complète de cet ouvrage (cas les plus courants car les clapets sont rarement utilisés).

Pour répondre aux 4 difficultés mentionnées ci-dessus, la stratégie adoptée a donc été de faire des calibrations et validations du modèle par sous-ensembles d'étangs, et sur des périodes pour lesquelles les incertitudes liées aux points 1 à 4 précédemment cités étaient minimales.

Le modèle calé et validé sur ces différentes périodes a ensuite été utilisé pour :

1/ mettre en œuvre des simulations mensuelles sur l'ensemble de la période d'étude (16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h), afin de notamment cartographier les hauteurs d'eau et salinités moyennes. Pour chacune de ces simulations mensuelles, la bathymétrie a été adaptée avec les connaissances disponibles, et les hauteurs d'eau et salinités initiales déterminées à partir de relevés terrain.

2/ mettre en œuvre une simulation d'une année complète pour étudier les temps de résidence dans les différents étangs. Pour cette simulation d'une année, les manipulations de certains ouvrages hydrauliques des EMSC n'étaient pas connues sur la période du 29/09/2018 au 16/11/2018, nous avons donc réalisé les simulations en faisant des hypothèses sur les manipulations possiblement faites sur ces ouvrages sur ces deux mois.

Pour la 4ème difficulté qui concerne l'ouvrage à clapets reliant le Galabert 2 à l'étang du Fangassier, grâce à un financement du GIS HEDD (<https://www.gis-hed2.fr/>) une collaboration a été mise en place avec Artelia et Irstea Montpellier pour établir une loi hydraulique précise de cet ouvrage. Dans ce

cadre, des instruments de mesure ont été installés sur cet ouvrage (sondes de mesure de vitesse, de pression, de rotation des clapets), et une première approche de modélisation spécifique sous Openfoam (<https://www.openfoam.com/>) a été développée (Burr, 2019). Une illustration de ce modèle est donnée sur la Figure 33.

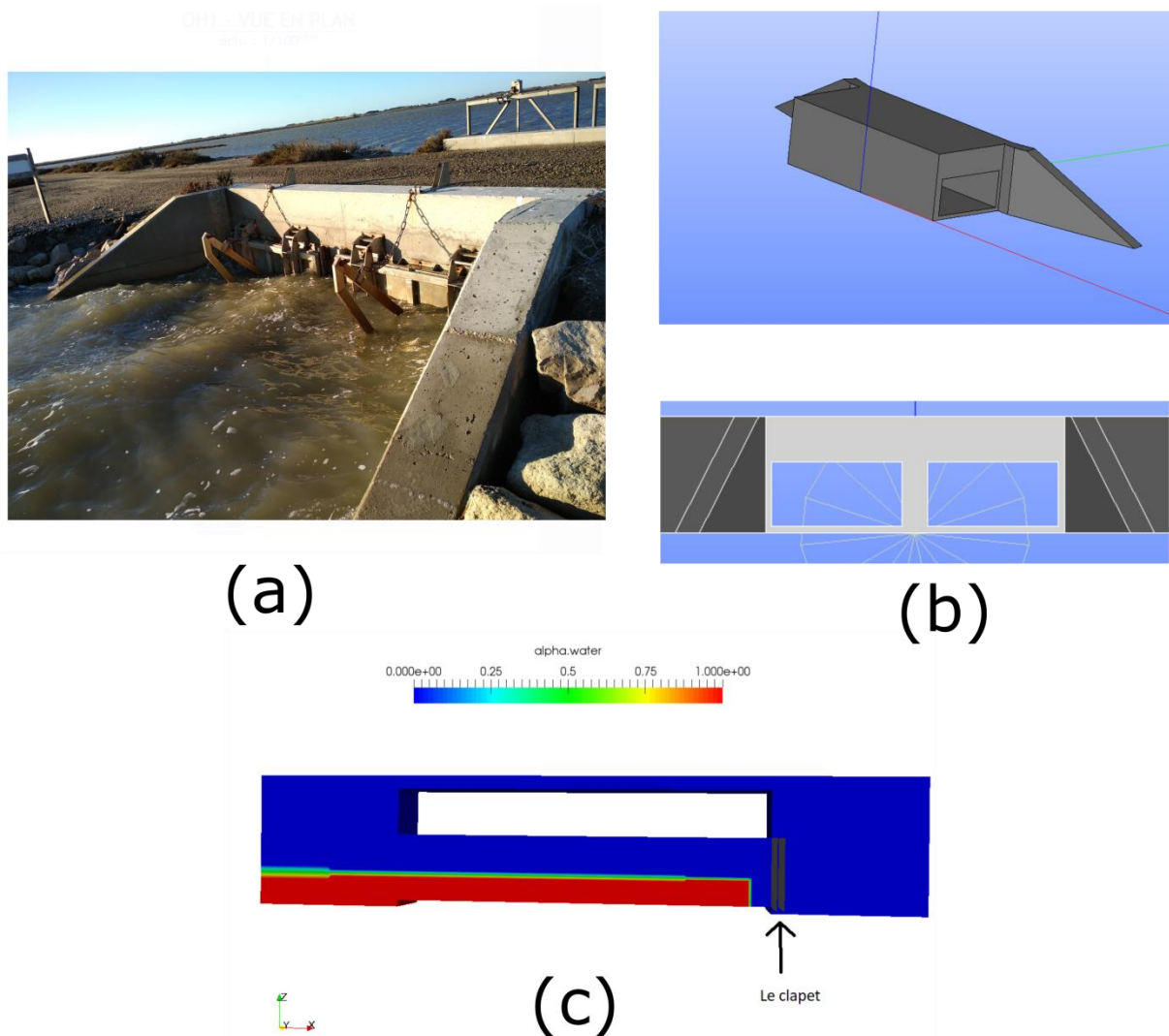


Figure 33 : Illustration du modèle en cours de développement sous Openfoam de l'ouvrage situé entre l'étang du Fangassier et celui du Galabert 2. (a) Photographie de l'ouvrage ; (b) et (c) vues du modèle.

Cette collaboration est toujours en cours et devrait permettre d'obtenir des lois hydrauliques précises du fonctionnement de cet ouvrage lorsque les clapets sont fonctionnels.

4.2.2. Initialisation du modèle

Les Figure 34 et Figure 35 donnent un exemple d'initialisation du modèle, en termes de hauteurs d'eau et de salinités. Ces valeurs initiales (dans le cas présent celles du 16/11/2017 à 12h) ont à chaque fois été déduites par interpolation spatiale des valeurs mesurées par les sondes présentes sur le site (voir notamment Figure 6 et Figure 7).

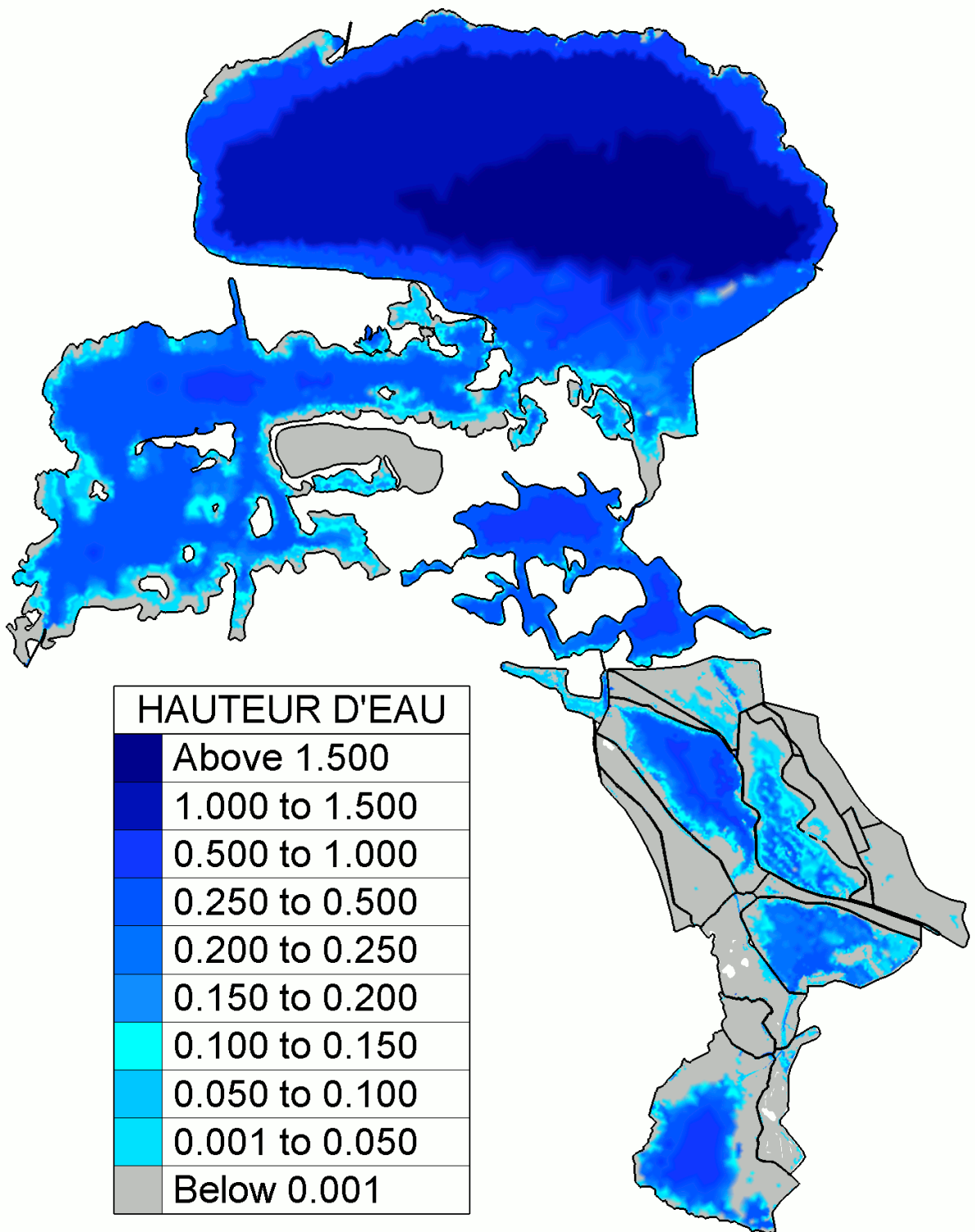


Figure 34 : Hauteur d'eau initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h.

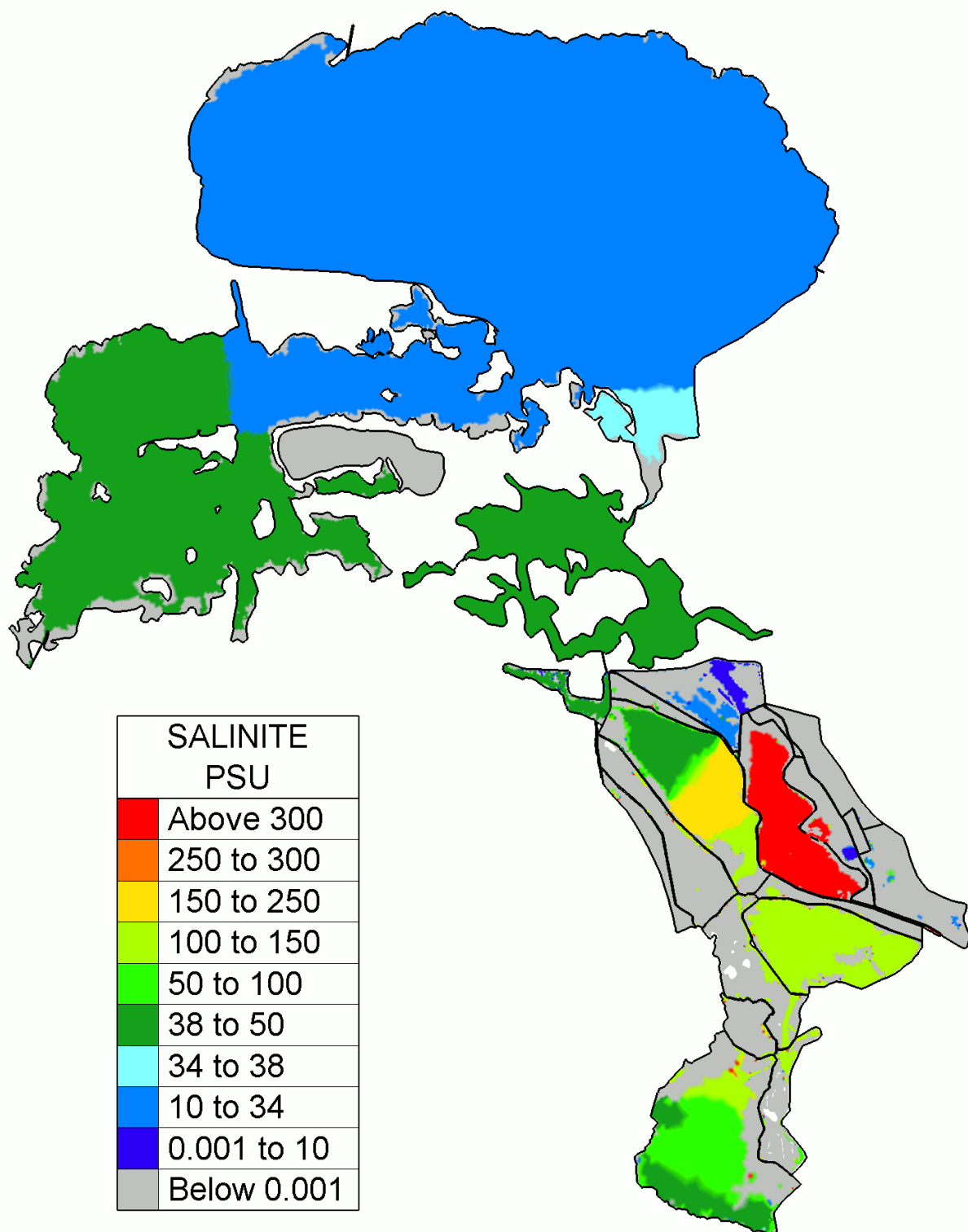


Figure 35 : Salinité initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h. Les zones en gris correspondent à des zones sans eau.

Dans le cas de la simulation des temps de résidence, le modèle est initialisé avec les hauteurs d'eau de la Figure 34, est la concentration initiale du traceur étudiée est égale à 1 g/L dans l'ensemble du système, comme illustré sur la Figure 36.

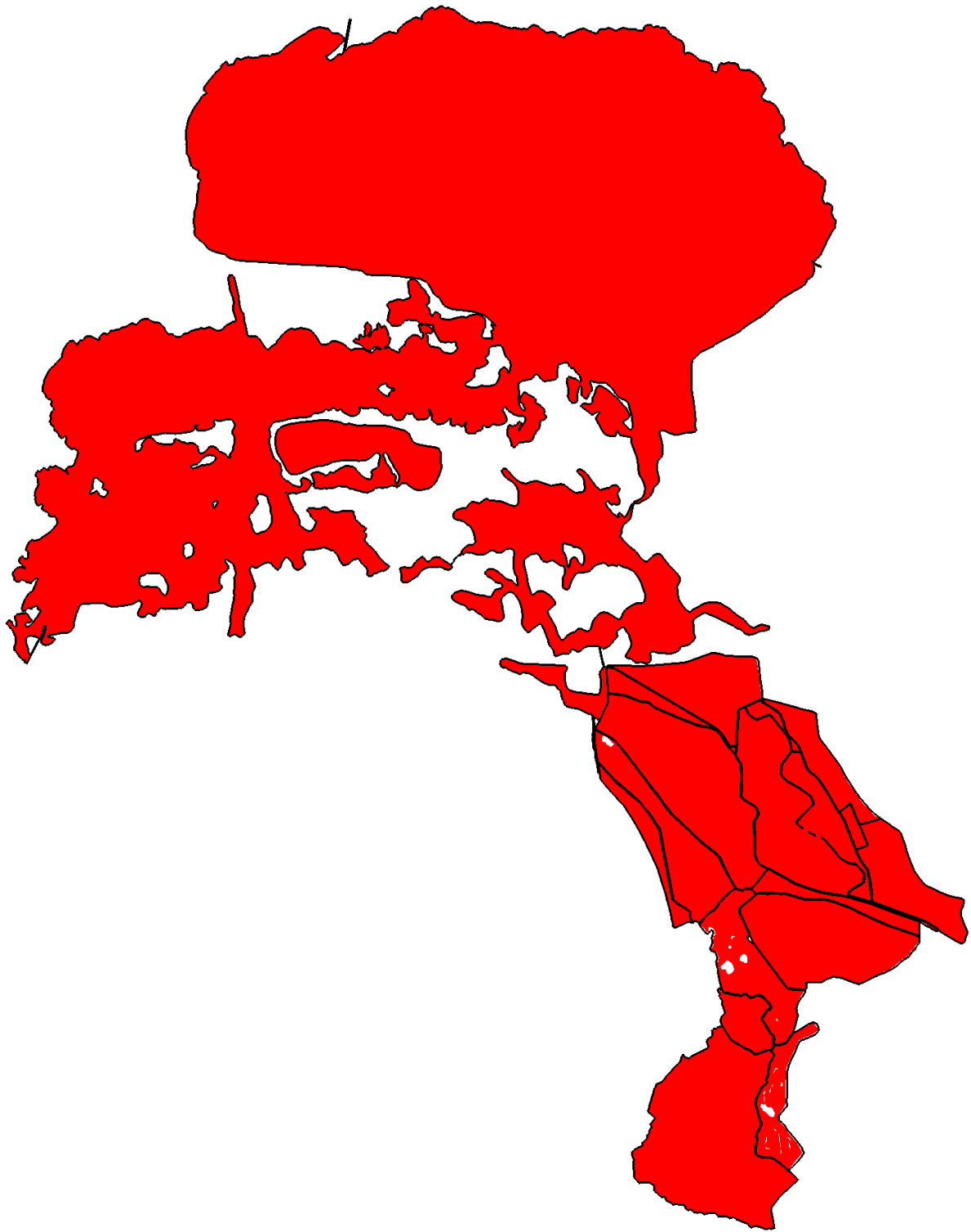


Figure 36 : Concentration initiale dans les étangs en début de simulation le 16/11/2017 à 12h pour la simulation des temps de résidence. La concentration est uniforme dans tous les étangs, et égale à 1 g/L.

4.2.3. Résultats des simulations hydro-salines

Un des objectifs du présent projet était d'établir pour la période d'étude des cartographies pour chaque étang des hauteurs d'eau moyennes, ainsi que des salinités minimales, moyennes et maximales. Par soucis de visibilité, il a été décidé de travailler pour ces grandeurs moyennes, minimales et maximales, à une échelle de temps mensuelle plutôt qu'annuelle.

4.2.3.1. Hauteurs d'eau mensuelles moyennes

Les Figure 37, Figure 38 et Figure 39 montrent les hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées sur la période du 16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h. Ces hauteurs d'eau ont été estimées pour chacun des 70000 nœuds du modèle à partir des hauteurs d'eau horaires simulées en chacun de ces nœuds sur l'ensemble de la période.

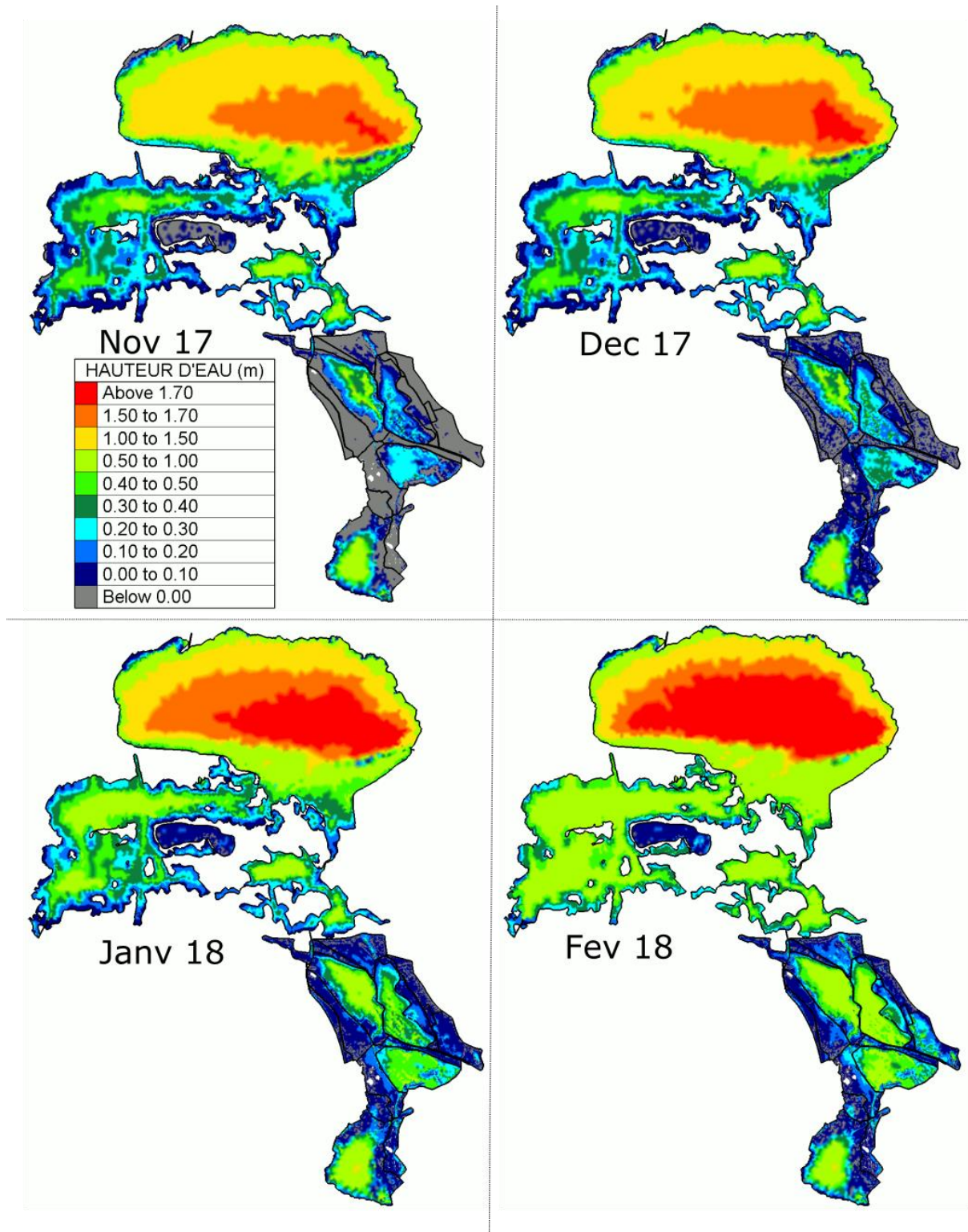


Figure 37 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.

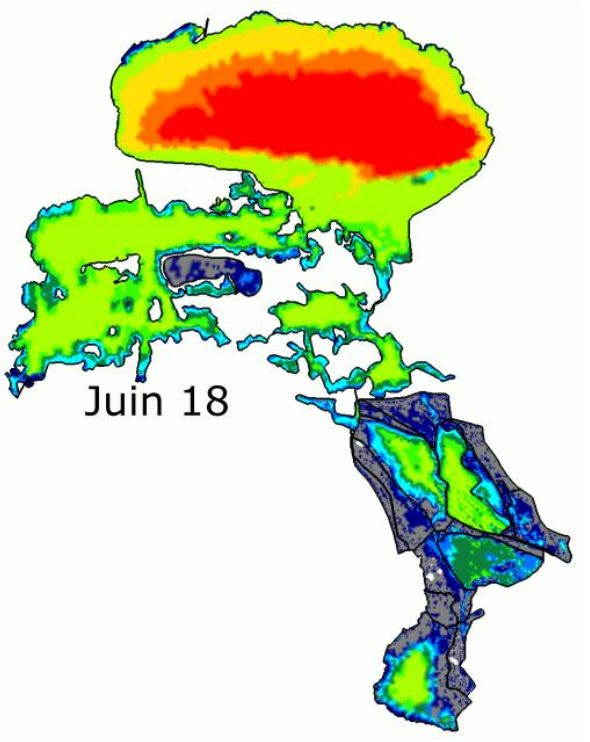
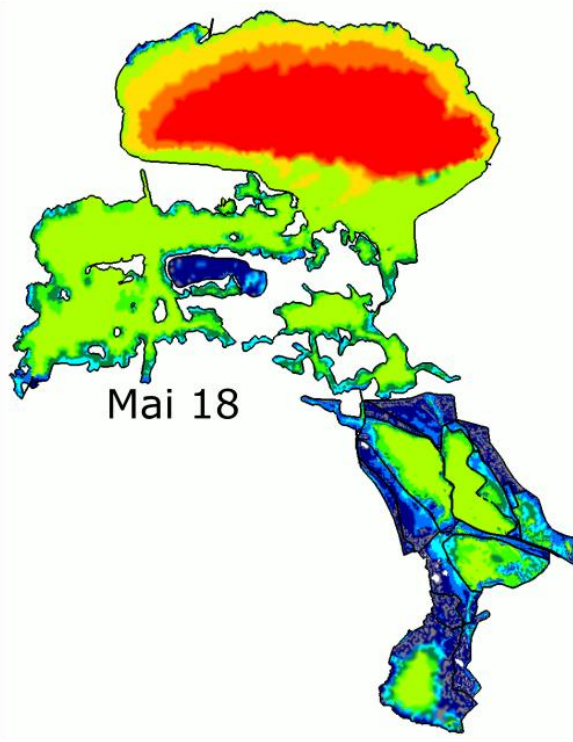
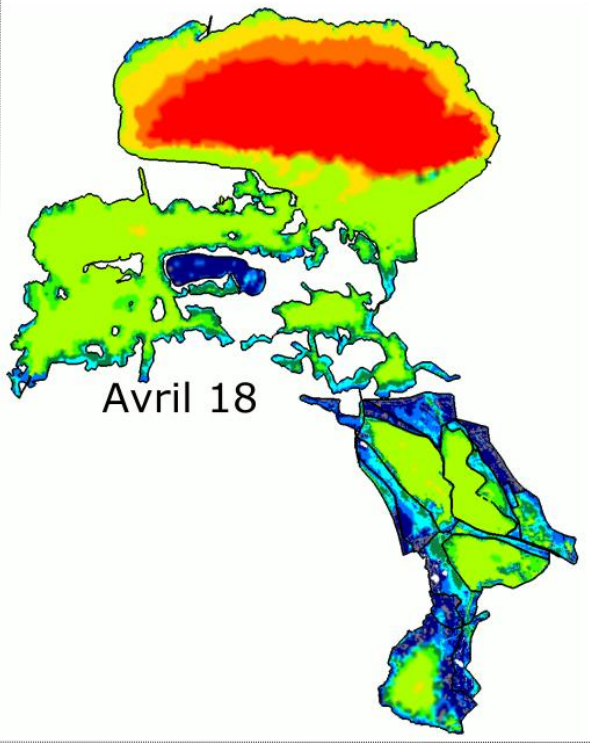
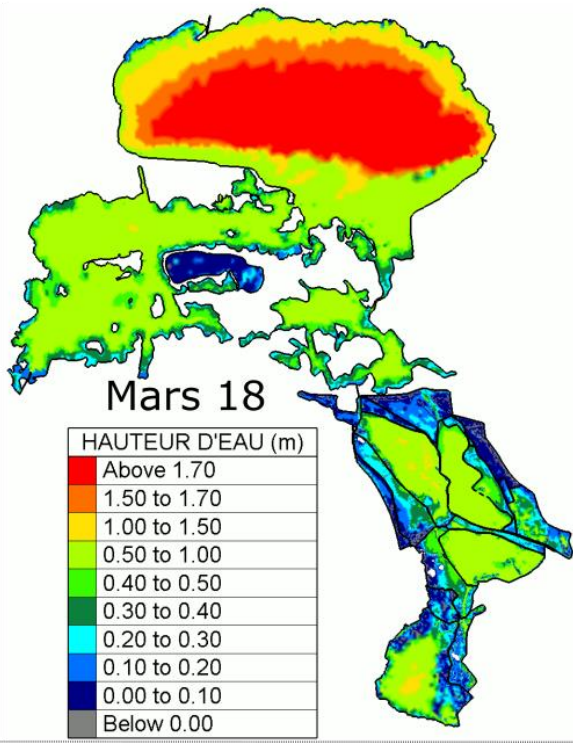


Figure 38 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.

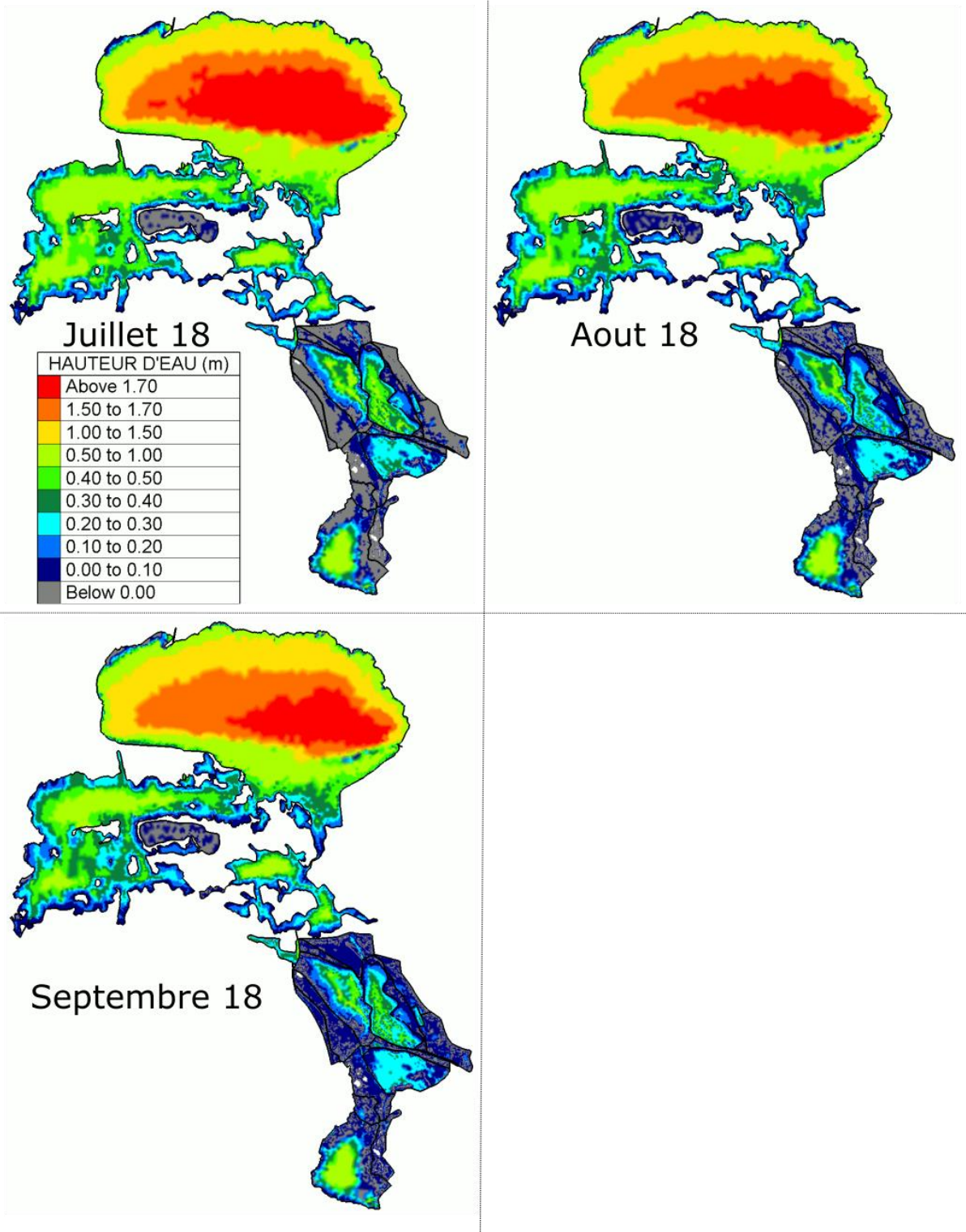


Figure 39 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.

4.2.3.2. Salinités mensuelles moyennes

Les Figure 40, Figure 41 et Figure 42 montrent les salinités moyennes simulées sur la période du 16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h. Ces salinités ont été estimées pour chacun des 70000 nœuds du modèle à partir des salinités horaires simulées sur ces nœuds.

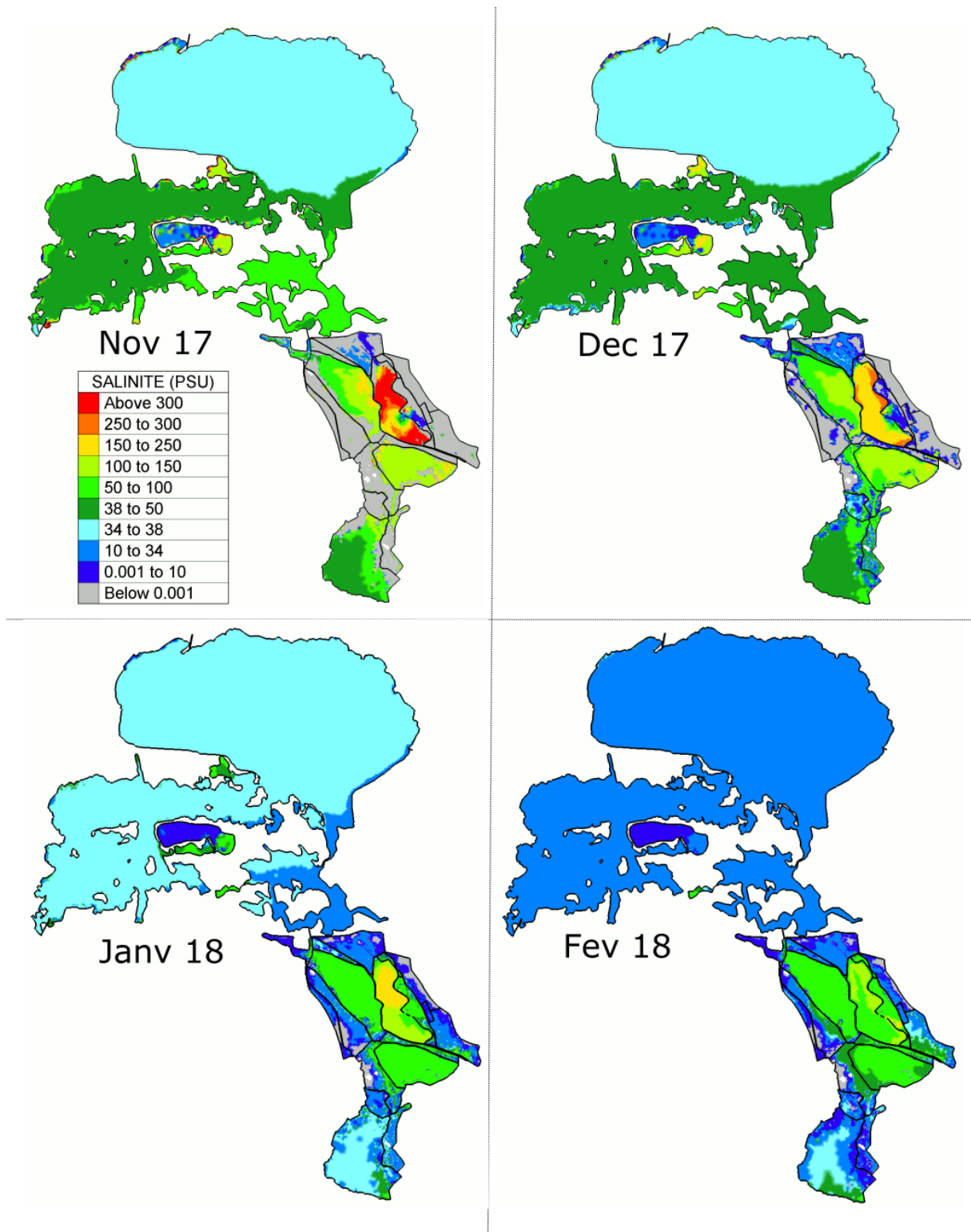


Figure 40 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.

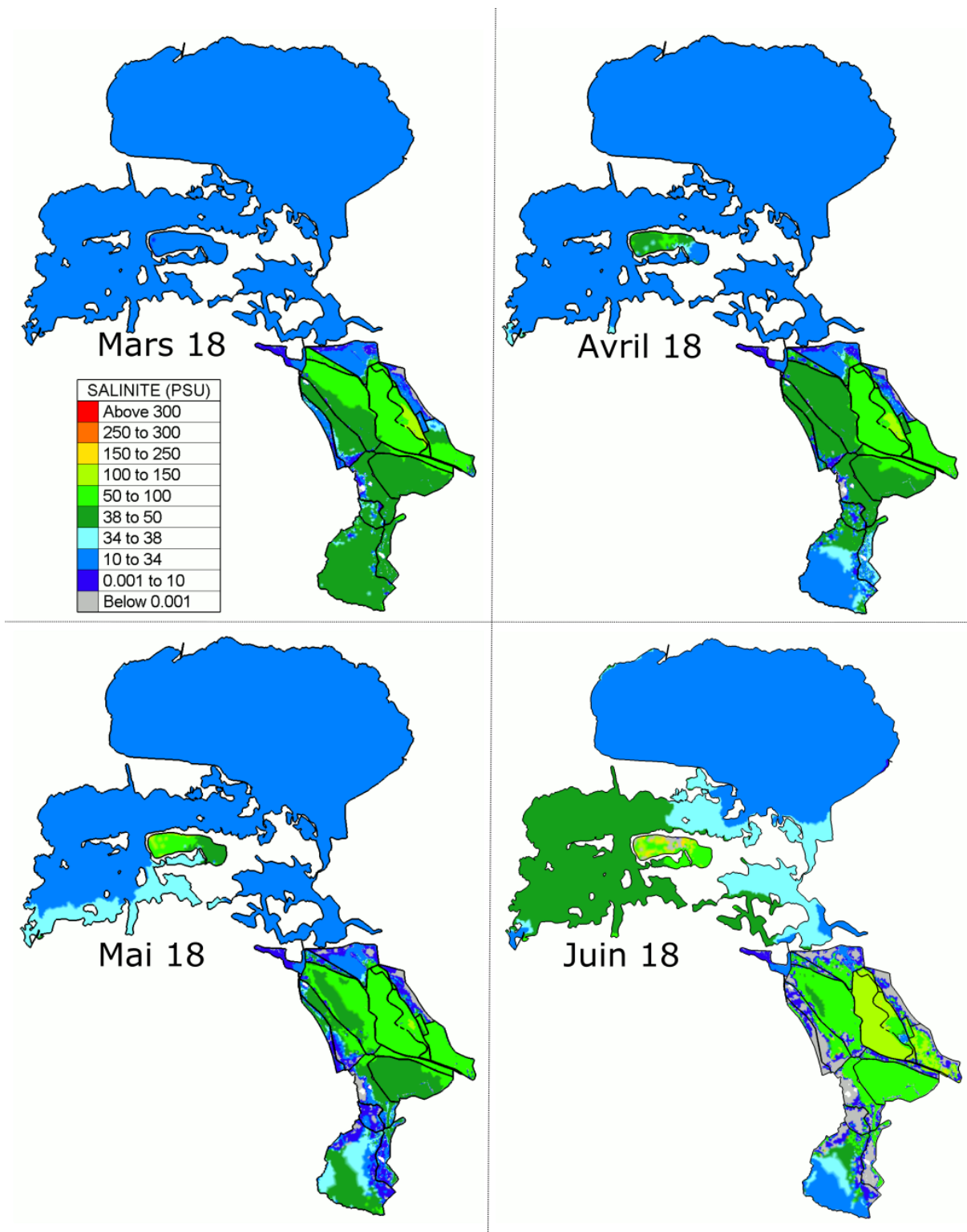


Figure 41 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.

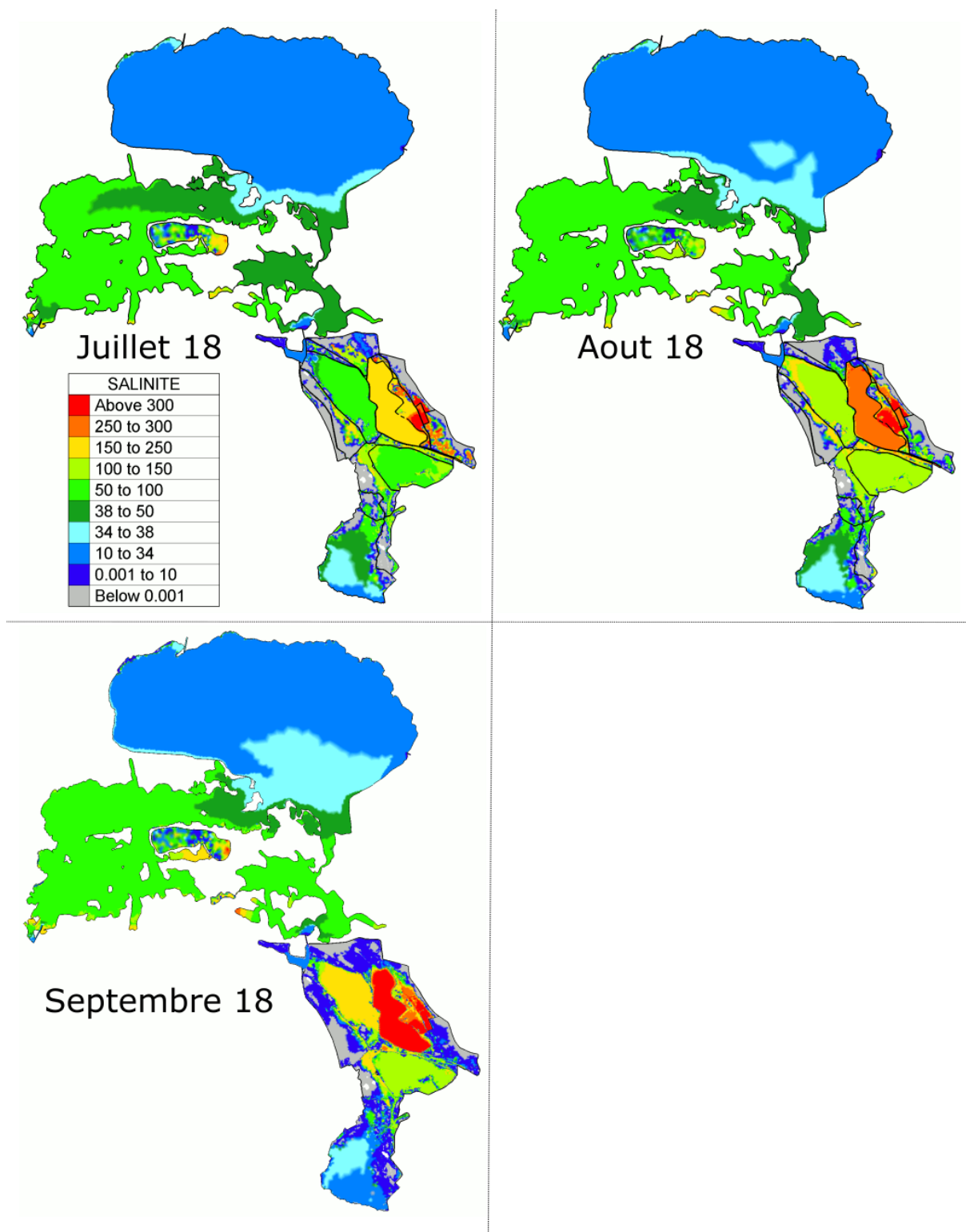


Figure 42 : Salinités moyennes mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.

4.2.3.3. Salinités mensuelles maximales

Les Figure 43, Figure 44 et Figure 45 montrent les salinités maximales simulées sur la période du 16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h. Ces salinités ont été estimées pour chacun des 70000 nœuds du modèle à partir des salinités horaires simulées sur ces nœuds.

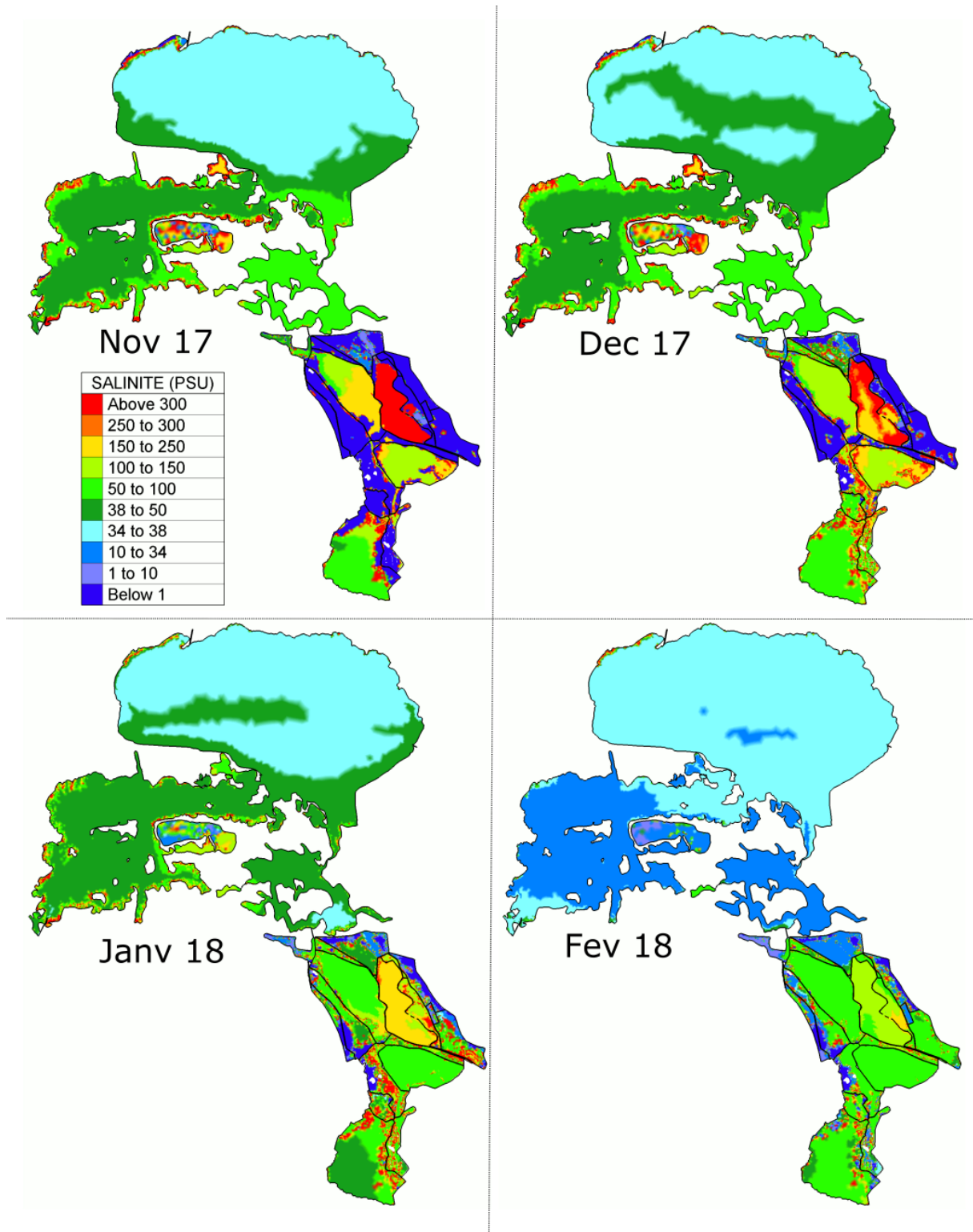


Figure 43 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.

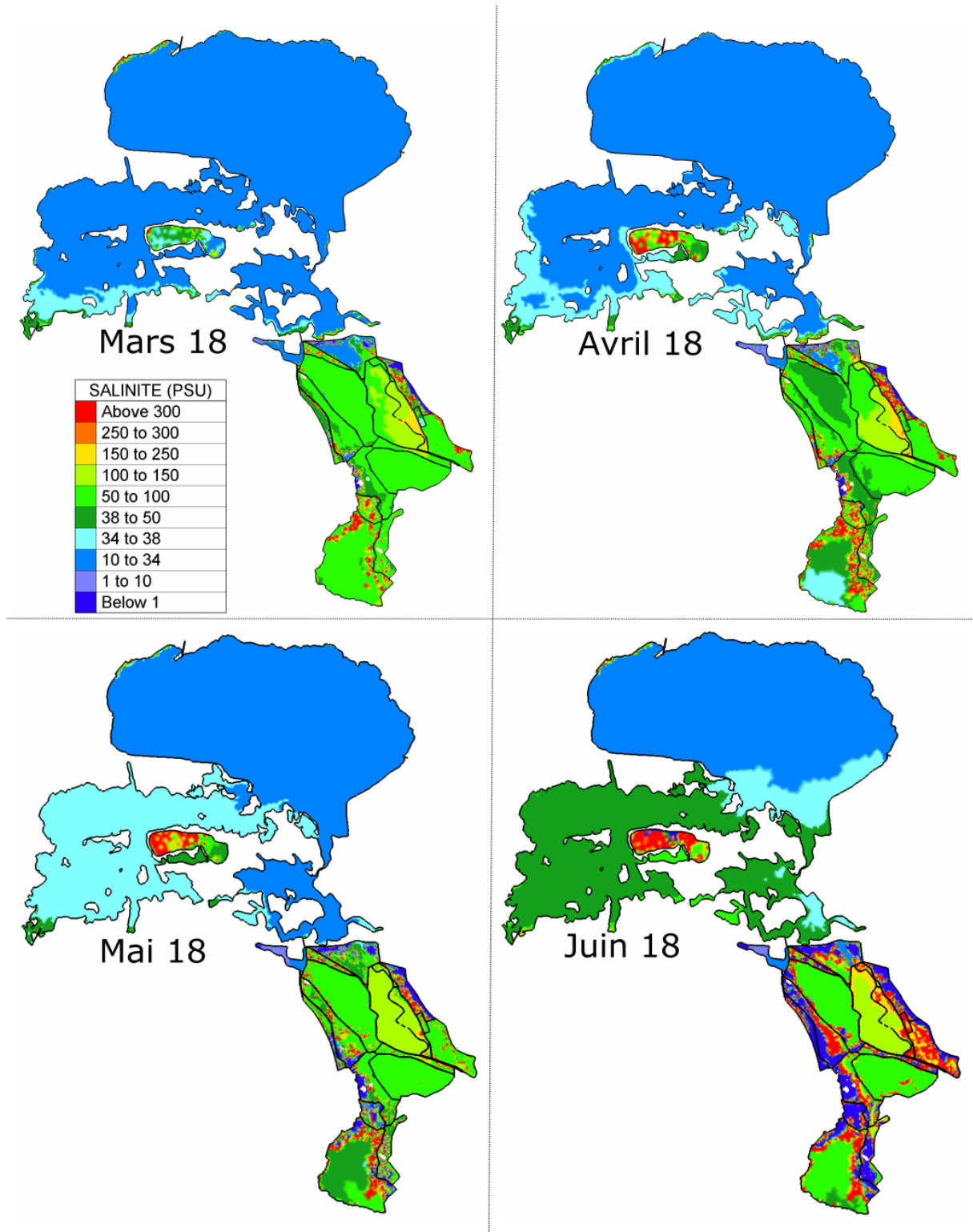


Figure 44 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.

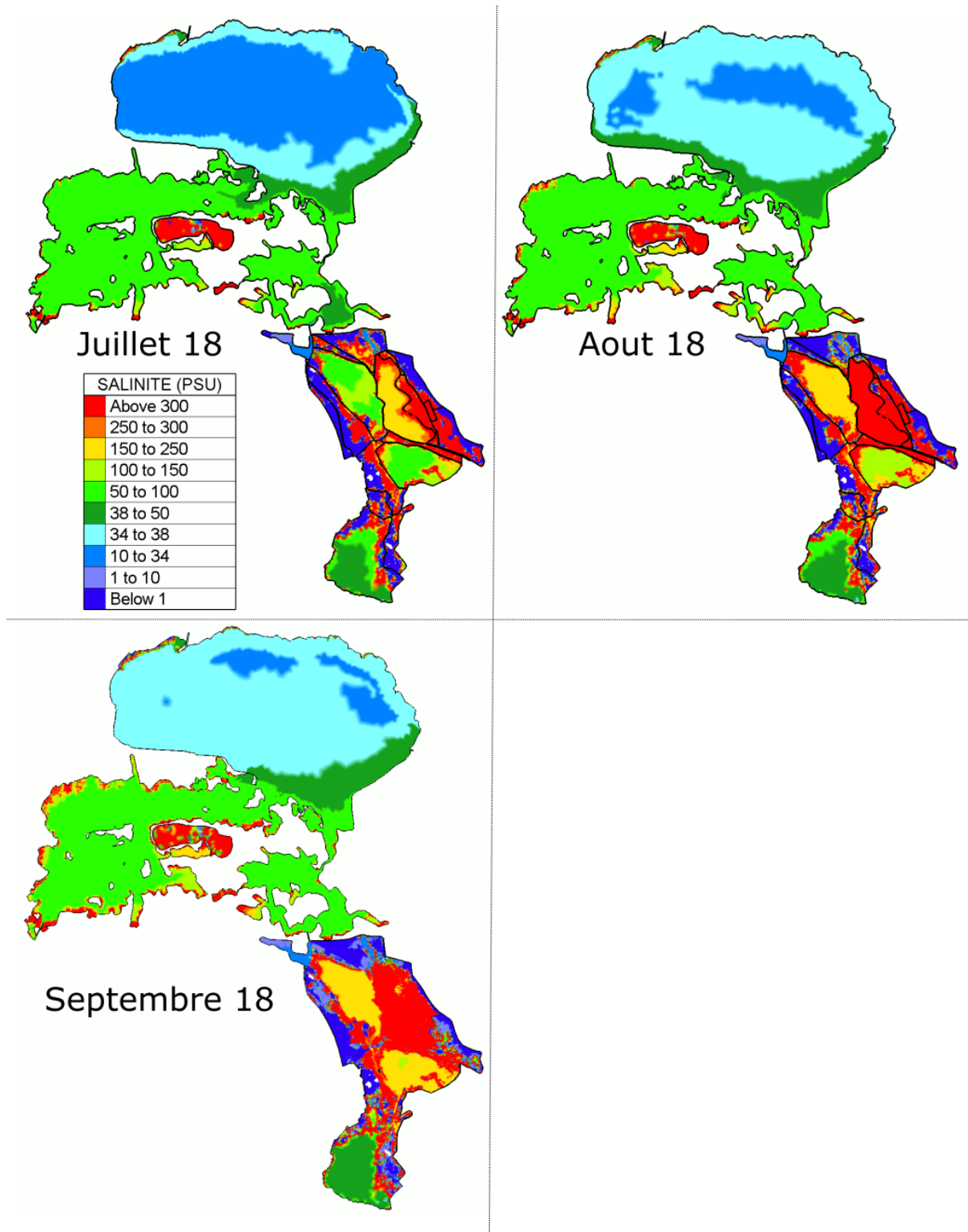


Figure 45 : Salinités maximales mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.

4.2.3.4. Salinités mensuelles minimales

Les Figure 46, Figure 47 et Figure 48 montrent les salinités minimales simulées sur la période du 16/11/2017 12h au 29/09/2018 20h. Ces salinités ont été estimées pour chacun des 70000 nœuds du modèle à partir des salinités horaires simulées sur ces nœuds.

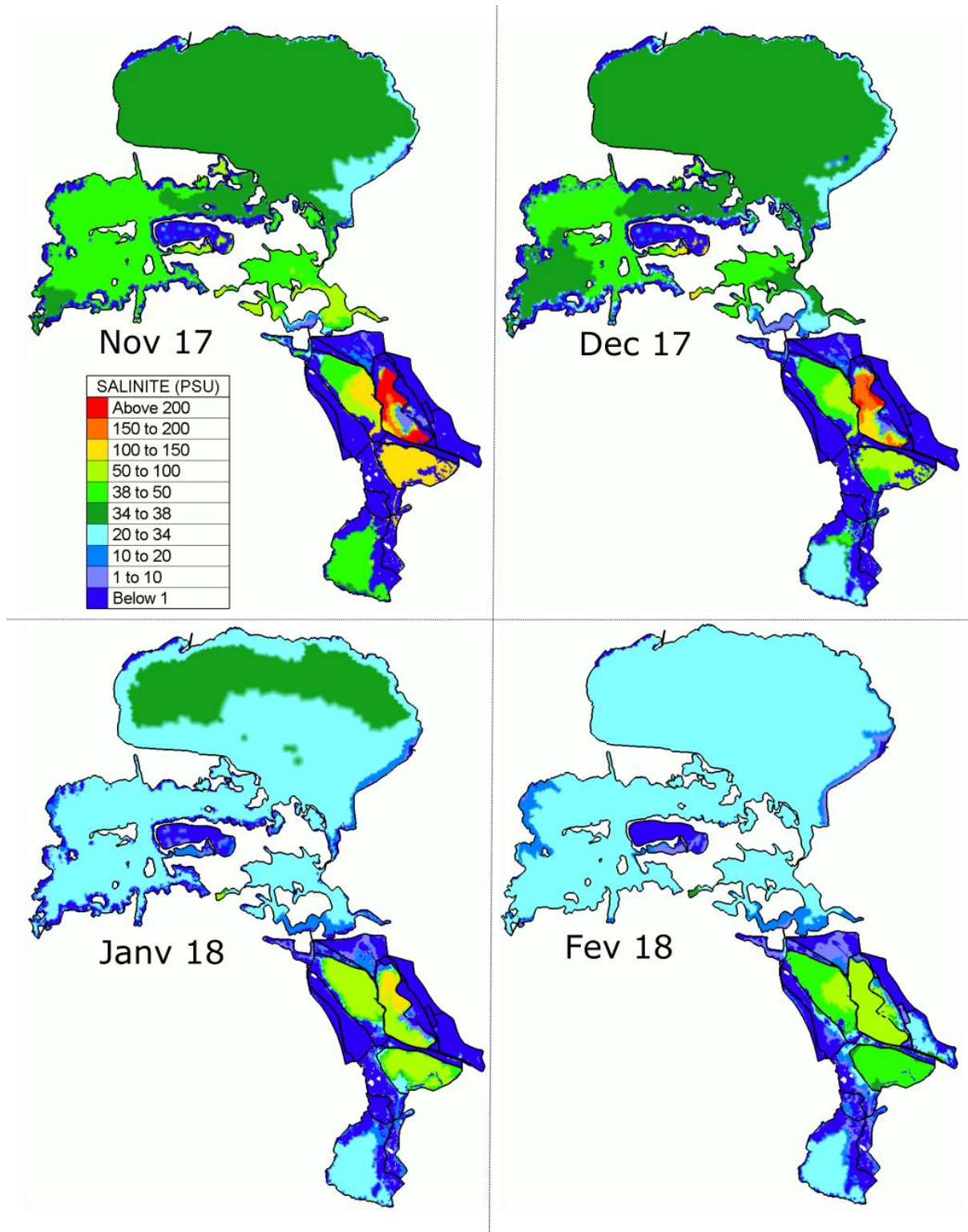


Figure 46 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Novembre, Décembre 2017, et Janvier, Février 2018.

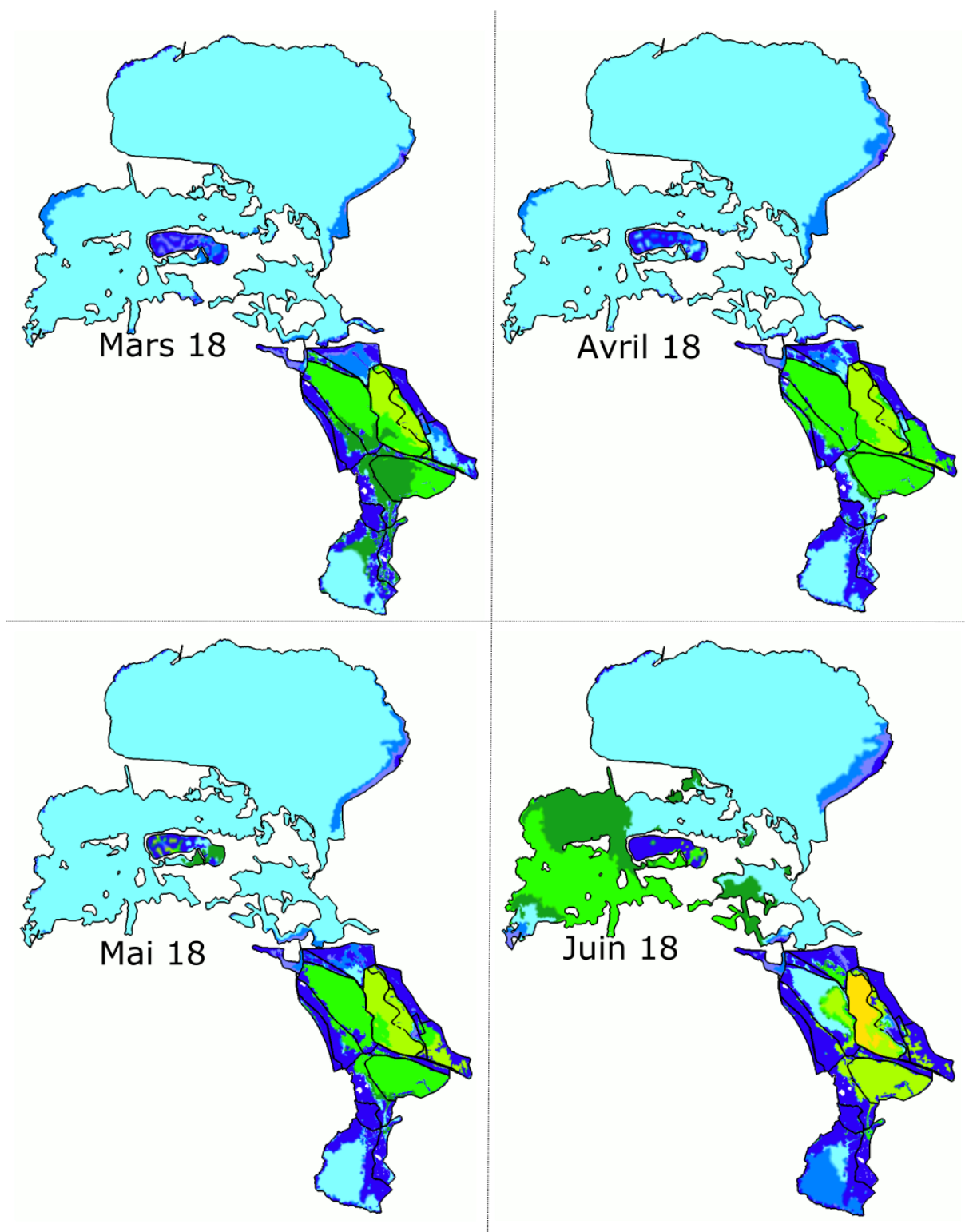


Figure 47 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Mars, Avril, Mai et Juin 2018.

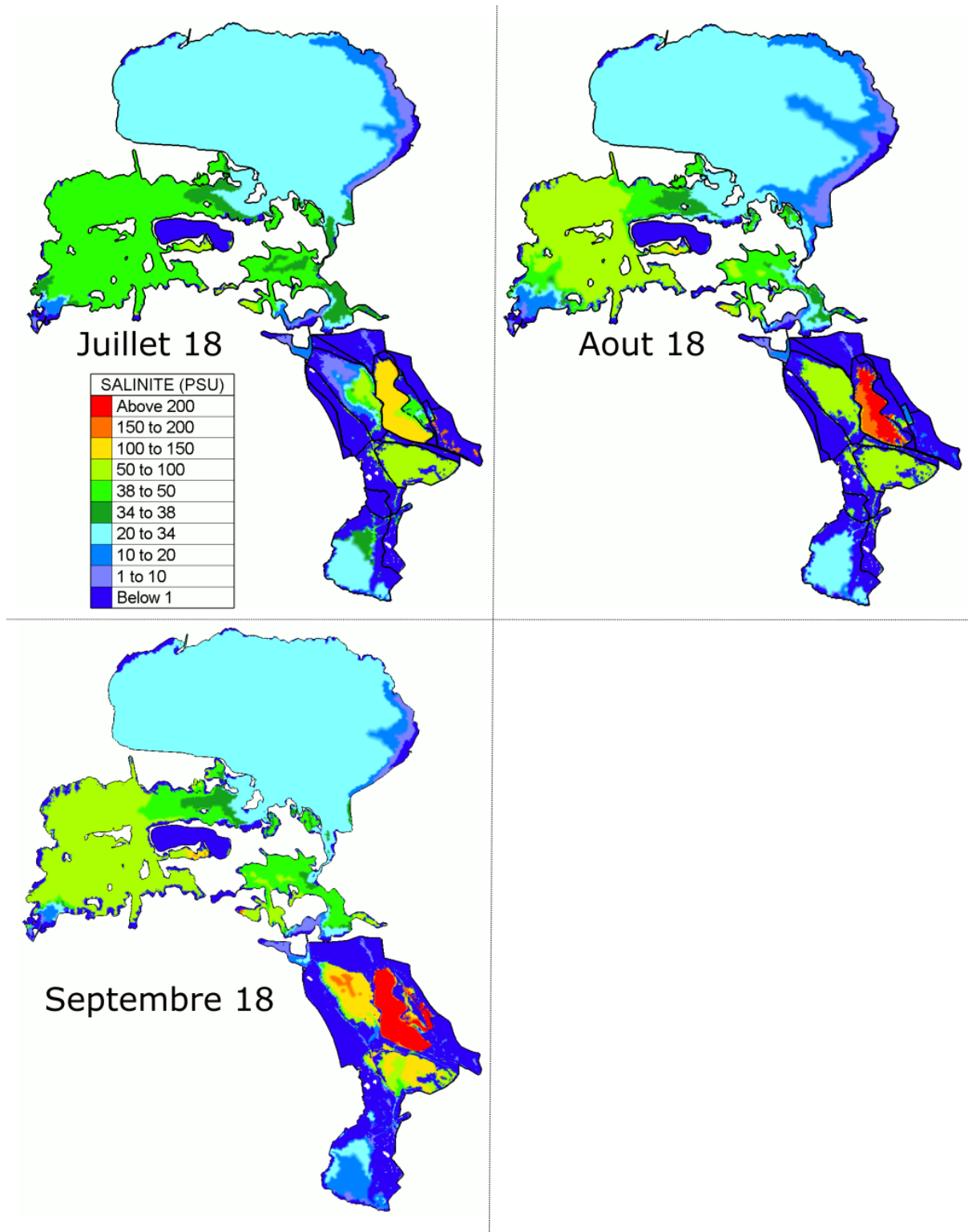


Figure 48 : Salinités minimales mensuelles simulées pour les mois de Juillet, Août et Septembre 2018.

4.2.4. Temps de résidence

Comme indiqué dans la partie 2.2 de ce rapport, la méthode pour déterminer les temps de résidence dans un système lagunaire est de mettre en œuvre des simulations hydrodynamiques du devenir d'un traceur inerte (i.e. non soumis à des transformations chimiques et biologiques) réparti uniformément

dans le système en début de simulation (Figure 36) et d'étudier l'évolution temporelle et spatiale de ce traceur. Dans ce type de simulation, une diminution de la masse de traceur dans le système lagunaire est due à une sortie d'eau des lagunes vers la mer. Les simulations sont faites jusqu'à que la masse de traceur dans l'ensemble du système lagunaire soit proche de zéro, et les temps de résidence sont déterminées grâce à l'équation n°6.

Pour déterminer ces temps de résidence, nous disposons d'un ensemble de données expérimentales complet sur une période de 10 mois. Comme précédemment indiqué, et malgré les incertitudes relatives aux manipulations d'ouvrages en dehors de cette période, il nous a semblé intéressant pour l'étude des temps de résidence d'étendre le plus possible cette période de simulation. Considérant les données disponibles, il n'a été possible d'étendre cette période que de 2 mois supplémentaires. Nous avons ainsi pu mettre en œuvre une simulation d'une année, du 16/11/2017 au 16/11/2018, bien que les manipulations de certains ouvrages hydrauliques des EMSC ne soient pas connues sur la période du 29/09/2018 au 16/11/2018. Pour ces ouvrages, nous avons fait des hypothèses sur les manipulations possiblement faites au cours de ces deux mois.

Les Figure 49, Figure 50 et Figure 51 ci-après indiquent les résultats en termes d'évolution de la masse de traceur dans le système lagunaire, et les cartographies des temps de résidence estimés sur cette année de simulation.

4.2.4.1. Evolution de la masse de traceur dans l'ensemble du système

La Figure 49 indique les masses de traceurs (en tonnes) dans l'ensemble du système le 16/11/2017 à 12h, en début de simulation (Figure 36), et le 16/11/2018 à 12h, en fin de simulation.

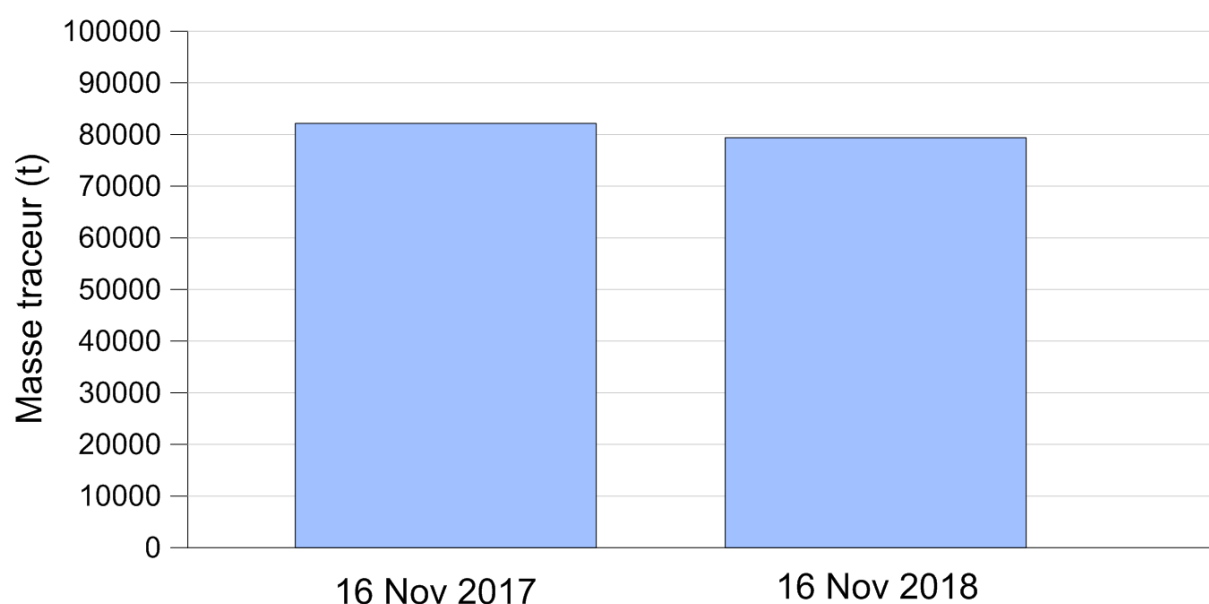


Figure 49 : Masses initiale (16 Novembre 2017) et finale (16 novembre 2018) de traceur dans l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC ». Les masses sont exprimées en tonnes (t).

La Figure 50 présente les mêmes grandeurs, mais cette fois-ci exprimées en pourcentage par rapport à la quantité initiale de traceur présent dans le système.

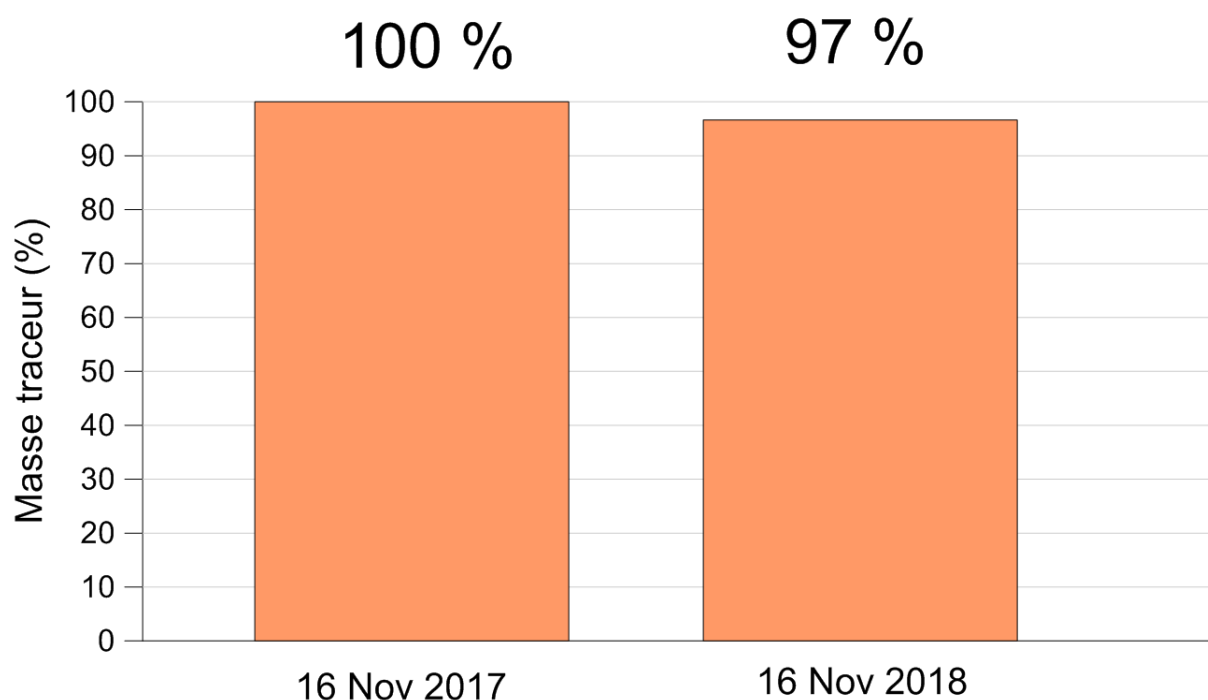


Figure 50 : Masses initiale (16 Novembre 2017) et finale (16 novembre 2018) de traceur dans l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC ». Les masses sont les mêmes que celles de la Figure 49, mais exprimées en pourcentages par rapport à la masse initiale.

Les simulations montrent donc que le système étudié est un système globalement très confiné. En une année, seuls 3% de la quantité de traceur initialement présent dans le système en sont sortis.

La diminution de la masse totale de traceur dans le système n'est pas une fonction linéaire avec le temps, elle a tendance à être plus rapide dans les premières périodes de simulations. Dans ces premiers moments de la simulation, les endroits proches des zones d'échanges avec la mer vont en effet rapidement présenter des diminutions de leurs quantités de traceur, tandis que les endroits très éloignés de ces zones d'échanges vont nécessiter beaucoup plus de temps pour que ces échanges les impactent.

En approximant cette fonction par une fonction linéaire, on obtient cependant un ordre de grandeur d'une trentaine d'années pour le temps de résidence global. Ainsi, il faudrait pour déterminer proprement le temps de résidence global de l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC » mettre en œuvre des simulations sur plus de 30 années, ce qui n'a pu être fait dans le cadre du présent projet pour différentes raisons :

1/ la mise en œuvre d'une simulation d'une année sur un ordinateur de 36 cœurs de calculs, machine déjà très performante, nécessite un peu plus de 8 jours et 7 heures de calculs. Une simulation d'une trentaine d'années nécessiterait donc plus de 248 jours de calculs, soit environ 8 mois de calcul, ce qui n'a pu être mis en œuvre sur la durée du projet.

2/ Nous ne disposons pas pour l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC » d'une chronique de 30 ans de données expérimentales permettant de réaliser les simulations. Une solution à ce second problème serait de définir avec les co-gestionnaires de ces différents sites des scénarios de gestion courante des différents ouvrages présents, d'estimer des volumes moyens journaliers d'eau d'irrigation et de drainage agricole entrants dans les différents étangs du site, et de simuler plusieurs années météorologiques différentes, jusqu'à obtenir une diminution de la masse totale initiale de traceur proche de 100%, et d'en estimer les temps de résidences locaux et global avec l'équation n°6.

Etant donné les contraintes de temps de calcul indiquées dans le point 1, ces calculs n'ont pu être mis en œuvre dans le cadre du présent projet mais pourraient être réalisés dans le cadre d'un futur projet.

4.2.4.2. Cartographie des temps de résidence locaux « intermédiaires »

Comme illustré sur la Figure 50, au bout d'une année de simulation seuls 3% de la quantité initiale de traceur présent dans l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC » en sont sortis. Il n'a donc pas été possible de cartographier les temps de résidence à proprement parlé, mais nous avons pu à partir des résultats de simulation cartographier des temps de résidence « intermédiaires », calculés avec l'équation n°6 sur une période de simulation d'une année.

Ces résultats sont indiqués sur la Figure 51.

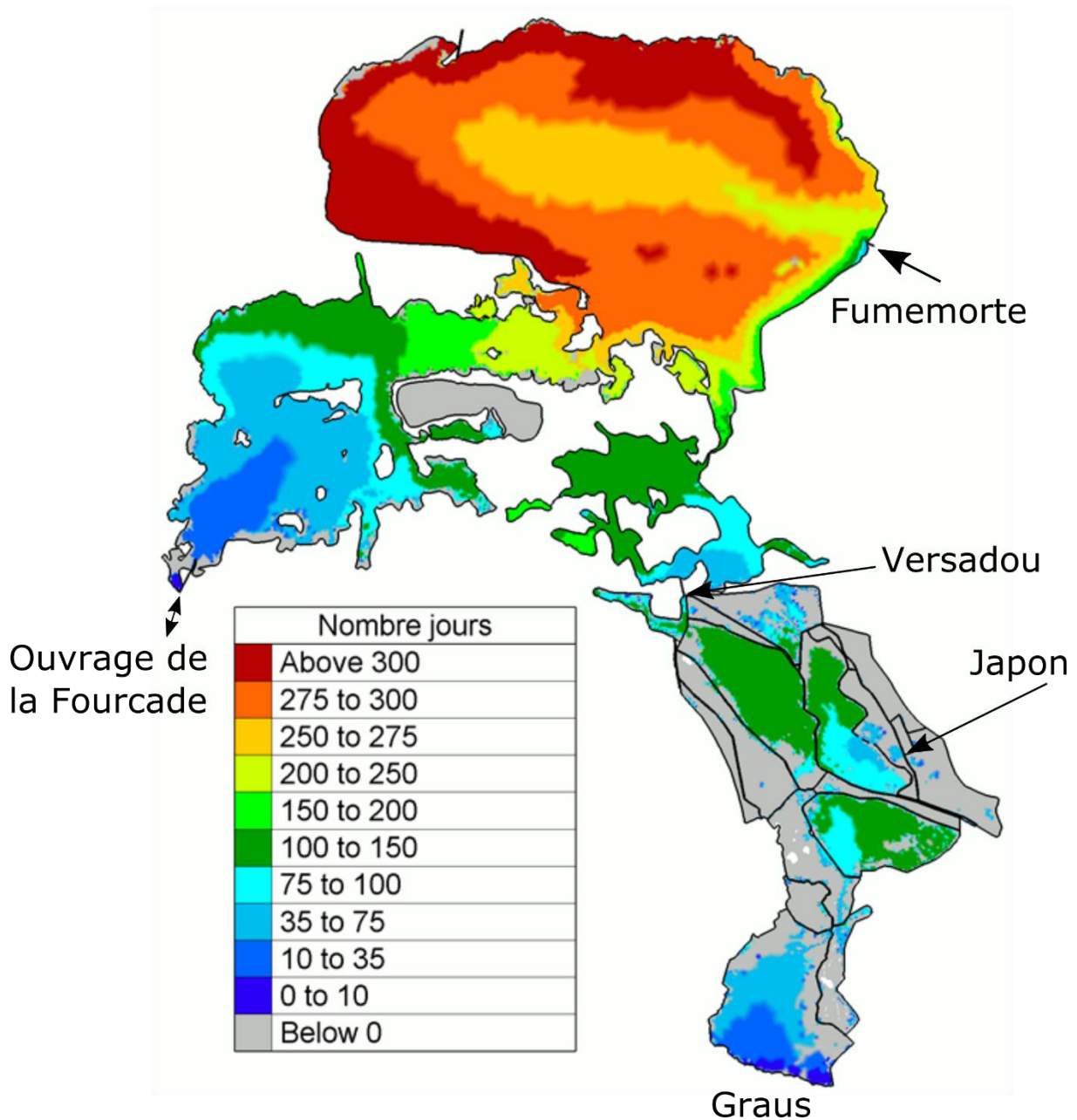


Figure 51 : Temps de résidences locaux « intermédiaires » estimés avec l'équation n°6 sur une période de simulation d'une année, soit sur une durée de 365 jours.

Les résultats de simulations confirment le caractère très hétérogène des différentes zones de l'ensemble « hydrosystème Vaccarès / EMSC ».

Les zones avec les temps de résidence les plus faibles sont celles situées :

- Directement à proximité des graus ou ouvrages de connexion avec la mer, comme les étangs de Beauduc et des Impériaux (respectivement n°20 et 2 sur la Figure 4),
- Sous influence directe de ces connexions avec la mer (étangs de Vaisseau 1, Val Agricola, Pourtour Rascaillan 2 et Grand Rascaillan , cf n°14,17,18 et 19 sur la Figure 4),
- Directement en connexion avec les canaux de drainage et d'irrigation qui s'écoulent dans le système : étang du Fangassier (n°9 sur la Figure 4, exutoire du canal du Japon), étang du Tampan (n° 5 sur la Figure 4, exutoire du Versadou),
- Sous influence directe des canaux de drainage et d'irrigation : étang de la Dame (n°4 sur la Figure 4).

L'étang présentant les temps de résidence « intermédiaires » les plus élevés est celui du Vaccarès, avec par endroit des temps pouvant atteindre jusqu'à 341 jours sur les 365 jours de simulation. L'étang du Vaccarès est donc l'étang le plus confiné du système. Ceci s'explique par plusieurs éléments :

- D'un point de vue bathymétrique, cet étang est une « cuvette », plus profonde que les autres étangs du système (voir Figure 3), et donc plus propice à conserver les eaux et traceurs associés. Le volume d'eau contenu dans le Vaccarès représente environ 80% du volume total contenu dans l'ensemble des étangs de l'hydrosystème Vaccarès (Boutron et al., 2015).
- Par rapport aux autres étangs du système, il est « éloigné » de la mer. Son « lien » avec celle-ci se fait par l'intermédiaire d'étangs peu profonds, dont les géométries relativement hétérogènes ne favorisent pas des écoulements vers la mer en cas de vents provenant du Nord, le vent étant un des principaux moteurs des écoulements sur ces étangs (Boutron et al., 2015).
- Les écoulements induits par des épisodes de vent du Nord génèrent des zones de recirculation circulaires des eaux (i.e. « gyres » de recirculation) qui augmentent les temps de résidence dans cet étang. Ces zones de recirculation sont illustrées dans la Figure 52 ci-dessous pour un vent de type mistral de 7,6 m/s.

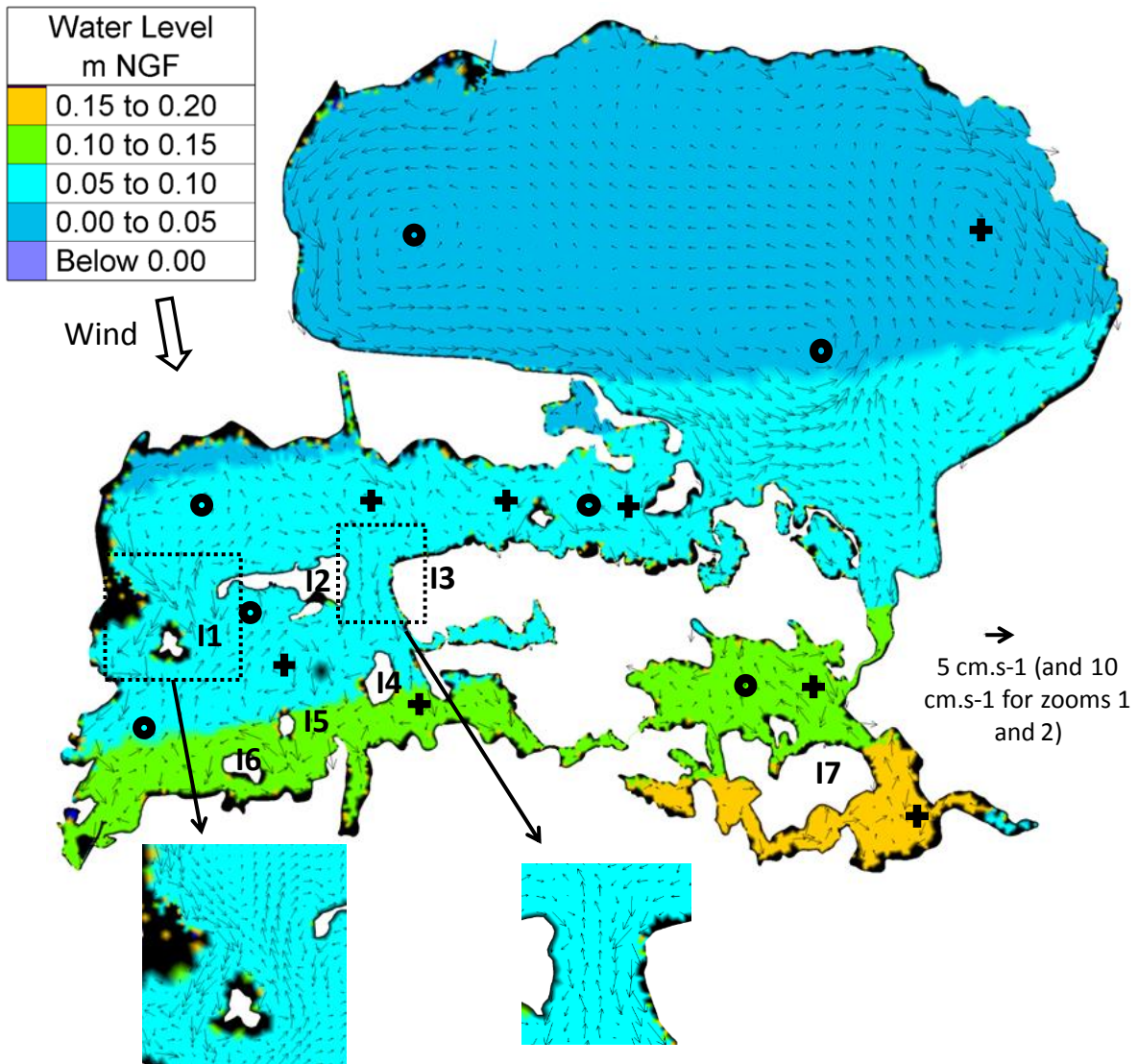


Figure 52 : Ecoulements générés dans l’hydrosystème Vaccarès par un vent de type Mistral de 7,6 m/s (Boutron et al., 2015)

Il est intéressant de noter l’influence du canal de drainage du Fumemorte sur les temps de résidence, avec le long des berges du Vaccarès à proximité de l’exutoire de ce canal des temps de résidence beaucoup moins importants que ceux de l’étang, et une zone centrale de l’étang directement dans l’axe d’arrivée de cet exutoire avec également des temps de résidence moindres (Figure 51). La présence de ce canal explique en partie les différences de temps observées entre les parties Est et Ouest de l’étang du Vaccarès.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un modèle hydro-salin TELEMAC-2D est maintenant opérationnel sur l'ensemble constitué de l'hydrosystème Vaccarès et des Etangs et Marais des Salins de Camargue. Ce modèle permet de simuler l'ensemble des grandeurs classiques des écoulements (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, ...) mais également l'évolution spatiotemporelle de traceurs comme la salinité. Il permet également de mettre en œuvre des simulations pour caractériser les temps de résidence locaux et globaux, bien que pour l'ensemble « Hydrosystème Vaccarès / EMSC » les données expérimentales nécessaires à la détermination fine de ces temps ne couvrent pas une période suffisamment longue (nécessité d'avoir des données expérimentales sur plusieurs décennies).

Par ailleurs, ce projet a permis l'installation de nouveaux instruments de mesures sur les sites, qui avec ceux déjà existant ont permis l'acquisition d'un ensemble de données nécessaires à la mise en œuvre des simulations sur une année complète.

L'avantage d'un modèle comme TELEMAC-2D est qu'il est un modèle à base physique. Les équations utilisées pour simuler les écoulements et l'évolution de la salinité sont des équations non empiriques. Il est donc possible de simuler à partir de ce modèle des situations qui sortent des gammes de situations utilisées pour sa conception. Il pourra donc être utilisé pour dimensionner des travaux hydrauliques (création de digues, création de nouvelles connexions entre les différents étangs, création ou suppression d'ouvrages hydrauliques, etc...). Par ailleurs, ce modèle prend explicitement en compte les échanges avec la mer Méditerranée et les bassins versant agricoles environnants. Il est donc utilisable pour simuler les conséquences sur les dynamiques hydro-salines de ces étangs d'aménagements de ces bassins versant ou des ouvrages de connexion avec la mer.

Enfin, ce modèle prenant en compte l'influence du vent, de la pluie et de l'évaporation sur les dynamiques hydro-salines des étangs, il est un outil pertinent pour étudier l'influence des changements climatiques (incluant l'élévation du niveau marin) sur ces dynamiques.

Les dynamiques hydro-salines des zones humides côtières sont à la base du fonctionnement écologique de ces milieux. Ce modèle pourra donc être utilisé pour estimer l'influence de choix de gestions, aménagements futurs et changements climatiques sur les dynamiques de la végétation aquatique, mais également d'espèces comme les poissons et les oiseaux.

Les modélisations de dynamiques de polluants, des sédiments, de la houle, reposent toutes sur la connaissance des dynamiques des écoulements. Ce modèle sera donc un élément incontournable pour tous les développements à venir sur l'étude de la résilience de la Camargue aux changements globaux.

6. REFERENCES

- Boutron, O., Bertrand, O., Fiandrino, A., Höhener, P., Sandoz, A., Chérain, Y., Coulet, E., Chauvelon, P., 2015. An Unstructured Numerical Model to Study Wind-Driven Circulation Patterns in a Managed Coastal Mediterranean Wetland: The Vaccarès Lagoon System. *Water* 7, 5986–6016. <https://doi.org/10.3390/w7115986>
- Boutron, O., Chauvelon, P., 2016. Rapport de modélisation : développement d'outils de simulation sur le fonctionnement hydro-salin du site des Etangs et Marais des Salins de Camargue.
- Burr, L., 2019. Utilisation d'Openfoam pour la modélisation numérique d'une vanne en Camargue. (Rapport de stage Polytech Clermont-Ferrand).
- Cucco, A., Umgiesser, G., 2006. Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecol. Model.* 193, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.043>
- Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Canu, D.M., Solidoro, C., 2009. Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin. *Ecol. Model.* 220, 913–922. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.01.008>
- Ferrarin, C., Arturas, R., Saulius, G., Georg, U., Lina, B., 2008. Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon. *Hydrobiologia* 611, 133–146. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9454-5>
- Ferrarin, C., Ghezzi, M., Umgiesser, G., Tagliapietra, D., Camatti, E., Zaggia, L., Sarretta, A., 2013. Assessing hydrological effects of human interventions on coastal systems: numerical applications to the Venice Lagoon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 1733–1748. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1733-2013>
- Ferrarin, C., Umgiesser, G., Bajo, M., Bellafiore, D., De Pascalis, F., Ghezzi, M., Mattassi, G., Scroccaro, I., 2010. Hydraulic zonation of the lagoons of Marano and Grado, Italy. A modelling approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 561–572. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.02.012>
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, in: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, pp. 120–145.
- Takeoka, H., 1984a. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Cont. Shelf Res.* 3, 311–326. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(84\)90014-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(84)90014-1)
- Takeoka, H., 1984b. Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. *Cont. Shelf Res.* 3, 327–341.
- Umgiesser, G., Chao, J., Bajo, M., Scroccaro, I., Cucco, A., 2005. Residence time modelling in the Nador Lagoon, Morocco, in: *Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean (ICCCM05)*. Presented at the P 1 INT C COAST CONS, das Neves, L.; Sena, A.; Ferreira, O.; Veloso Gomes, F.; Traveira Pinto, F., pp. 389–397.
- Umgiesser, G., Ferrarin, C., Cucco, A., De Pascalis, F., Bellafiore, D., Ghezzi, M., Bajo, M., 2014. Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling. *J. Geophys. Res. Oceans* 119, 2212–2226. <https://doi.org/10.1002/2013JC009512>
- Usiglio, J., 1849. Etudes sur la composition de l'eau de la Mediterranee et sur l'exploitation des sels qu'elle contient. *Ann. Chim. Phys.* 27, 172–191.