

Faculté des bioingénieurs

Etude de la dynamique de salinité des sols et des eaux dans la zone humide du parc national Palo Verde en Costa Rica et lien avec la propagation de *Typha domingensis*

Auteur : Nadège Coussement
Promoteur(s) : Mathieu Javaux
Co-promoteur : Alice Alonso
Lecteur(s) : Marnik Vanclooster
Yannick Agnan

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme
de Bioingénieur : master en sciences agronomiques

Remerciements

Je souhaiterais en tout premier lieu remercier mon promoteur Prof. Mathieu Javaux et ma co-promotrice, Dr. Alice Alonso pour leur encadrement, leur expertise et leur aide lors de la réalisation de ce Mémoire.

Ma gratitude revient également mes lecteurs, les professeurs Vanclooster et Agnan pour leur temps et d'intérêt pour mon travail.

Je tiens également à remercier l'*Organization for Tropical Studies* de m'avoir offert l'opportunité et les fonds nécessaires afin de réaliser l'étude de terrain au Costa Rica.

Je remercie l'ensemble du personnel de la Station Biologique Palo Verde et particulièrement pour Juan Marcial Serrano Sandí pour leur hospitalité, leur aide précieuse sur le terrain et pour les moments plus légers passés ensemble durant mon séjour au parc qui ont rendu ce voyage mémorable.

Tous mes remerciements à Hélène Dailly, Karine Henin et l'équipe de MOCA de m'avoir guidé lors de mes manipulations au laboratoire.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de mon travail. J'aimerais spécialement remercier Antoine Fabri pour la relecture et les conseils.

Table des matières

Liste des figures.....	vi
Liste des tables.....	ix
1. Introduction	1
2. Etat de l'art.....	3
2.1. Les zones humides.....	3
2.1.1 Définitions	3
2.1.2. Hydrologie	5
2.1.3. Sols hydriques des zones humides	6
2.1.4. Grands processus de salinisation et impacts écologiques.....	7
2.2. <i>Typha domingensis</i>	10
2.2.1 Description	10
2.2.2. <i>Typha</i> et son environnement	13
3. Cas d'étude : Parc National Palo Verde.....	17
3.1 Introduction générale du site d'étude	17
3.2 Etat hydrologique du parc	22
3.3 Etat de salinité du parc.....	24
4. Hypothèses et Objectifs	26
5. Matériels et méthodes	27
5.1. Base de données	27
5.1.1. Dispositif expérimental	27
5.1.2. Pré-traitement des données.....	30
5.2. Site d'étude	38
5.2.1. Campagnes de terrain	38
5.2.2. Accessibilité des lagunes	40
5.2.3. Mode opératoire d'échantillonnage	43
5.2.4. Localisation de l'échantillonnage	43
5.2.5. Mesure EC des eaux de surface des campagnes IDCS et IDT	45
5.2.6. Pré-traitement et méthode d'analyse des données de campagnes.....	47
6. Resultats et discussion	49
6.1. Exploitation de la base de données existante	49
6.1.1 Bilan conceptuel.....	49
6.1.2. Hydrologie	51
6.1.3. Salinité.....	58
6.2. Campagnes de terrain	66
6.2.1 Couverture spatiale	67

6.2.2	Transect	75
6.2.3.	Evolution temporelle.....	77
6.2.4	Association entre <i>Typha</i> et salinité	81
7.	Conclusion	83
	Bibliographie et webographie	86
	Annexes	i
	Annexe A : Convention Ramsar relative aux zone humides	i
	Annexe B : Périodogramme de l’analyse de Fourier sur les données des niveaux des eaux souterraine	iii
	Station Poza Verde (Analyse brute).....	iii
	Station Varillal (analyse brute)	iv
	Station Chamorro (analyse brute)	iv
	Station Palo Verde (analyse brute).....	v
	Station La Bocana (analyse brute)	vi
	Annexe C : Mesures et observations relevées durant les trois campagnes de terrain	vii
	Campagne Couverture Spatiale_IDCS	vii
	Campagne Transect_IDT	xiii
	Campagne Evolution Temporelle_IDEt	xv
	Annexe D : Packages RStudio®	xvi
	Annexe E : Mesure de l’électroconductivité du sol mesuré en laboratoire	xviii

LISTE DES FIGURES

Figure 2 - 1 : Les quatre types de wetlands et les lacs temporaires et permanents classés selon des facteurs hydrologiques (profondeur, durée d'inondation...) et l'apport nutritif lié à des facteurs chimiques dont l'azote disponible (Keddy, 2010).	4
Figure 2 - 2 : Représentation de la morphologie de <i>Typha domingensis</i> . (a) plante entière ; (b) inflorescence avec la partie femelle (gynécée) en dessous et la partie mâle (androcée) ; (c) diaspore avec un akène enveloppé de poils intégrés au niveau du pédoncules floral (Thiam, 2012).	10
Figure 2 - 3 : Inflorescence de <i>Typha</i> (FLOREALPES : Comparaison de <i>Typha angustifolia</i> et <i>Typha domingensis</i> , s. d.)	12
Figure 3 - 1 : Localisation géographique du Parc National de Palo Verde (Jiménez-Rodríguez et al., 2019).	17
Figure 3 - 2 : Carte du parc National Palo Verde représentant la dispersion de <i>Typha domingensis</i> (points rouges) durant la saison sèche de 2019 (Carte réalisé par Toussaint F., 2021).	21
Figure 5 - 1 : Position des piézomètres, la station météorologique (losange noir) et la station OTS (maison rouge) et les six lagunes du la zone humide de Palo verde (Alonso, 2017).	28
Figure 5 - 2 : Représentation schématique d'un piézomètre présent au sein du Parc National Palo verde (Crombé, 2019).	29
Figure 5 - 3 : Histogrammes des données disponibles pour la hauteur des eaux de la nappe (WTE) (A) et la hauteur des eaux de surface (SWE) (B).	32
Figure 5 - 4 : Evolution de la hauteur d'eau de la nappe pour les stations Chamorro, La Bocana, Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal. Le 0 correspond au niveau référence (datum).	33
Figure 5 - 5 : Evolution de la hauteur d'eau de surface pour les stations Palo Verde, Poza Verde, Tempisque, La Bocana et Varillal. Le niveau du sol par rapport au niveau de référence (datum) des stations Palo Verde, Poza Verde, La Bocana, Tempisque et Varillal est de 1.866, 2.8, 1.679, 2.437 et 2.379 m respectivement.	33
Figure 5 - 6 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de nappe pour les stations Chamorro, Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal.	34
Figure 5 - 7 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de surface pour les stations Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal.	35
Figure 5 - 8 : Periodogramme de la station Varillal pour les données des hauteurs des eaux de nappe.	37
Figure 5 - 9 : Poza Verde, Chemin « facile », la végétation est modérée et l'eau arrive au niveau de la poitrine (+ 1.30m)	41
Figure 5 - 10 : Transect, traversée de Palo Verde à cheval, l'eau est trop profonde pour se déplacer à pied mais la végétation est trop abondante pour se déplacer en bateau. Le cheval apporte de plus une sécurité supplémentaire.	41
Figure 5 - 11 : Nicaragua, La boue rend les déplacement difficiles et limite la longueur des trajets qu'on peut effectuer en une journée.	42
Figure 5 - 12 : Chamorro, zone inaccessible, cette densité de végétation rends les déplacements impossibles, les machettes ne suffisent pas pour s'y frayer un chemin	42
Figure 5 - 13 : Carte de localisation des différents points de mesure de l'électroconductivité des eaux de surface et d'échantillonnage de sol (bordeaux), d'échantillonnage d'eau (rouge clair), de la station OTS (bleu) et du transect (orange) (Parque Nacional Palo Verde - uMap)	44

Figure 6 - 1 : Bilan conceptuel des différents réservoirs et leurs interactions au sein du Parc Naturel Palo Verde. Les différents tons d'orange indiquent si un(e) réservoir/source influence fortement ou faiblement l'apport en sel dans le parc.	50
Figure 6 - 2 : Bilans conceptuels des différents réservoirs et sources d'eau avec leurs interactions représentées pour les six lagunes. Avec ET : Evapotranspiration, In : Interception, D : Débordement, Dv : Déversement, I : Intrusion, Dr : Drainage, RC : Remontée capillaire et Inf : Infiltration.	51
Figure 6 - 3 : Hauteur de la nappe phréatique (WTE), de l'eau de surface (SWE) et des eaux souterraines de la rivière Tempisque relevée toutes les 15 minutes. Les stations de surveillance WTE et celles de SWE sont espacées de 1,5 m, sauf pour la station Poza Verde qui est espacée de 700 m.	52
Figure 6 - 4 : Evolution de la hauteur de la nappe de la station Palo verde durant la dernière semaine de février 2017.	54
Figure 6 - 5 : Evolution de la hauteur de la nappe de la station Palo verde durant la dernière semaine de mars 2019.	54
Figure 6 - 6 : Boîte à Moustache du niveau des eaux souterraines (WTE) pour la station Chamorro, La Bocana, Palo Verde, Poza Verde et Varillal. Le niveau du sol (par rapport au datum de référence) est représenté par un point rouge pour chaque station.	55
Figure 6 - 7 : Evolution des précipitations, du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Palo Verde (agrégées par jour).	58
Figure 6 - 8 : Evolution du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Chamorro (agrégées par jour).	59
Figure 6 - 9 : Evolution des précipitations, du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Poza Verde (agrégées par jour).	59
Figure 6 - 10 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Varillal. Les données à questionnaire sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.	61
Figure 6 - 11 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Chamorro. Les données à questionnaire sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.	62
Figure 6 - 12 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Palo Verde. Les données à questionnaire sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.	63
Figure 6 - 13 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux souterraines pour les stations de mesure de Chamorro, Palo Verde, Poza Verde et Varillal.	64
Figure 6 - 14 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de nappe pour les stations de mesure Palo Verde, Poza Verde et Varillal.	65
Figure 6 - 15 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface des six lagunes (Chamorro, La Bocana, Nicaragua, Palo Verde, Poza Verde et Varillal). Mesures réalisées en septembre 2021.	68
Figure 6 - 16 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface de la campagne de terrain (rouge), des eaux de surface du réseau de donnée (vert) et des eaux souterraines (bleu) pour les six lagunes (Chamorro, La Bocana, Nicaragua, Palo Verde, Poza Verde et Varillal) durant la saison humide.	69
Figure 6 - 17 : Figure 6-16 : Diagramme ombrothermique de San José au Costa Rica (2019) (San José – Climate.org).	70
Figure 6 - 18 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface de la campagne de terrain (rouge), des eaux de surface du réseau de donnée (vert) et des eaux souterraines (bleu) pour Palo Verde durant la saison humide.	70

Figure 6 - 19 : Electroconductivité des eaux des sols échantillonnés lors de la campagne de terrain IDCS en septembre 2021 pour les six lagunes. Le nombre d'observations est indiqué entre parenthèse. ..	72
Figure 6 - 20 : Grille interpolée de profils de conductance spécifique dans le fleuve Tempisque. Conductance spécifique en mS/cm (Alonso, 2017).....	74
Figure 6 - 21 : Emplacement des profils de conductivité électrique le long de la rivière Tempisque (Alonso, 2017).	74
Figure 6 - 22 : Electroconductivité des eaux de surface du Transect partant de la rivière Tempisque jusqu'au niveau de la station Palo Verde. Chaque point est séparé approximativement de 150 mètres. Le transect à une longueur de 1500 mètres (Septembre 2021).	76
Figure 6 - 23: Electroconductivité des eaux du sol du transect partant de la rivière Tempisque jusqu'au niveau de la station Palo Verde. Chaque point est séparé approximativement de 75 mètres. Le transect à une longueur de 1500 mètres (Septembre 2021).	76
Figure 6 - 24 : Evolution de l'électroconductivité des eaux de surface en un point fixe localisé dans la lagune Palo Verde proche de la station de recherche OTS. Les mesures sont réalisées le matin (entre 7h30 et 9h) et le soir (entre 17h30 et 18h40).	79
Figure 6 - 26 : Evolution de l'électroconductivité des eaux de surface de la station Palo Verde du 15 au 25 septembre pour l'année 2016, 2017 et 2018 respectivement.....	80
Figure 6 - 27 : Carte du Parc National Palo Verde. Les emplacements de mesure et d'échantillonnage des eaux et sols sont indiqués par un point vert (présence de Typha) et gris (absence de Typha) (Parque Nacional Palo Verde - uMap).	82
Figure 6 - 28 : Boxplot des points de mesure de l'électroconductivité. Le Boxplot NT représente les points pour lesquels il n'y avait pas la présence de Typha lors des mesures. Le Boxplot T représente les points pour lesquels il y avait la présence de Typha lors des mesures de salinité.....	82

LISTE DES TABLES

Tableau 5 - 1 : Cycles des stations de mesure, en jours, à partir des données interpolées du réseau de donnée. Les chiffres se trouvant entre parenthèses montrent une incertitude quant à la présence d'un cycle (cycle secondaire).....	37
Tableau 6 - 1 : Localisation, nombre et type d'échantillons collectés pendant la campagne de terrain IDCS (Couverture Spatiale) et IDT (Transect Tempisque-Palo Verde).	45
Tableau 6 - 2 : TABLEAU CROISEE DES P-VALEURS DU TEST DE MANN ET WHITNEY SUR LES VALEURS DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE LA CAMPAGNE IDCS.	72
Tableau 6 - 3 : RELEVÉ DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE, LA TEMPERATURE ET LES CONDITIONS METEOROLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE IDET-EVOLUTION TEMPORELLE D'UN POINT FIXE SITUE DANS LA LAGUNE PALO VERDE, PROCHE DE LA STATION DE RECHERCHE OTS.	78

1. INTRODUCTION

Situé au nord-ouest du Costa Rica dans la province de Guanacaste, le Parc National Palo Verde est aujourd'hui reconnu comme une des zones écologiques les plus riches en diversité au monde, c'est notamment le refuge d'une centaine d'espèces d'oiseaux d'eau. Le parc offre un environnement idéal pour la reproduction de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs et d'espèces locales. Le parc est classé comme un site RAMSAR depuis plus de quarante ans. La préservation des régions listées par cet organisme est importante pour des raisons économiques, culturelles et écologiques.

Ces dernières années le parc, principalement la zone humide située dans la partie inférieure du bassin versant, a subi d'importants changements environnementaux notamment au niveau hydrologique et au niveau de la flore locale. Ces changements ont pour origine la mise en place d'un réseau de canaux d'irrigation et la construction de centrale hydroélectrique. Ces perturbations affectent la diversité de l'environnement en favorisant la prolifération d'une espèce invasive de roseaux : *Typha domingensis*. Cette dernière, en dominant la flore du parc, a engendré une diminution de la richesse des espèces et des populations d'oiseaux migrateurs. Étant donné les connexions entre l'hydrologie et la flore de la zone humide, il est donc devenu primordial d'étudier et de comprendre ces changements et de mener une action directe et efficace pour permettre de rétablir l'équilibre du parc.

Plusieurs études ont déjà été menées sur l'hydrologie et les bilans d'eau du site. Compte tenu de la complexité des interactions existant au sein du système du wetland, plusieurs facteurs peuvent avoir contribué au déséquilibre écosystémique et à la prolifération de *Typha*. L'une des hypothèses qui a été posée est l'augmentation de la salinité des eaux et du sol. Une meilleure compréhension de la salinité du parc permet une meilleure compréhension de son hydrologie et est importante pour poursuivre la gestion et la protection des zones humides. L'objectif général de ce mémoire est d'améliorer la compréhension de la dynamique de salinité au sein du parc. Ceci passe par l'étude dans le temps et dans l'espace de la salinité des eaux et des sols.

L'étude de la salinité du wetland est un défi car les données mises à notre disposition sont limitées de par leur disponibilité (données manquantes ou peu fréquentes), et leur qualité (données bruitées, mesures parfois peu fiables). Caractériser la variabilité de la salinité du wetland requiert une méthodologie adaptée au type de système et à l'étude de cas. Pour cela, un travail bibliographique sur les principaux concepts des zones humides, suivi d'une documentation sur l'espèce *Typha domingensis* et son interaction avec la salinité a été réalisé. Ces étapes seront suivies d'une étude de cas sur le parc Palo Verde. Pour mieux appréhender la dynamique de salinité du parc, nous aborderons les relations

entre l'évolution de la hauteur d'eau du wetland et l'évolution de la salinité. Pour finir, une étude de terrain a permis d'améliorer via trois campagnes la couverture spatiale des données sur la salinité des eaux de surface et du sol ainsi que la présence de *Typha*, leur interprétation permet notre compréhension de la dynamique de la salinité et amène des réflexions sur la prolifération de *Typha*.

2. ETAT DE L'ART

2.1. Les zones humides

2.1.1 Définitions

Nous trouvons des zones humides dans différentes régions du monde, dans le continent comme le long des côtes, et chacune possède ses propres caractéristiques. La quantité importante des processus abiotiques rends difficile l'étude et la classification des zones humides mais également les définitions des milieux. En effet, Les zones humides ou wetlands ne peuvent être catégorisées ni comme milieu aquatique ni comme milieu terrestre mais possèdent une combinaison des caractéristiques propres aux deux milieux. Les processus hydriques sont différents notamment parce que les eaux ont des origines différentes. La convention Ramsar (Convention sur les zones humides, 1971) a néanmoins établi une définition générale des zones humides : "les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » de l'Article 1.1 (Annexe A). Cette définition a pour vocation d'être large et décrit des milieux parfois très différents les uns des autres.

En fonction du cas d'étude, d'autres définitions peuvent être plus appropriées comme celle proposée par la U.S. Army Corps of Engineers, plus adaptée dans le cadre de la réglementation par exemple.

Ces différentes définitions s'accordent sur plusieurs points : les inondations ou la saturation en eau durant une grande partie de l'année, la décomposition lente de matière organique, et l'adaptation de leur faune et flore aux conditions de saturation en eau (Mitsch et al., 2009; Mitsch & Gosselink, 2015).

Même s'il existe des points communs entre les différentes zones humides il est illusoire de vouloir les décrire par une seule définition. Par exemple, chaque wetland possède une période d'inondation mais la fréquence et la durée de ces périodes d'inondation sont différentes d'un wetland à l'autre, parfois même différents au sein d'un même wetland. En effet, les périodes d'inondation dépendent de plusieurs facteurs comme l'époque, les saisons, le flux de ruissellement ou le régime de marées.

Les wetlands sont parmi les écosystèmes les plus riches de la planète. Ils abritent des espèces végétales et animales, terrestres comme aquatiques. L'état du milieu subit des variations importantes sur différentes échelles de temps et de distance. En particulier en l'espace de quelques minutes ou à quelques centaines de mètres on peut réaliser des observations très différentes. Les écosystèmes sont donc difficiles à délimiter et à étudier systématiquement (Mitsch et al., 2009).

Dans son ouvrage *Wetland Ecology : Principles and Conservation* (Keddy, 2010), Paul Keddy a défini et classé quatre types de wetlands en fonction de leurs facteurs hydriques et leur apport en nutriments (Figure 2-1) :

- **Swamp** : Le wetland est principalement constitué d'arbres enracinés dans un sol hydrique. Nous pouvons citer les mangroves et les forêts de bas-fonds qui se développent dans les plaines inondables.
- **Marsh** : Le wetland est constitué d'une grande partie de plantes herbacées qui sont souvent émergentes, enracinées dans un sol hydrique.
- **Fens** : Le wetland accumule de la tourbe et est alimenté par les eaux souterraines et/ou de surface. Ce sont des zones caractérisées par une concentration minérale de l'eau plus importante et un pH élevé. Elles sont souvent dominées par des mousses ou des *cyberacea*.
- **Bogs** : Le wetland accumule de la tourbe. Contrairement aux fens, les eaux de surface du sol sont acides et relativement pauvres en nutriments. La recharge des eaux se fait non pas par les eaux souterraines mais principalement par les précipitations.

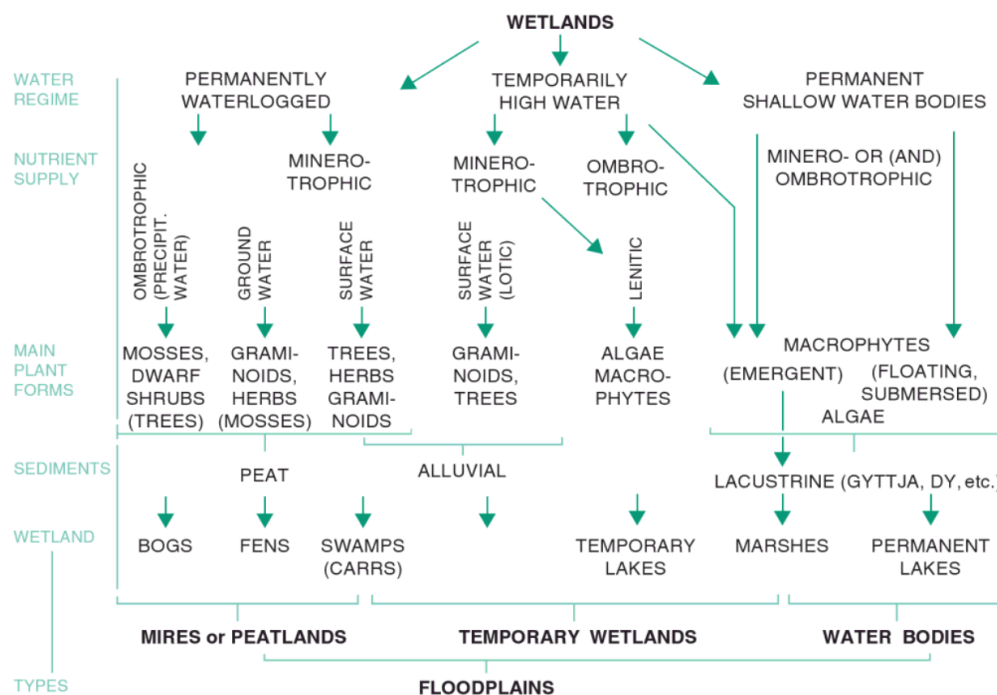


Figure 2 - 1 : Les quatre types de wetlands et les lacs temporaires et permanents classés selon des facteurs hydrologiques (profondeur, durée d'inondation...) et l'apport nutritif lié à des facteurs chimiques dont l'azote disponible (Keddy, 2010).

Les zones humides ont de multiples rôles écologiques, notamment nettoyer et stabiliser l'eau, recharger les aquifères, rythmer les épisodes d'inondation et fournir une protection aux berges. Elles permettent de maintenir en équilibre l'écosystème et sont souvent considérées comme le berceau de toute biodiversité. De plus, dans le contexte du réchauffement climatique, elles sont vues comme d'importants puits à carbone (Mitsch & Gosselink, 2015). Elles jouent également un rôle primordial pour les hommes en leur fournissant plusieurs services comme l'alimentation en eau, la pêche, l'agriculture, et les bois d'œuvre (Convention sur les zones humides, 1971).

Leur rôle pour la planète et l'humanité est donc essentiel. Cependant, depuis plusieurs années ces zones sont surexploitées dans le but d'élargir les aires agricoles et/ou résidentielles. Ces expansions anthropologiques mènent à la détérioration du milieu et engendrent des déséquilibres hydrologiques, des assèchements, de la pollution, et la surexploitation des ressources. Tout cela mène à un bouleversement écosystémique (Convention sur les zones humides, 1971; Keddy, 2010; Michael, 2016). Maintenant que de nombreuses études ont montré leur fragilité et leur importance environnementale, les zones humides sont vues comme des milieux à protéger en priorité. Un large éventail de mesures visant à garantir leur sauvegarde sont mises en place partout dans le monde. Ce n'est pourtant pas suffisant, les pratiques doivent être améliorées et de nouvelles mesures doivent être mises en place. Il est de plus important de considérer l'expansion de la population sur les 20 prochaines années (Convention sur les zones humides, 1971).

2.1.2. Hydrologie

La dynamique hydrologique des zones humides est un aspect essentiel au maintien de leurs différents processus biochimiques et physiques, et donc au maintien de la stabilité systémique de ces zones. Les processus hydrologiques sont régis par une variété de facteurs comme la pédologie, l'hydrographie, la météorologie, et la saisonnalité. L'hydrologie façonne la diversité de la faune et la flore, la matière première, l'accumulation de matière organique et sa dégradation (Mitsch et al., 2009; Mitsch & Gosselink, 2015).

L'hydrologie des zones humides est souvent étudiée au travers de l'hydropériode. Ce terme représente la composante principale de l'hydrologie, il est défini par deux processus : les périodes d'inondations et la fréquence de ces inondations. Les périodes des inondations sont les durées durant lesquelles le wetland est inondé. Tandis que les fréquences correspondent au nombre de fois que la zone est submergée d'eau pour une période définie (Mitsch et al., 2009). Notons que l'hydropériode est variable d'un point de vue intra- et interannuelle (Michael, 2016; Mitsch et al., 2009).

Le bilan hydrique est un outil utile pour étudier l'hydrologie des zones humides. Ce dernier correspond à l'ensemble des flux entrant et sortant de notre système. Dans le cas des wetland, les flux incluent les précipitations, l'évapotranspiration, les eaux souterraines et de surface, le régime des marées, et les crues des rivières. L'établissement d'un bilan hydrique est un facteur essentiel pour mettre en place des solutions adéquates pour la préservation des wetlands.

L'évapotranspiration est l'un des facteurs principaux régissant les flux d'eau des systèmes du wetland, elle représente près de 80% du bilan hydrique (Ceron et al., 2015). Il est important de quantifier cette variable pour étudier au mieux les ressources en eau du parc. Elle permet en effet de faire le lien entre le bilan hydrique et le bilan énergétique, c'est-à-dire le transfert d'énergie qui s'opère lors du passage de l'eau en état de vapeur vers l'atmosphère (Gallant, 2015). Déterminer le taux d'évapotranspiration dans le wetland est un défi de taille étant donné que la couverture de surface ne peut pas être calculée comme on pourrait le faire pour une prairie ou une forêt. En effet, les zones humides ne possèdent pas de couverture homogène avec un seul type de couverture végétale (Gallant, 2015).

Le Wetland, comme son nom l'indique, est composé de deux milieux : l'eau et le sol. Afin de comprendre l'hydrodynamique des zones humides, il est nécessaire de comprendre l'hydrologie des sols. La caractéristique première d'un sol de wetland est sa saturation en eau durant une longue ou courte durée. Les processus chimiques et physiques qui ont lieu par le déplacement de l'eau à travers un sol hydrique le modifient et engendrent sa morphologie, caractéristique des zones humides. Le passage de l'eau vers la nappe phréatique est un mouvement considérable dans la dynamique de recharge des eaux du sol. Ce processus permet de lessiver les matières solubles. Le processus de décharge des eaux du sol permet quant à lui l'ajout d'éléments comme le carbonate de calcium. Le sol garde en mémoire l'ensemble des processus qui ont lieu au sein du wetland tels que des taux d'évapotranspiration faible ou des périodes de précipitations intenses. L'étude des sols du wetland est un bon outil pour déterminer l'hydrologie attendue mais peut également nous renseigner sur d'autres paramètres comme le taux de salinité au sein du wetland (James Arndt & Ryan Emmanuel, 2016; Mitsch & Gosselink, 2015).

2.1.3. Sols hydriques des zones humides

Les sols des zones humides ont un comportement différent des sols terrestres étant donné qu'ils évoluent dans des conditions anaérobiques. En absence d'oxygène, les sols présentent des textures et des couleurs qui diffèrent des sols en conditions d'aérobie. La faune microbienne que contiennent ces sols est généralement composée d'organismes dits aérobies facultatifs. Cela signifie qu'en absence

d'oxygène, ces micro-organismes utilisent un autre élément accepteur d'électrons comme des composées organiques, du fer sous forme oxydé et certaines molécules et ions (NO_3 , Mn^{4+} , SO_4^{2-}) afin de réaliser la respiration. Dans des conditions d'anaérobie, le fer oxydé se réduit en Fe^{2+} donnant une couleur grisâtre caractéristique aux sols de wetland (Michael, 2016; Miller et al., 2009). En effet, lorsqu'un sol minéral est sous eau durant une longue période, il présente un ton gris uniforme appelé gley. Les sols qui soumis à des période de sécheresse voient le fer qu'ils contiennent à nouveau s'oxyder et donner au sol un aspect marbré rouge et gris. L'oxydation et la réduction du fer est un bon indicateur des moments où la zone a été inondée.

Pour les sols possédant une texture plus grossière contenant très peu de fer, un ton plus foncé indique que le sol est soumis à des périodes d'inondations. Sa couleur brune voire noire est un signe d'accumulation de matière organique, caractéristique des sols de wetland. Lorsqu'un sol est soumis à des conditions d'anaérobie, son processus de décomposition de la matière organique est fortement ralenti. Cela a pour conséquence que le sol présente un taux important d'accumulation de matière organique en comparaison avec les sols terrestres. Ce ralentissement de décomposition de la matière organique s'explique en partie par le fait que les micro-organismes du sol prennent plus de temps à décomposer la matière organique de par leur nombre limité. En effet, comparé à la faune bactérienne des sols terrestres, la population de bactéries et de champignons anaérobiques est moins importante. D'autre part, les accepteurs d'électron en condition d'anaérobie fournissent moins d'énergie que l'oxygène. Le processus lent peut entraîner une accumulation importante de matière organique jusqu'à former une couche faite uniquement de matière organique en décomposition appelée alors tourbe (*Soil Science Society of America Journal: Vol 44, No 5, s. d.*).

Les sols des zones humides sont souvent de type argileux vertisols et contiennent un taux d'argile supérieur à 55% avec une importante acidité (Jiménez-Rodríguez et al., 2019). Ils possèdent pour la plupart les mêmes propriétés physicochimiques (Mitsch et al., 2009).

2.1.4. Grands processus de salinisation et impacts écologiques

Les wetlands peuvent être soumis au phénomène de salinisation. Ces zones humides sont localisées dans des plaines côtières ou des régions qui sont régulièrement inondées d'eau salée (Boettinger,

1997). Les marées fournissent de l'eau et du sel dissous et durant les saisons sèches le taux d'évaporation de l'eau plus important produit des sols riches en sel.

Cependant d'autres causes peuvent expliquer la salinisation d'un wetland, en particulier les activités humaines. La remontée des nappes phréatiques due aux fossés de drainage le long des route proches des zones humides contribue la plupart du temps au phénomène de salinisation. Les sels s'accumulent alors grâce au phénomène d'évaporation (Boettinger, 1997; Skarie et al., 1987). De plus, les canaux d'irrigation placés en amont des zones humides sont des causes fréquentes de salinisation. Le ruissèlement de leurs eaux dans le wetland crée des flaques dans les lieux de dépression et celles-ci augmentent le niveau des eaux de surface et des eaux souterraines. Ces lieux d'accumulation en eau d'irrigation se salinisent lors de l'évaporation de l'eau et créent des zones fortement concentrées en sel (James Arndt & Ryan Emmanuel, 2016; Mitsch et al., 2009).

L'augmentation des activités anthropologiques et le changement climatique produisent donc l'augmentation de la salinité dans les wetlands mais modifient aussi la dynamique des régimes de salinité (Herbert et al., 2015). La salinisation de zones humides est un problème écologique important mais il est difficile de l'évaluer à l'échelle mondiale. Peu d'initiatives ont été mises en place pour quantifier et étudier ce phénomène. Plusieurs études ont montrées que de nombreux wetland dans le monde sont touchés par le phénomène de salinisation (Herbert et al., 2015; *RESSOURCES DES ZONES HUMIDES : état, tendances, services écosystémiques et capacité de restauration | Examen annuel de l'environnement et des ressources*, s. d.; Wicke et al., 2011). Ces études suggèrent également que les zones humides se salinisent plus rapidement que les autres milieux car elles se situent souvent dans des altitudes basses et reçoivent donc plus facilement les eaux salines provenant de sources voisines (Herbert et al., 2015; Jolly et al., 2008).

La salinisation importante des zones humides engendre des conséquences environnementales. Les taux plus importants d'ions changent les interactions abiotiques du milieu, ce qui déclenche une nouvelle dynamique dans le phénomène de sédimentation et de ses réactions chimiques (Wicke et al., 2011; Williams, 2001). La salinisation entrave les rôles des zones humides, notamment sa fonction à éliminer l'azote ou son aptitude à retenir le carbone. De plus, l'augmentation du taux de sel dans les zones humides déséquilibre la capacité d'absorption de l'eau et des ions essentiels aux organisme natifs des wetland. En effet, la concentration importante de sel est toxique pour les organismes vivants car elle produit une accumulation excessive d'ions dans leurs cellules, pouvant mener jusqu'à la mort de l'individu (Herbert et al., 2015). Les réactions physico-chimiques sont perturbées par une augmentation du taux de sel, ce qui perturbe à leur tous les fonctions systémiques des zones humides.

L'exposition du biote à un taux important d'eaux salines affecte le cycle biologique et la phénologie des différentes espèces présentes dans le milieu. Ces taux importants de sel peuvent amener la prolifération d'espèces invasives adaptées aux milieux salins, celles-ci induisent alors un stress physiologique dans le biote des wetlands. Ces espèces plus adaptées à la nouvelle dynamique du milieu peuvent parfois remplacer entièrement la flore et faune natives. Le potentiel et le temps de colonisation des espèces adaptées aux environnements salins varient d'un wetland à l'autre et dépendent de plusieurs facteurs comme la localisation de la zone humide, l'origine de l'arrivée des eaux salines, et l'ampleur et la vitesse du phénomène de salinisation (Herbert et al., 2015).

Le phénomène de salinisation est souvent associé à d'autres changements, notamment des changements dans l'hydrologie du milieu ou des augmentations de température et de taux d'azote (Larsen et al., 2010).

Même si quelques études ont été réalisées sur les conséquences et les réponses des organismes face à une augmentation de sel dans les zones humides, ce phénomène reste complexe à étudier de par ses interactions nombreuses et imprévisibles entre les différents composants de l'écosystème. La connaissance des rétroactions face à l'augmentation du phénomène de salinisation des wetlands est néanmoins primordiale afin de préserver et restaurer les zones humides (Herbert et al., 2015).

2.2. *Typha domingensis*

2.2.1 Description

Systématique

Typha domingensis fait partie du genre *Typha* qui est le seul genre de la famille des Typhacées (*Typhaceae*) (Taureau & Daniel, 2019). C'est une plante robuste et vivace de type herbacée. *Typha* est espèce caractéristique facilement reconnaissable par ses feuilles linéaires étroites et alternées de type engainantes. La partie intérieure des feuilles présente un aérénchyme développé donnant aux feuilles cet aspect duveteux. C'est une plante dite monoïque, c'est-à-dire qu'elle possède à la fois des fleurs femelles et mâles (unisexuées) sur le même pied. Son inflorescence est terminale et de forme cylindrique et la fleur mâle se distingue nettement de la fleur femelle. La partie mâle se retrouve en amont de la partie femelle, entre les deux parties nous retrouvons une tige nue de quelques centimètres (Figure 2-2). La partie mâle nommée androcée disparaît lorsque l'épi arrive à maturité. *Typha* mesure généralement entre 1.5 et 3 mètres de haut peut atteindre jusqu'à 4 mètres (Smith et al., 2000 ; (Enrich-Prast et al., 2008).

Elle n'est pas toxique pour l'homme, ses racines et fleurs sont même comestibles (*Typha domingensis* - *Masette australe*, s. d. ; Lim, 2016). Ces parties sont consommées fraîches ou bouillies. Les jeunes feuilles peuvent être employées comme condiments (Thiam, 2012).

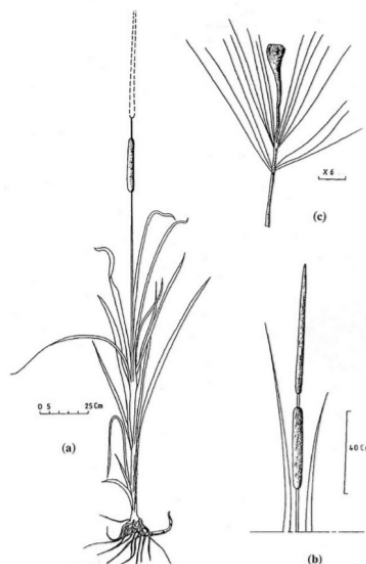


Figure 2 - 2 : Représentation de la morphologie de *Typha domingensis*. (a) plante entière ; (b) inflorescence avec la partie femelle (gynécée) en dessous et la partie mâle (androcée) ; (c) diaspore avec un akène enveloppé de poils intégrés au niveau du pédoncules floral (Thiam, 2012).

Phénologie

Pour se développer, elle a besoin d'un sol humide et frais. En effet, lorsque les bonnes conditions d'humidité, de luminosité et de température sont réunies, le taux de germination peut atteindre 100% (Sifton, 2011). La graine a la capacité de se développer dans des conditions d'anaérobie lui conférant un avantage certain dans les milieux saturés en eau.

Afin d'optimiser la croissance de son rhizome, *Typha* a besoin d'un sol inondé sur plusieurs mois. Elle préfère une eau calme avec au minimum un mètre de profondeur. Le développement de ses racines est favorisé par une montée graduelle du niveau d'eau (Thiam, 2012 ; Grace, 1989).

Typha peut avoir une croissance végétative rapide, atteignant près de deux mètres de haut en moins de 10 semaines (Lim, 2016). La phase de croissance végétative s'étend d'août à février (Castellanet, 2019).

T. domingensis fleurit de mars à mai (Castellanet, 2019). Les fleurs sont de couleur brune et compactées pour former un cylindre (Figure 2-3).

En fonction de la température, elle aura tendance à former des fruits de mai à juillet (Castellanet, 2019). Les fruits sont des akènes, ils mesurent plus ou moins 0.5 cm de longueur et sont entourés de poils favorisant leur dissémination par le vent (Z. Miao, 2007). *Typha* présente sous ses fleurs mâles des bractées de forme plates et fourchues. Les bractées entourent les étamines et les anthères, qui sont basifixées. Les fleurs femelles sont à ovaire fusiforme attaché sur un mince pédoncule. Leur stylet est fin et court et le stigmate est de forme plate et linéaire (Lim, 2016).

Dans des conditions favorables, La multiplication de *Typha* se fait principalement de manière végétative. La colonisation de nouvelles zones se fait alors par dispersion des graines. Ces dernières sont produites pendant la saison sèche et véhiculées par le vent et l'eau (Grace, 1987).

La phénologie de *Typha* varie cependant beaucoup avec les conditions environnementales. En effet *T. domingensis* est caractérisé comme ayant une forte variabilité ecotypique (Castellanet, 2019). De plus, il semble que dans un même biotope, *Typha* n'a pas la même phénologie d'une année à l'autre, rendant d'autant plus difficile son extermination dans certaines régions où elle montre un caractère envahissant.



Figure 2 - 3 : Inflorescence de *Typha* (FLOREALPES : Comparaison de *Typha angustifolia* et *Typha domingensis*, s. d.)

Répartition

La *Typha domingensis* fait partie des trois espèces du genre *Typha* les plus abondantes dans le monde (Taureau & Daniel, 2019). Elle est plus adaptée aux régions intertropicales et australes (S. G. Smith, 1986 ; Ciotir & Freeland, 2016), pourtant on la retrouve dans toutes latitudes exceptées en arctique. Une des causes est qu'on l'utilise dans des missions de re-végétalisation et de purification des eaux polluées (Castellanet, 2019 ; Oliveira et al., 2018 ; Davis, 1991; Seun oladejo, 2018).

Une autre raison expliquant sa répartition mondiale est sa capacité à se propager rapidement. *Typha* se reproduit de deux manières. D'une part, son rhizome rampant a un mode de multiplication végétatif sur de courtes distances, qui permet à un individu de s'étendre jusqu'à 8 mètres par an (Plasencia Fraga, 2017). D'autre part ses akènes anémochores se dispersent efficacement par voie aérienne sur de plus longues distances. *Typha* produit pas moins de 200 000 d'akènes par tige, à comparer avec des plantes concurrentes comme la *Cladium jamaicens* qui produit 100 fois moins de semence dans les mêmes conditions (S.-L. Miao et al., 2000).

T. domingensis présente un comportement envahissant dans de nombreux sites où elle a été étudiée, notamment en Afrique (Sénégal, Egypte), Amérique de Nord (Mexique) et de l'Amérique Sud (Costa Rica). Cela est souvent en lien avec les activités humaines, essentiellement la construction de stations

d'épuration et à l'intensification des systèmes agricoles installés à proximité. Ces activités entraînent l'eutrophisation et le rejet des déchets des stations d'épuration et des fertilisants agricoles qui permettent le développement de *T. domingensis*.

2.2.2. *Typha* et son environnement

Wetland

T. domingensis pousse principalement dans les milieux abondants en eau douce ou saumâtre comme les wetlands, les berges, les marais, les lacs ou au bord des étendu d'eau à faible débit. En effet, c'est une espèce héliophyte pour laquelle les sols inondés conviennent parfaitement (Taureau & Daniel, 2019). Sa capacité à s'adapter à ce type de milieu la place en première position face aux plantes du même genre et même vis-à-vis d'autres espèces héliophytes notamment la *Claudium jamaicense* (Newman et al., 1996 ; Chabbi et al., 2000). Même à des niveaux d'eau très importants (dépassant plus d'un mètre) *T. domingensis* garde une croissance importante (Thiam, 2012).

Si *T. domingensis* s'adapte particulièrement bien aux milieux inondés durant plusieurs semaines. Une proportion importante de tissus lacuneux dans ses feuilles et ses racines facilite la distribution d'oxygène de ses organes aériens en direction de ses organes souterrains (White & Ganf, 1998). Une étude menée par Grace en 1989 a en effet montré que la croissance est améliorée lorsqu'on augmente la submersion du sol de 40 à 137 cm pendant plusieurs semaines.

Sa capacité d'adaptation est encore supérieure lorsque le milieu dans lequel elle évolue est enrichi en nutriments, principalement l'azote et le phosphore (Grace, 1989; S.-L. Miao et al., 2000; Newman et al., 1996; Santos et al., 2015).

Typha croît sur des sols sableux argileux comme des sols riches en calcaire ou des sols de marne limoneuse argileux. Les zones humides réunissent donc de nombreuses conditions favorables à la prolifération de *T. domingensis*.

Résistance en milieu salin

Typha présente une certaine sensibilité au milieu salin lorsque le taux dépasse un seuil limite de tolérance de 8 g/L (Glenn et al., 1999; Macek & Rejmánková, 2007). En effet au-delà de ce seuil près de 98% des graines ne germent pas. Cependant au stade adulte des plants déplacées dans une milieu inondé d'eau à 45 g/l peuvent survivre près de 9 mois (Beare & Zedler, 1987). Il a été montré que la

résistance à la salinité augmente avec l'âge si la salinité n'est pas définitive dans le milieu (Beare & Zedler, 1987).

La plupart des espèces monocotylédones s'adaptent facilement lorsqu'elles sont soumises à un stress environnemental comme le stress salin. Cette capacité à s'adapter plus facilement s'explique par quelques modifications de la structures et la fonction de certains organes et tissus (Hameed et al., 2010). En effet, afin de s'adapter au mieux au stress salin, *T. domingensis* peut modifier certains de ces processus comme la photosynthèse, sa respiration ou sa transpiration. *Typha* diminue son taux de transpiration et sa conductance stomatique lorsque le niveau de salinité augmente afin d'éviter des pertes d'eau menant inévitablement à une déshydratation. Ainsi, *T. domingensis* peut maintenir un fonctionnement normal du processus de photosynthèse lorsqu'elle se trouve dans des milieu salins (Akhter et al., 2021 ; Tufail et al., 2020 ; Naz et al., 2010).

La méthode efficace en cas de stress salin est d'augmenter la densité des stomates et donc d'augmentation le nombre de stomates sur les deux faces de la feuille. En augmentant le nombre de stomates, on diminue le diamètre stomatique par l'intermédiaire d'appendices épidermiques ou par invagination épidermique. Ces dernières permettent de diminuer considérablement la perte en eau (Naz et al., 2010). Cependant, pour maintenir un taux de photosynthèse convenable, le CO₂ se diffuse au travers de pores stomatique discrets (Parkhurst, 1994). Une zone stomatique faible mais une densité stomatique accrue permet la survie dans un milieu salin. En effet, une surface stomatique plus petite permet une perte en eau plus faible et une densité importante de stomate permet une bonne conductance stomatique qui fournit une diffusion du CO₂ optimale pour la photosynthèse.

De plus, une étude démontre des modifications au niveau des feuilles de *Typha* face à un taux important de sel (Akhtar et al., 2017). Ces modifications se traduisent par un désépaississement des feuilles, une augmentation de la taille du parenchyme, un taux de croissance plus important de l'aérenchyme accompagné d'une sclérification importante. Tous ces modifications permettent de conserver l'eau au maximum.

Aussi, maintenir un équilibre adapté en concentration ionique est efficace en milieu salin (Cuina et al., s. d.). En effet, *Typha* est capable de transporter les ions K^+ vers les tiges et sa rétention dans son mésophylles en échange avec les ions Na^+ . Ces caractéristiques sont importantes pour maintenir un bon rapport de K^+/Na^+ au niveau des feuilles, ce qui influence la tolérance à la salinité (Akhter et al., 2021).

Même si *T. domingensis* n'a pas de structure propre aux plantes halophytes (*Paspalum*, *Puccinellia* ou *Distichlis*) comme des poils ou galandes de sel permettant d'excréter le sel excessif accumulé (Popp, 1995), elle possède des mécanismes d'adaptation anatomiques afin de tolérer les milieux riche en sel.

Impact sur l'environnement

En plus de se disperser facilement, rapidement et efficacement (Glenn et al., 1999), *Typha* présente souvent une densité importante de l'ordre de 1.2 kg de masse sèches par m^2 (S.-L. Miao et al., 2000; S. M. Smith et al., 2000) et est presque toujours dominante face à la flore locale au sein des milieux dans lesquels elle évolue. En effet, elle est proéminente aussi bien dans les marais saumâtres que dans les milieux arides et les zones humides côtières (Whigham et al., 1989).

La conséquence la plus observée dans la littérature est l'effet dévastateur sur la biodiversité. En prospérant rapidement et intensivement, elle ne laisse pas de place aux autres variétés végétales, menant souvent à un changement complet du biotope. Cela a pour conséquence d'engendrer une baisse de la diversité de la flore et la faune. De plus, en recouvrant les plans d'eau libre, elle occasionne également des effets négatifs pour les oiseaux natifs et migrants.

Méthode de lutte

Le moyen de lutte le plus efficace parmi ceux qui ont été testé est le traitement chimique aux pesticides comme le Doupan, Amitrol ou des Amino-Triazole. Il est particulièrement efficace si l'application est répétée sur plusieurs années à de fortes doses pouvant aller jusqu'à 25kg/ha (Apfelbaum, 1985). Cependant, cette méthode ne répond pas aux normes environnementales et d'autres solutions doivent donc être mises en place.

La méthode de brûlage est utilisée sur quelques sites. Elle a permis de gérer la couverture végétale de *Typha* dans un premier temps mais ne s'est pas montrée efficace sur le long terme (Qian et al., 2009). Au contraire, cette méthode de gestion par le feu favorise le développement de *Typha* comparé aux autres espèces. En effet, le feu permet d'une part d'enrichir le sol en nutriment, notamment le phosphore et d'autre part permet de créer des ouvertures au niveau du couvert végétal (S. M. Smith & Newman, 2001).

L'élimination par gestion mécanique a également été mise en place dans de nombreuses zones. Cela consiste à faucher manuellement les tiges de *Typha* à au moins 30 cm sous l'eau. Cependant, cette méthode doit être pratiquée régulièrement, est fastidieuse et ne s'est pas montrée efficace à long terme (Castellanet, 2019).

D'autres pistes de gestion de *T. domingensis* ont été menées comme la méthode de contrôle via un champignon phytopathologique. Des essais menés par Barreto et al. (2000) ont montré que le parasite *Colletotrichum typhae* avait la capacité de nécroser les feuilles en moins de 10 jours. Par ailleurs mettre

Typha face à un compétiteur naturel tel que l'espèce *Pterocarpus officinalis* semble être efficace. Cependant, ces deux méthodes doivent être étudiées et testées davantage avant d'être mises en place à grande échelle (Plasencia Fraga, 2017; Taureau & Daniel, 2019).

3. CAS D'ETUDE : PARC NATIONAL PALO VERDE

3.1 Introduction générale du site d'étude

Localisé sur la côte Pacifique Nord du Costa Rica, le Parc National de Palo Verde se situe dans le bassin versant Tempisque-Bebedero au nord de l'estuaire du golfe de Nicoya (Figure 3-1). Le parc couvre près de 20.000 hectares dont 8.580 hectares qui représente la zone humide. Ce dernier présente une grande diversité d'habitats. Le parc est séparé en une zone humide et une forêt tropicale. Il représente une importante aire d'hivernage pour plusieurs oiseaux migrateurs et native du Costa Rica. En 1990, le parc s'inscrit sur la liste RAMSAR (Alonso, 2017; Daniels, 2004; Gell et al., 2016; Mifsud & Thomas, 2013) des zones humides à grand intérêt mais s'inscrit également dans le REGISTRE de MONTREUX. Ce dernier énumère les différentes zones humides faisant face à des défis urgents dû à des changements écologiques qui ont eu lieu ces dernières années en conséquence de nouvelles constructions anthropologiques et développements technologiques (Résolution VI.1, 1996). Dans les années suivantes le parc est déclaré comme refuge pour la faune locale, abritant plus d'une soixantaine d'espèces d'oiseaux différents. La zone humide du parc est considérée comme l'une des zones les plus riches en biodiversité d'Amérique Centrale (Daniels, 2004).

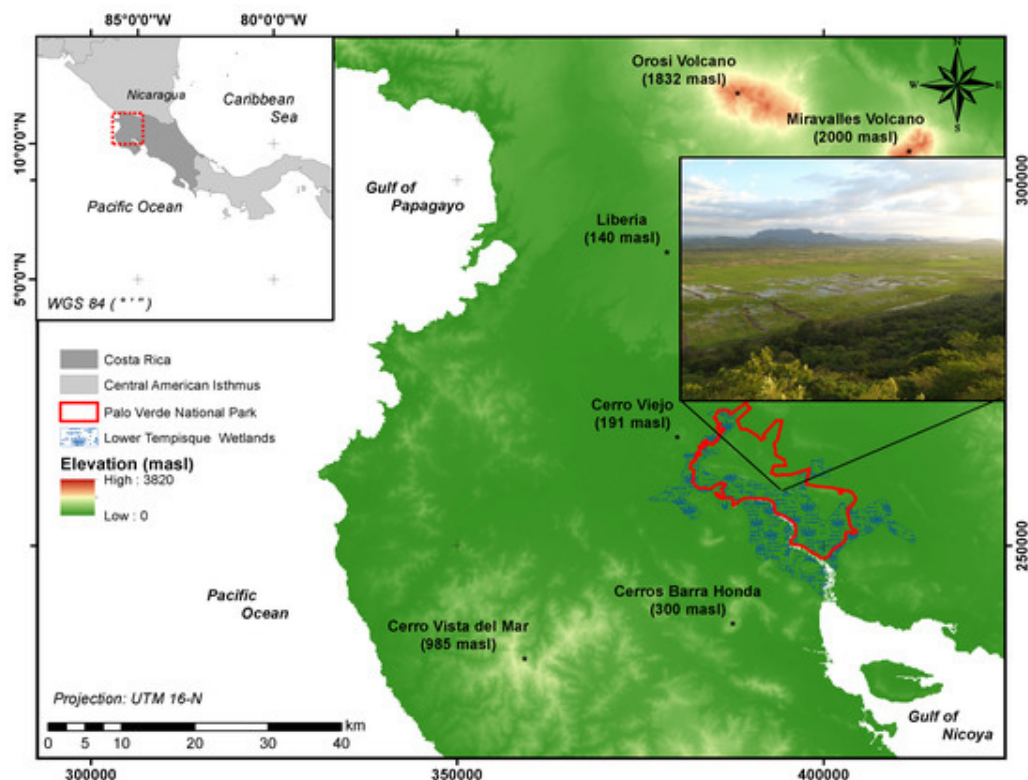


Figure 3 - 1 : Localisation géographique du Parc National de Palo Verde (Jiménez-Rodríguez et al., 2019).

Climat

Le parc naturel Palo Verde en Costa Rica présente un climat sec-humide avec des températures annuelles moyennes variant entre 16.3 et 29.3°C. La saison des pluies commence durant le mois de mai et s'étend jusqu'au mois de novembre. Les précipitations annuelles moyennes varient de 1.200 mm à 2.800 mm. Nous retrouvons les plus hauts taux de précipitation au niveau des zones montagneuses (Waylen et al., 1996). La saison sèche débute vers décembre et se termine en avril. Il y a du vent tout au long de l'année, avec une intensité plus importante durant la saison sèche (Jiménez-Rodríguez et al., 2019). Au sein même du parc on retrouve plusieurs climats distincts. Ces microclimats engendrent une dynamique biologique variée.

Etat Ecologique

Au sein du parc National Palo Verde nous trouvons une faune et une flore très riches, expliquée par la présence de plusieurs types de milieu tels qu'une forêt tropicale sèche, une zone côtière et de lagunes associées à diverses interactions édaphiques. Le parc est reconnu pour être une des zones humides les plus considérables du monde et un des sanctuaires animaliers les plus importants d'Amérique Centrale (Alonso, 2017; Jiménez-Rodríguez et al., 2019). Nous y trouvons des espèces autochtones et de nombreux oiseaux migrateurs aquatiques qui prennent refuge dans la zone humide située au centre du parc. On y compte des espèces menacées comme le Jabiru d'Amérique, le Manakin fastueux ou encore le grand Hocco. Les Ibis, les hérons, les spatules rosées ou les grands aras rouges peuplent également le parc. La réserve abrite des primates tels que des singes hurleurs ou de petits capucins. On y retrouve de petits félins comme le Jaguarondi ou encore des coatis, buffles et une concentration importante de crocodiles (Jiménez-Rodríguez et al., 2019; Monge Monge, 1999).

La flore de la zone humide du parc est principalement constituée de végétation émergente nous pouvons par exemple citer *Typha* (*T. geniculata* et *T. domingensis*) et *Canna glauca*. Nous y trouvons également quelques espèces de plantes flottantes comme *N. guadalupensis* (Sasa et al., 2015; Trama et al., 2009). Les macrophytes fournissent un abri aux animaux du parc et purifient les polluants des eaux et du sol (Jiménez-Rodríguez et al., 2019).

Cependant, le parc fait face à des changements importants depuis plusieurs années. Le gouvernement a réalisé un projet de transfert d'eau et la construction d'un barrage mise en place afin d'alimenter la centrale hydroélectrique (Alonso, 2017; Jimenez, 2001). Il y a également eu la mise en place d'un réseau d'irrigation à grande échelle pour une culture intensive essentiellement concentrée près de la rivière Bebedero (Alonso, 2017; Jiménez-Rodríguez et al., 2019). A la suite de cela, le cycle

hydrologique du parc subit des changements qui perturbent les cycles biologiques. A cela s'ajoute la pollution due aux activités humaines liée à l'industrialisation et l'urbanisation à proximité du parc (Alonso, 2017; Jimenez, 2001; Lévy et al., 1992).

Suite à la détérioration de cet écosystème ces dernières années, le parc est protégé par la Convention RAMSAR. Cette dernière, signée en Iran en 1971, a pour but de réduire la dégradation des zones humides partout dans le monde. Il vise à une meilleure conservation et utilisation durable de ces zones (Alonso, 2017; Jiménez-Rodríguez et al., 2019). En effet, la zone humide du parc est considérée comme essentielle et d'importance écologique internationale, en particulier elle protège la qualité des eaux, stocke les eaux pluviales et fournit des zones de nidification et des sites de conservation pour la faune costaricaine (*Brackish Marsh - Island Ecology 2012*, s. d.; Gell et al., 2016). Le parc fait partie d'une des rares zones nationales qui est à la fois protégée et à la fois soumise à des modifications et des changements des habitats causés par des actions humaines pour une gestion active notamment le broyage de végétation et les incendies contrôlés (Jiménez-Rodríguez et al., 2019; Kirksey, 2012; Mora & Castañeda, 2021).

Zone humide côtière

Afin d'assurer la cohérence des différents sites, la convention RAMSAR a déterminé que les zones humides inscrites dans la convention peuvent « inclure des zones de rives ou de côtes adjacentes à la zone humide et des îles ou des étendues d'eau marine d'une profondeur supérieure à six mètres à marée basse, entourées par la zone humide » Article 2.1 (Annexe A). Le parc Palo Verde peut être qualifié de zone humide côtière et rentre dans la catégorie des marais saumâtres. Ces derniers sont décrits comme des wetlands émergés accueillant une végétation (des graminées, des arbustes et des herbacées) qui tolèrent des taux de salinité légers à modérés (0,5 à 18 ppt de sel), ils sont influencés par la marémotrice de l'eau de mer (*Brackish Marsh - Island Ecology 2012*, s. d.; Seun oladejo, 2018).

On retrouve les zones humides côtières sur des rives, des rivières et des estuaires. L'eau douce venant des rivières va diluer l'eau salée venant de la mer formant ainsi de l'eau saumâtre (Michael Forsberg, 2018; Trama et al., 2009). La flore des milieux saumâtres est plus riche que celle des eaux salées car les variétés d'eau douce et d'eau salée y poussent. Les espèces les plus connues se développant dans ces milieux sont les quenouilles et les sawgrass (Michael Forsberg, 2018).

Ces zones humides sont des écosystèmes importants tout au long de l'année pour de nombreuses espèces animales et végétales. Elles offrent par exemple un abri pour de nombreux oiseaux et reptiles menacés d'extinction. En effet, ces zones humides côtières sont importantes pour le maintien et la sauvegarde de grandes populations d'animaux sauvages côtiers qui voient leurs populations en déclin et en danger d'extinction (Perillo et al., 2018).

Situation de *Typha* dans le parc

Le parc abrite une flore riche en diversité comme décrit plus haut, cependant depuis ces dernières années, le parc fait face à l'invasion d'une espèce prédominante : *Typha* (Sasa et al., 2015; Trama et al., 2009, 2009). La cause exacte n'est pas connue mais certaines hypothèses ont été émises. Parmi elles nous pouvons citer l'abandon de l'activité de pâturage du bétail dans la zone humide, cette activité était autrefois importante au sein du parc et permettait d'entretenir la couverture végétale et de laisser une surface d'eau libre. Une autre hypothèse est le développement d'infrastructures (canaux d'irrigation) et l'augmentation de l'agriculture qui perturbent le cycle hydrique du parc menant à des conséquences comme la salinisation des eaux et des sols et l'augmentation de la concentration en phosphore (*Alliance SIDALC*, s. d.; Jimenez, 2001; Varnell et al., 2010).

La prolifération de *T. domingensis* crée des problèmes pour le parc. En couvrant de grande surface, elle empêche la croissance et le développement des autres plantes. Elle recouvre également l'eau libre de la zone humide cela entraîne l'évitement de l'arrêt des oiseaux migrateurs au sein du parc (Varnell et al., 2010).

Peu d'études ont été menées pour quantifier la présence de *Typha* et identifier précisément les sites de la zone humide du parc où elle est abondante. En 2019, Francois Toussaint a cependant cartographié *Typha* à l'aide de l'indice de végétation amélioré (EVI). La carte obtenue (Figure 3-2) indique la présence probable de *Typha* (zones rouges) durant la saison sèche de 2019.

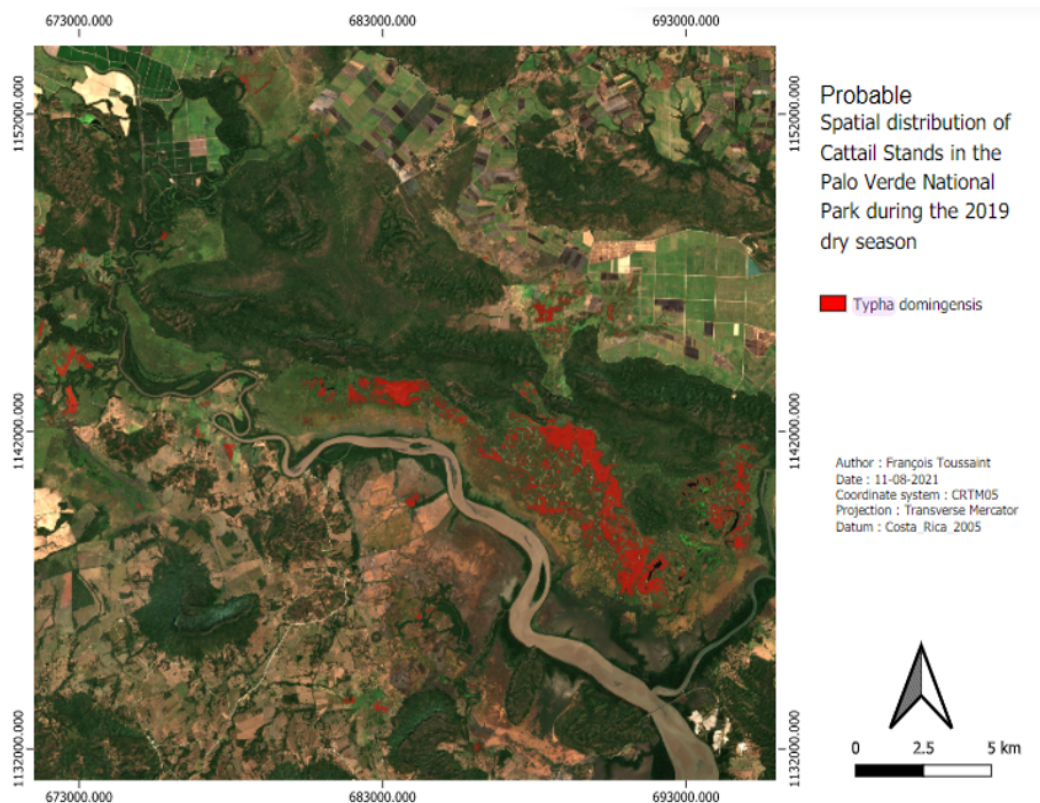


Figure 3 - 2 : Carte du parc National Palo Verde représentant la dispersion de *Typha domingensis* (points rouges) durant la saison sèche de 2019 (Carte réalisé par Toussaint F., 2021).

Les lagunes

La zone humide du parc est divisée en sept lagunes (Sub-wetland) nommées : Poza Verde, Varillal, Piedra Blanca (appelé plus souvent Chamorro de par le nom de la station), Palo Verde, Nicaragua et La Bocana (Figure 3-3). Pour chaque lagune, des piézomètres ont été placés afin de relever des mesures sur les niveaux d'eau. Le suivi de ces six lagunes est réalisé par l'OTS (*The Organization for Tropical Studies*). L'OTS possède une station de recherche dans la lagune Palo Verde au même niveau que la station météorologique.

La zone humide est divisée en six zones distinctes. Cette séparation a été mise en place afin de désigner des zones plus précisément et de mieux diriger les gardes forestiers. Le parc était alors principalement utilisé pour le pâturage du bétail. Ensuite, les lagunes ont été plus précisément délimitées en se référant aux différentes limites naturelles des zones.

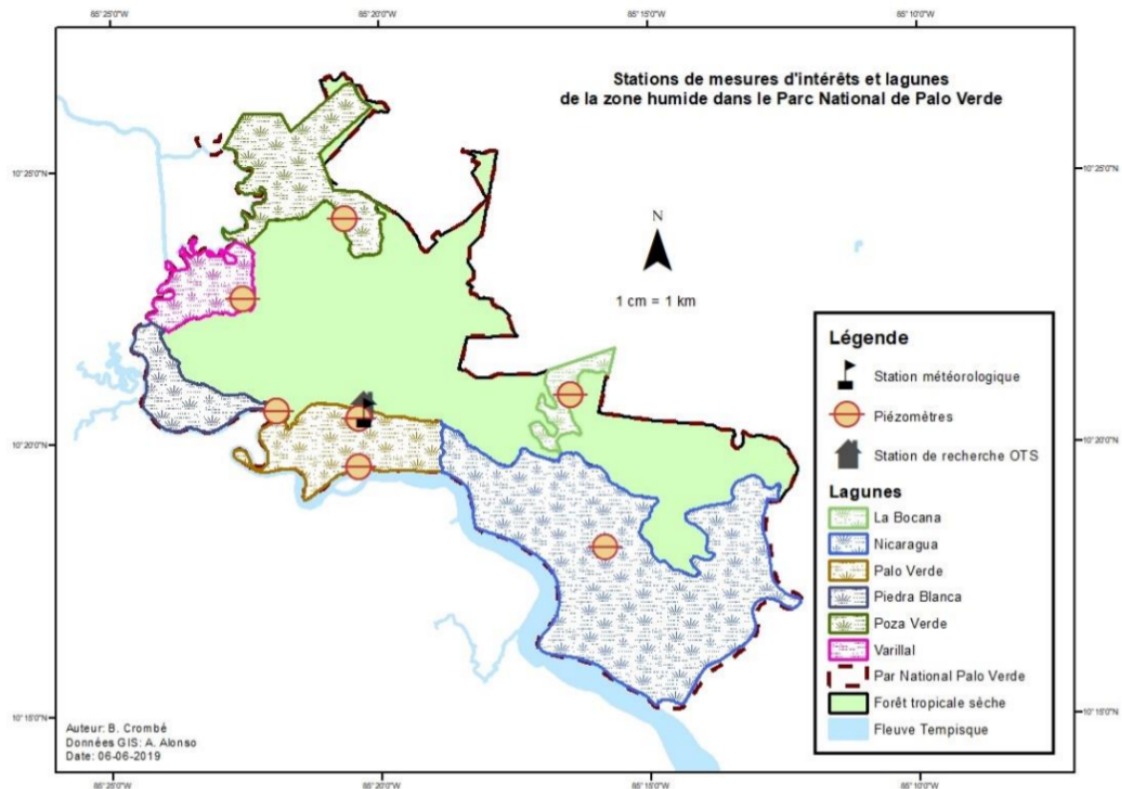


Figure 3 - 3 : Parc National de Palo Verde et sa zone humide divisée en six lagunes (Sub-Wetland) : Poza Verde, Varillal, Piedra Blanca, Palo Verde, Nicaragua et La Bocana. Position des piézomètres, de la station de recherche OTS et de la station météorologique (Ledeganck, 2019).

3.2 Etat hydrologique du parc

Le parc présente un régime hydrologique variable dans le temps mais également dans l'espace. Cela s'explique par la topographie différente des zones du parc et de leurs différentes sources d'eau. En effet, le parc est entouré par la rivière Tempisque, des canaux d'irrigation et une forêt sèche (Figure 3-4). Les précédentes études sur l'hydropériode ont permis de déduire que le parc présente une succession de saison sèches et humides. En d'autres termes, la zone humide est soumise au cycle des saisons durant lequel il est submergé d'eau durant la saison humide puis s'assèche petit à petit pendant la saison sèche (Mitsch & Gosselink, 2015). Le parc présente aussi une hétérogénéité particulière au niveau des eaux souterraines. Il y a parfois un découplage entre les nappes et les eaux de surface. Etroitement liée au cycle des marées car situé à proximité du golfe, les lagunes sont

régulièrement inondées à cause des débordements des berges atteignant près de 100 mètres à l'intérieures des terres.

De plus, les canaux d'irrigations situés en amont du parc influencent également l'hydrologie par la l'infiltration de produits chimiques au sein même du parc.

Le parc a donc des interactions étroites avec différentes sources d'eau externes se situant autour du parc. Il est important d'apporter plus d'information et de connaissance sur les modèles saisonniers et les mécanismes hydrologiques existant entre les lagunes afin de prendre des décisions de gestions de la zone humide du parc.

Les inondations dues aux débordements de la berge venant de la rivière Tempisque, bordant la zone humide du parc (Figure 3-4), sont habituelles pour les zones humides côtière. Cependant, l'étude mené par Alice Alonso en 2017, montre que la rivière ne joue plus son rôle de protection contre les inondations, du fait de la diminution de son débit. Le phénomène d'inondation est très sensible aux petits changements dans la dynamique des eaux de la rivière. Les inondations plus intenses et plus fortes engendrent un déséquilibre dans l'hydrologie du parc, ce déséquilibre est dû a la diminution du débit de la rivière qui découle elle-même indirectement de l'installation des nouvelles infrastructures et canaux d'irrigations.

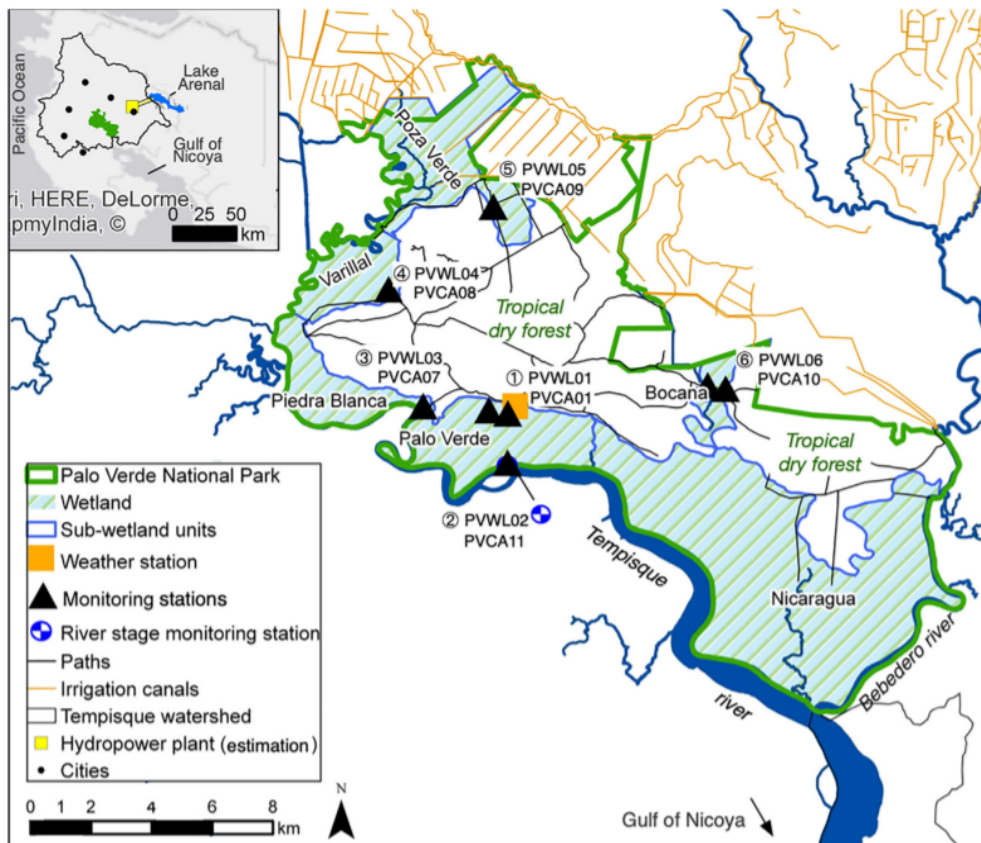


Figure 3 - 4 : Parc National de Palo Verde et sa zone humide divisée en six lagunes (Sub-Wetland) : Poza Verde, Varillal, Piedra Blanca, Palo Verde, Nicaragua et Bocana. Position des stations de surveillance du parc et de la station météorologique. L'encadré en haut à droite représente le bassin versant dans lequel se situe le parc avec la localisation du lac Arenal et du golfe Nicoya.

3.3 Etat de salinité du parc

Comme mentionné précédemment, l'intensification agricole et la mise en place d'un réseau d'irrigation ces dernières décennies ont mené le parc à faire face à des modifications hydrologiques importantes. Plusieurs études ont montré les conséquences que pouvaient avoir de telles modifications dans le système hydrique menant par exemple à l'intrusion et l'augmentation de la salinité (Alonso, 2017; Kaplan & Muñoz-Carpena, 2014; van Rijn, 2011).

Le lac Arenal en particulier (Figure 3-4) a subi ces installations et est surexploité. De plus l'utilisation des terres n'est pas appropriée. L'extraction des matériaux de construction engendre une sédimentation dans les canaux d'irrigations et donc un mauvais drainage du sol (Lévy et al., 1992).

Les sols ont été dégradés par l'érosion à long terme. De plus, l'augmentation du nombre

d'inondations et l'ampleur importante de ces inondations ont de forte chance d'augmenter le niveau de salinité des sols et des eaux de la zone humide. Les eaux venant du golfe vont recouvrir les lagunes durant les marées hautes essentiellement durant le mois de février et mars et donc contribuer à l'augmentation de la salinité du milieu (Lévy et al., 1992). Ainsi, le phénomène de salinité est étroitement lié aux changements de l'hydropériode du parc (Alonso, 2017).

Etudier la dynamique de salinité et trouver ses principales sources permet d'amener de nouvelles pistes de réflexions quant à la gestion et la préservation de la zone humide et de son écosystème.

4. HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS

L'objectif principal de ce travail est d'apporter une meilleure compréhension de la dynamique de la salinité des eaux et des sols dans la zone humide de Palo Verde (Costa Rica) et d'étudier son lien avec la plante invasive *Typha domingensis*. En d'autres termes, le but est d'établir un bilan de la salinité au sein de chaque lagune sur bases d'hypothèses quant à leurs sources principales et d'observer la corrélation potentielle avec la répartition de *Typha*.

Cet objectif principal se traduit en trois sous-objectifs :

1. Analyser les séries temporelles de niveaux d'eau de surface et de nappe du Parc National Palo Verde afin de mieux comprendre la dynamique et l'origine des eaux par lagune.
2. Analyser les séries temporelles d'électroconductivité et leur variabilité spatiale afin d'en déduire les sources de salinité plausibles au sein de la zone humide de Palo verde.
3. Cartographier la distribution de *Typha* et comparer cette distribution avec la répartition de la salinité dans la zone humide du parc.

Ce travail vise à mieux comprendre la dynamique de salinisation dans la zone humide de Palo Verde et d'avancer plusieurs hypothèses et pistes de réflexion quant à l'origine de la salinité et sa corrélation avec l'espèce invasive *Typha domingensis*.

Dans le cadre de ce travail, trois hypothèses ont été émises en vue d'être vérifiées :

1. Les bilans hydrologiques et de salinités différent d'une lagune à l'autre.
2. La salinité des eaux de surface et de nappe des lagunes dépend principalement de leur proximité avec le Golfe, la rivière et le réseau d'irrigation.
3. La distribution spatiale de *Typha domingensis* est corrélée à la distribution spatiale de la salinité.

5. MATÉRIELS ET MÉTHODES

5.1. Base de données

5.1.1. Dispositif expérimental

Stations de mesure

Le parc National dispose de plusieurs stations de mesure et de surveillance disposées dans chacune des six lagunes de la zone humide. Ces stations ont été installées en 2003 par le docteur Julio Calvo. Une dizaine d'années plus tard, le système a été amélioré et complété par l'OTS et l'UF (Université de Floride) (Alonso, 2017). Ce travail utilise les données fournies par ce nouveau système à partir de 2013. Les stations récoltent des données sur l'humidité du sol (à l'aide de deux sondes), les précipitations, le niveau des eaux de surface, le niveau des eaux souterraines et l'électroconductivité. Chaque station est équipée de deux sondes pour mesurer l'humidité du sol et des piézomètres pour mesurer le niveau d'eau souterraine et de surface. Une station a été construite dans chaque lagune et une station a été établie au niveau de la rivière Tempisque. La figure 5-1 montre la position des différents piézomètres, de la base de recherche OTS ainsi que des stations météorologiques. Sur cette même figure nous pouvons voir la délimitation des six lagunes.



Figure 5 - 1 : Position des piézomètres, la station météorologique (losange noir) et la station OTS (maison rouge) et les six lagunes du la zone humide de Palo verde (Alonso, 2017).

Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons aux stations de mesure qui portent le nom des six lagunes du parc : Poza Verde, Varillal, Chamorro (pour la lagune de Piedra Blanca), Palo Verde, Nicaragua et La Bocana.

Piézomètres

Les piézomètres sont équipés de capteurs fixés à un câble pouvant descendre à près de 3 mètres de profondeur. La colonne d'eau exerce une pression sur les capteurs, la mesure est ensuite corrigée pour prendre en compte les faibles fluctuations de la pression atmosphérique. Cette dernière est mesurée par un baromètre placé dans la station météorologique. Les mesures récoltées sont ensuite converties en niveau d'eau. Les installations des piézomètres ont été réalisées par un organisme japonais qui a, dans un premier temps, réalisé un relevé topographique de chaque lagune afin de connaître la hauteur du sol par rapport à un niveau de référence choisi (*datum*). Cependant, la station Poza Verde était inaccessible lors de la première campagne d'installation des piézomètres. Elle est la seule station mentionnée dans ce travail, qui ne possède pas le même *datum* de référence. Le piézomètre est dit sec lorsque l'eau se situe sous le capteur.

Comme nous montre la Figure 5-2, un piézomètre standard est formé d'une base bétonnée mesurant 80 centimètres en hauteur (I-E) dans laquelle nous retrouvons un tube en PVC (H-W). Ce tube, en dépassant de quelques centimètres la base en béton, va permettre d'héberger le dispositif de mesure, c'est-à-dire la câble et le capteur. Le câble est attaché au niveau du couvercle du piézomètre grâce à un anneau en métal (F) (Crombé, 2019).

Les paramètres des appareils peuvent être sujets à des perturbations qui affectent les mesures. Ces perturbations sont principalement dues aux caractéristiques du sol, en l'occurrence un vertisol qui gonfle en saison humide et se rétracte en saison sèche. Pour y pallier tous les paramètres de construction sont soigneusement mesurés. Chaque année un contrôle doit être réalisé sur les dimensions, les décalages sont alors pris en compte en ajustant les mesures. La hauteur de la colonne d'eau mesurée par le capteur doit être convertie en hauteur par rapport au niveau de référence et cette démarche est nécessaire pour obtenir des mesures fiables.

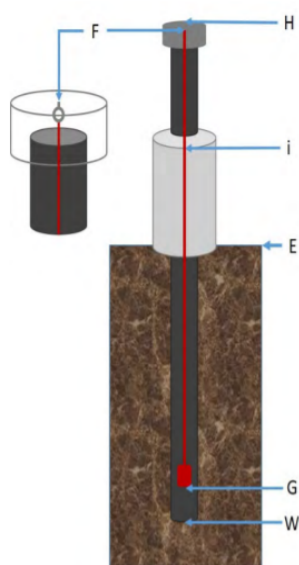


Figure 5 - 2 : Représentation schématique d'un piézomètre présent au sein du Parc National Palo verde (Crombé, 2019).

Mesures météorologiques

Le parc dispose d'une station météorologique qui est gérée par l'OTS. Cette station, située au niveau de la station de mesure Palo Verde, produit des données d'humidité relative (HR), de température de

l'air (T), de précipitations, de pression atmosphérique ainsi que de rayonnement solaire. Elles sont prétraitées et répertoriées via un système d'acquisition de mesures CR1000 Campbell Scientific.

Comme le montre la Figure 5-1, la zone humide est divisée en 6 lagunes qui sont chacune équipées d'une station de surveillance. Cette même carte nous montre également la position de la station météorologique des piézomètres et de la station de recherche de l'OTS. Cette dernière a été mise en place par l'OTS elle-même permettant aux chercheurs effectuant une étude sur place de se loger au sein même du parc.

Accessibilité des données

Les stations de mesure enregistrent les données toutes les 15 minutes, nous disposons ainsi d'une série temporelle des niveaux des eaux de surface et souterraines et de leur électroconductivité. Les données relevées par les stations sont enregistrées en ligne sur la plateforme UF-HydroBase supervisée par le Dr Rafael Muñoz-Carpena qui travaille dans le département de l'ingénierie agricole et biologique de l'Université en Floride UF. Sur cette plateforme, nous retrouvons les relevés des niveaux d'eau et des données sur les précipitations.

5.1.2. Pré-traitement des données

Pour l'analyse temporelle, nous nous sommes concentrés sur les six stations de mesure nommées Palo Verde, Poza Verde, Varillal, La Bocana, Chamorro, et Tempisque. La dernière station, Nicaragua, ne produit cependant aucune donnée et ne sera donc pas présentée lors de la visualisation et l'interprétation des données de réseau. Le traitement des données a été réalisé sur le logiciel RStudio®. Les données brutes, qui nous sont fournies dans un format csv, sont traitées pour obtenir une nouvelle base de données nettoyée et adaptée à l'analyse. Les variations les plus intéressantes sont étudiées en vue d'une meilleure compréhension de la dynamique hydrologique du parc.

ggplot2

Nous avons importé les données csv de WTE (Water Table Elevation) et SWE (Surface Water Elevation) et les avons rassemblées dans deux grandes tables principales. Chaque ligne d'un tableau contient une

observation de wte ou swe, température, et électroconductivité, ainsi que la station de mesure, le timestamp de la mesure, le mois et la saison correspondante (humide ou sèche).

Les dates présentaient des formats irréguliers selon les sources et une dizaine d'entre elles présentaient un format ambigu. Etant donné qu'elles ne présentaient qu'une faible part des données, nous les avons supprimées.

Nous observons une quantité importante de données manquantes pour les EC. Afin de mieux visualiser les données disponibles, nous les présentons sous forme d'histogrammes qui décomptent les mesures non manquantes par période fixe. Ces visualisations nous informent sur la distribution dans le temps des données non manquantes de salinité (ec), pour la base de données WTE et SWE (Figure 5-3). Pour la base de données de SWE seules quatre stations présentent des données d'EC.

Nous avons commencé par visualiser les hauteurs d'eaux de la nappe et de surface en fonction du temps sur toutes les années à disposition allant de 2013 à 2019. Pour ce faire, nous utilisons le package *ggplot2* qui est un outil R de visualisation de données présentant une grande flexibilité via sa fonction principale *ggplot*. Nous utiliserons plusieurs types de visualisations : des courbes via la fonction *geom_line*, des boîtes à moustaches via la fonction *geom_boxplot*, des densités de distribution via la fonction *geom_violin*. Ces outils nous permettent de résumer la quantité importante de données à notre disposition en un nombre limité des graphiques, en comparant aisément les stations entre elles. Cette visualisation permet ainsi d'avoir une vue d'ensemble sur la dynamique de toutes les données des années disponibles pour chaque station (Figure 5-4 et Figure 5-5).

Dans la base de données, certaines valeurs marquées « discutables » ont été conservées, cependant une attention particulière doit leur être portée lors de leur interprétation. D'autres données n'ont pas été enregistrées lorsque la nappe se situait sous le capteur.

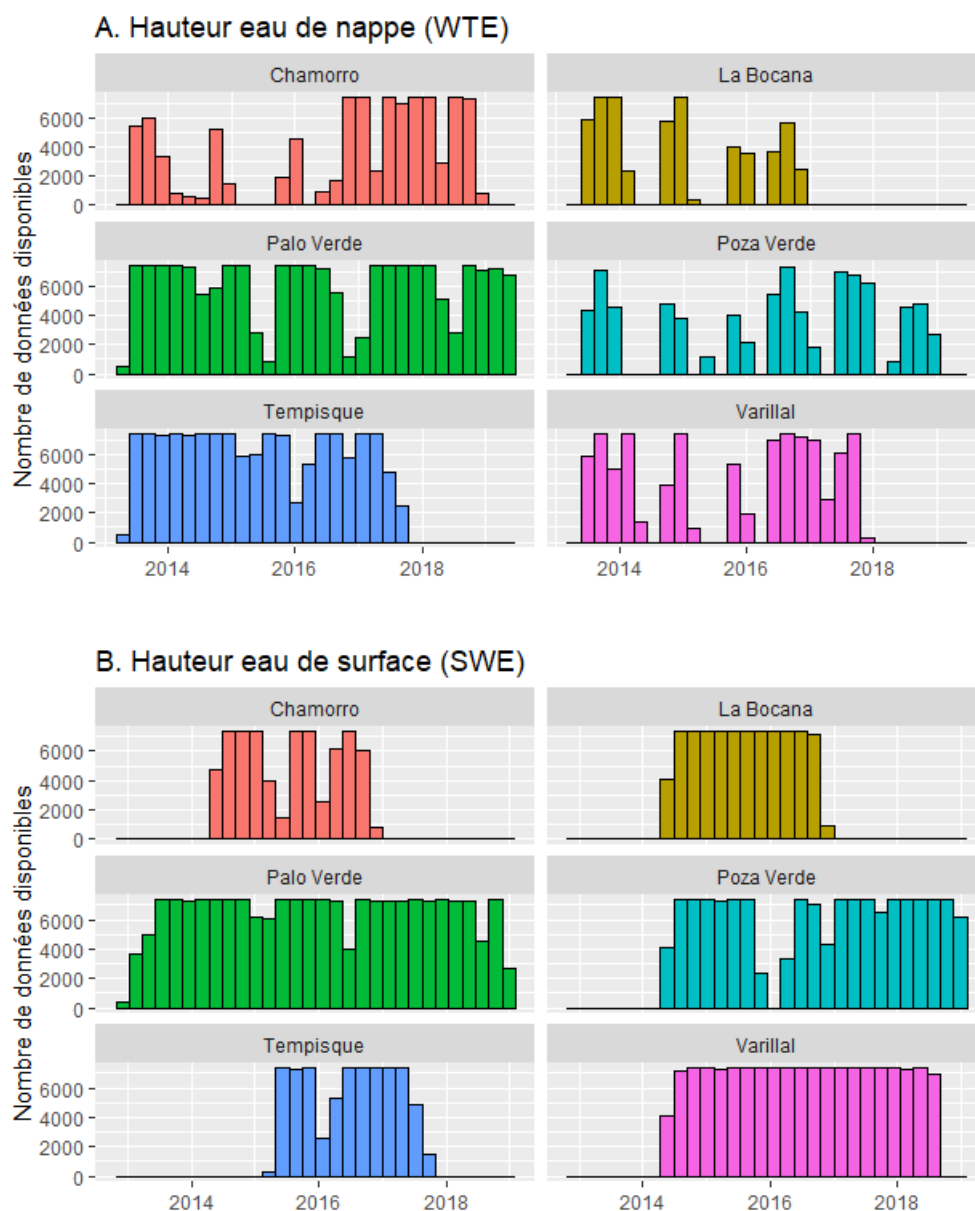


Figure 5 - 3 : Histogrammes des données disponibles pour la hauteur des eaux de la nappe (WTE) (A) et la hauteur des eaux de surface (SWE) (B).

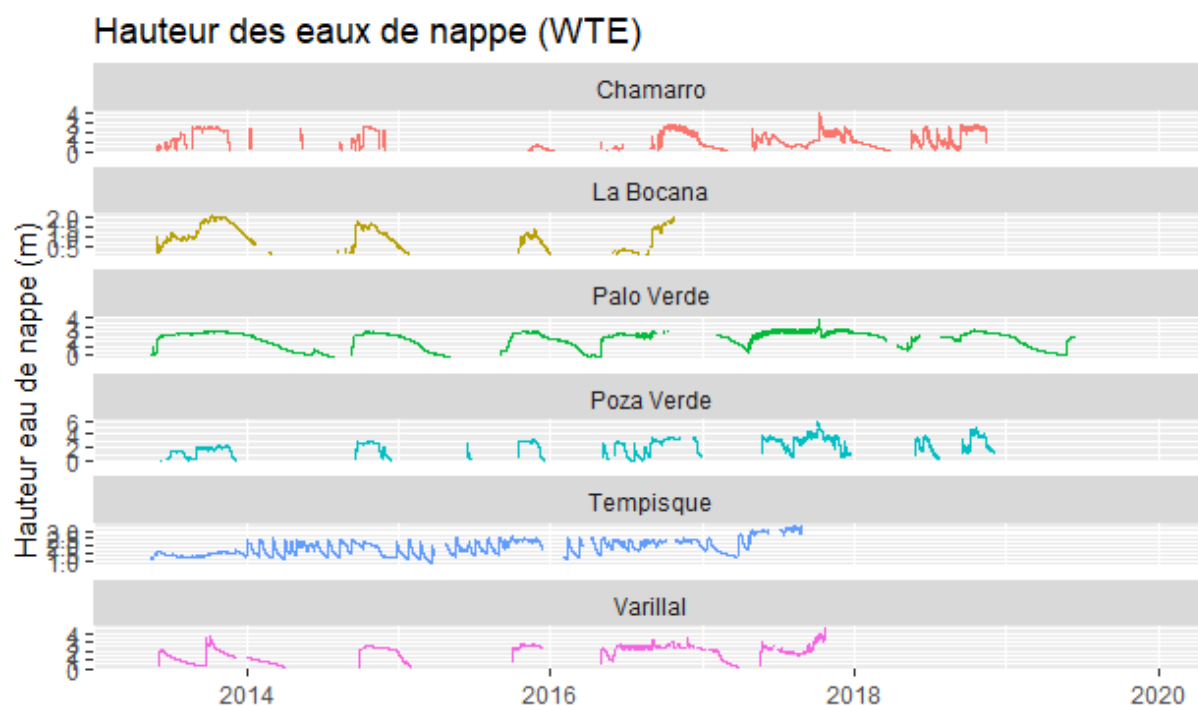


Figure 5 - 4 : Evolution de la hauteur d'eau de la nappe pour les stations Chamorro, La Bocana, Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal. Le 0 correspond au niveau référence (datum).

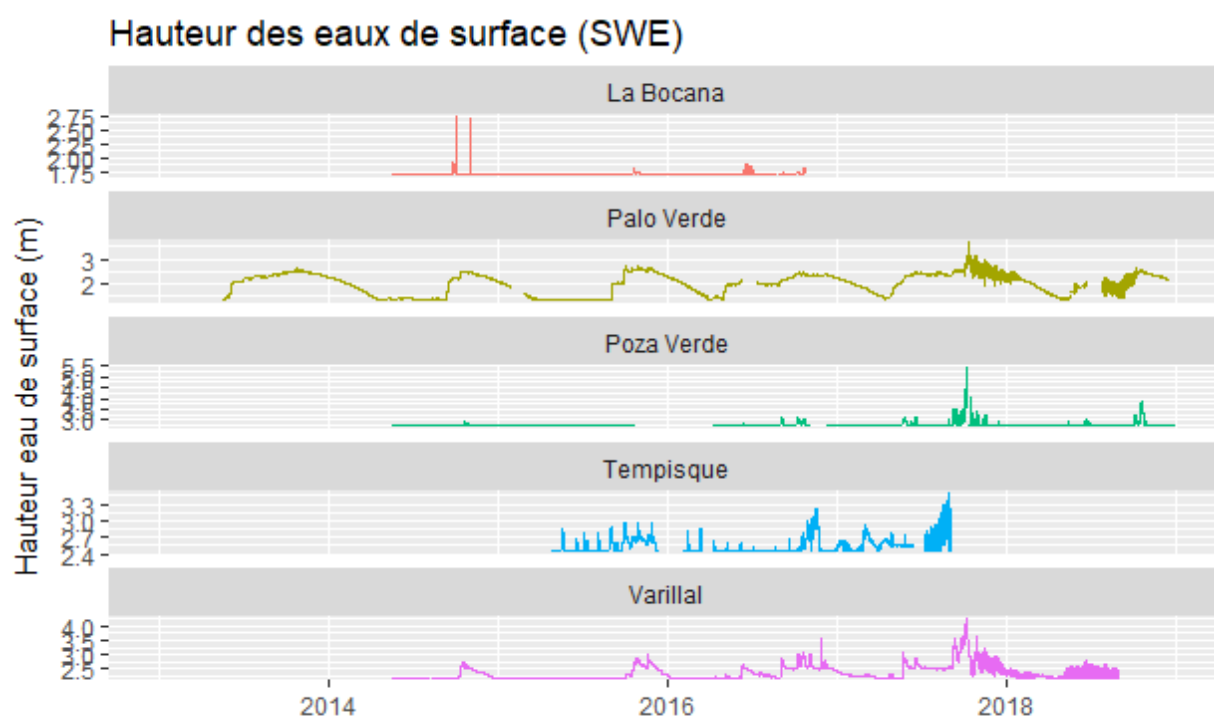


Figure 5 - 5 : Evolution de la hauteur d'eau de surface pour les stations Palo Verde, Poza Verde, Tempisque, La Bocana et Varillal. Le niveau du sol par rapport au niveau de référence (datum) des stations Palo Verde, Poza Verde, La Bocana, Tempisque et Varillal est de 1.866, 2.8, 1.679, 2.437 et 2.379 m respectivement.

Nous procédons de la même manière pour visualiser les données d'électroconductivité (EC) des eaux de surface et de la nappe (Figure 5-6 et Figure 5-7). Notons qu'en conséquence d'un dysfonctionnement de l'appareillage qui n'a jamais été rétabli, la station La Bocana ne présente aucune donnée sur la conductivité électrique. Seules les stations Poza verde, Palo Verde, Varillal et Tempisque présentent des données sur l'électroconductivité des eaux. Le relevé des données de l'électroconductivité n'a

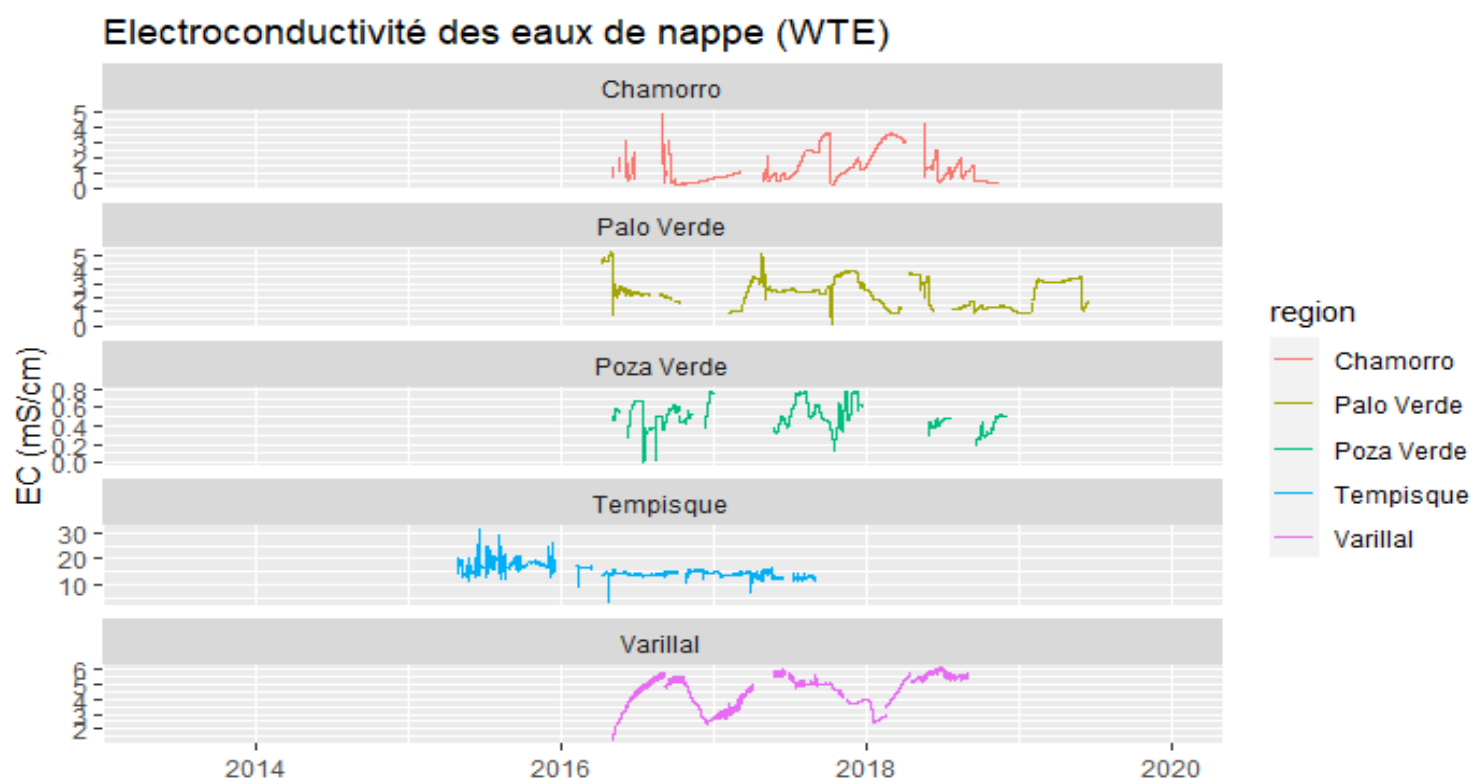


Figure 5 - 6 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de nappe pour les stations Chamorro, Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal.

commencé qu'à partir de 2015.

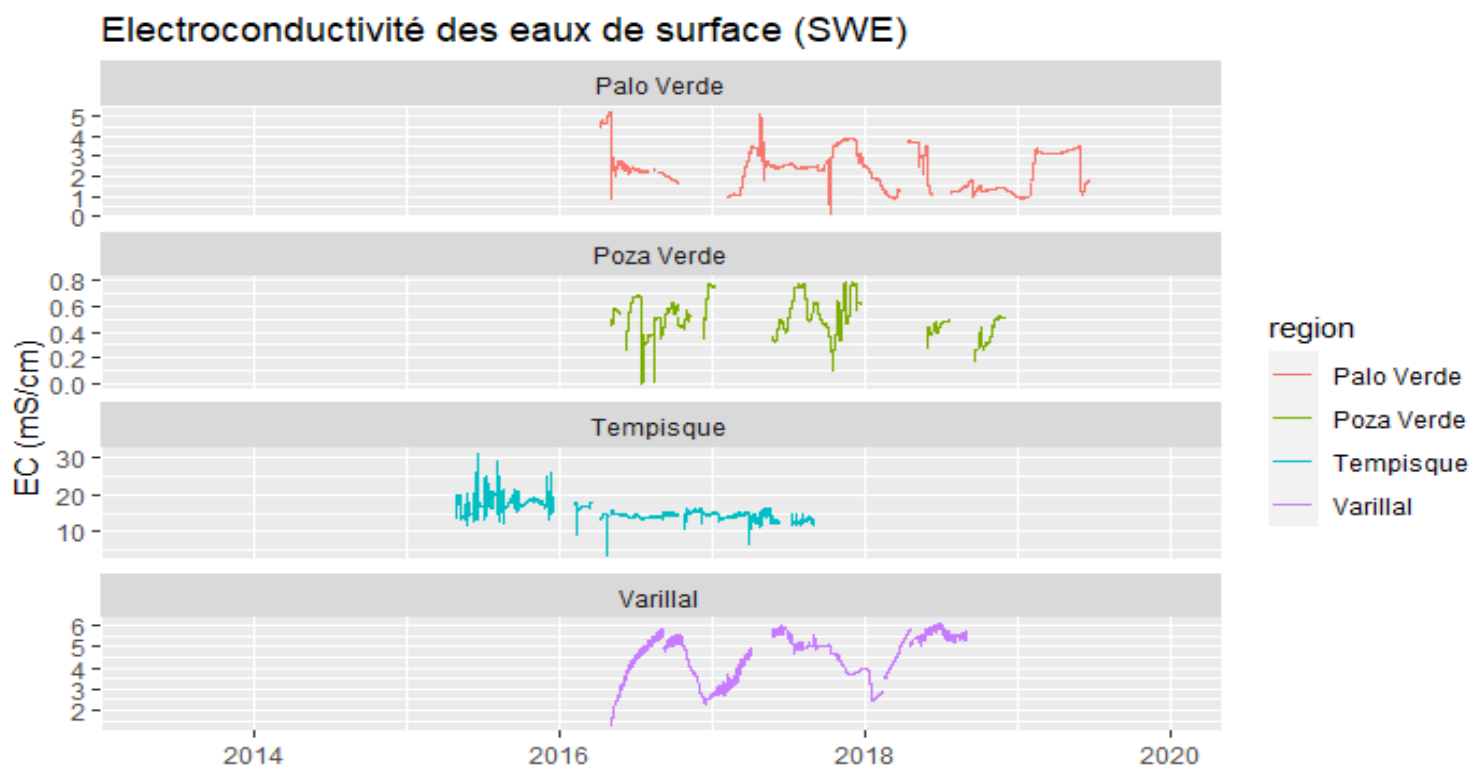


Figure 5 - 7 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de surface pour les stations Palo Verde, Poza Verde, Tempisque et Varillal.

Analyse de Fourier

L'analyse de Fourier, permet de faire ressortir les cycles dominants des phénomènes périodiques et de les représenter succinctement. Il est intéressant de l'utiliser pour identifier des cycles potentiels du niveau des eaux de surface et de la nappe. L'analyse de Fourier, du nom du physicien Joseph Fourier, est une méthode qui permet de décomposer un signal complexe en une somme de fonctions élémentaires. C'est-à-dire que toute fonction $f(x)$ peut être représentée comme une somme ou une série de fonctions sinusoïdales. Cette méthode a permis de simplifier les calculs car les équations considérées sont alors linéaires. Ainsi, la fonction inconnue f sera du premier degré. En effet, une façon d'envisager l'analyse spectrale est de la voir comme un problème de régression multiple linéaire dans

lequel la variable dépendante est la série temporelle et les variables indépendantes sont les fonctions sinusoïdales des fréquences possibles.

La transformée de Fourier (TF) nous permet de passer d'une série temporelle du signal (série de Fourier) à une représentation fréquentielle de cette série temporelle (Transformée de Fourier) (Keller, 2008; Körner, 1989). En d'autres termes, la transformée de Fourier va permettre de décomposer un signal en plusieurs fréquences qui le composent.

Nous utilisons RStudio® pour calculer les transformées de Fourier de nos cycles et représenter leurs périodogrammes (ANNEXE B). Ces derniers quantifient les contributions des fréquences individuelles à la régression de la série temporelle (Keller, 2008). En d'autres termes, il nous montre la « puissance » pour chaque cycle probable que la TF a mesuré. Les valeurs de ce périodogramme peuvent être vues en termes de variance des données à la fréquence respective. Dans le périodogramme, les cycles seront représentés par des pics comme représenté à la Figure 5-8 pour le cas de la station Varillal sur les eaux de nappe. Les pics seront plus importants pour les cycles principaux et des pics plus petits pour les cycles secondaires. Même si nous avons introduit le périodogramme comme une régression linéaire multiple, les calculs émis par RStudio® sont réalisés avec l'algorithme de la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

Nous présentons les périodogrammes sur la durée maximale, une durée de 35 jours, et une durée de 2 jours pour observer les saisonnalités à l'échelle quotidienne, mensuelle et annuelle. On prend le parti de présenter le périodogramme en fonction des périodes plutôt que des fréquences, pour une interprétation plus intuitive. Pour chaque analyse, nous sauvons les périodes pour lesquelles nous la densité spectrale atteint des maxima locaux. Parmi elles nous ne gardons que les maxima globaux successifs, c'est à dire que nous ignorons les maxima locaux déjà atteints pour des périodes plus faibles. Ces valeurs sont les périodes candidates auxquelles on pourrait associer une origine cyclique telle que les saisons ou les marées. On effectue d'abord une analyse de Fourier "brute", sur la durée entière des données, en extrapolant pour peupler les données manquantes, puis une analyse sélective sur des données plus propres choisies manuellement.

Dans ce travail, l'analyse de Fourier a permis de mettre en évidence les cycles les plus importants pour les différentes stations.

Ci-dessous, nous présentons un tableau récapitulatif des analyses brutes. Les périodes qui ressortent faiblement sont ignorées, celles qui ressortent moyennement sont entre parenthèses. La catégorisation est manuelle :

Tableau 5 - 1 : Cycles des stations de mesure, en jours, à partir des données interpolées du réseau de donnée. Les chiffres se trouvant entre parenthèses montrent une incertitude quant à la présence d'un cycle (cycle secondaire).

Localisation	Hauteur d'eau	Conductivité
Tempisque	0.5, (29), (395)	19, (78)
Varillal	1, 0.5, (400)	1
Palo Verde	1, 0.5	(21), (33)
Chamarro	1, 0.5, (15), (29)	pas de saisonnalité
Poza Verde	1, 289, 0.5	pas de saisonnalité
La Bocana	0.5	pas de données

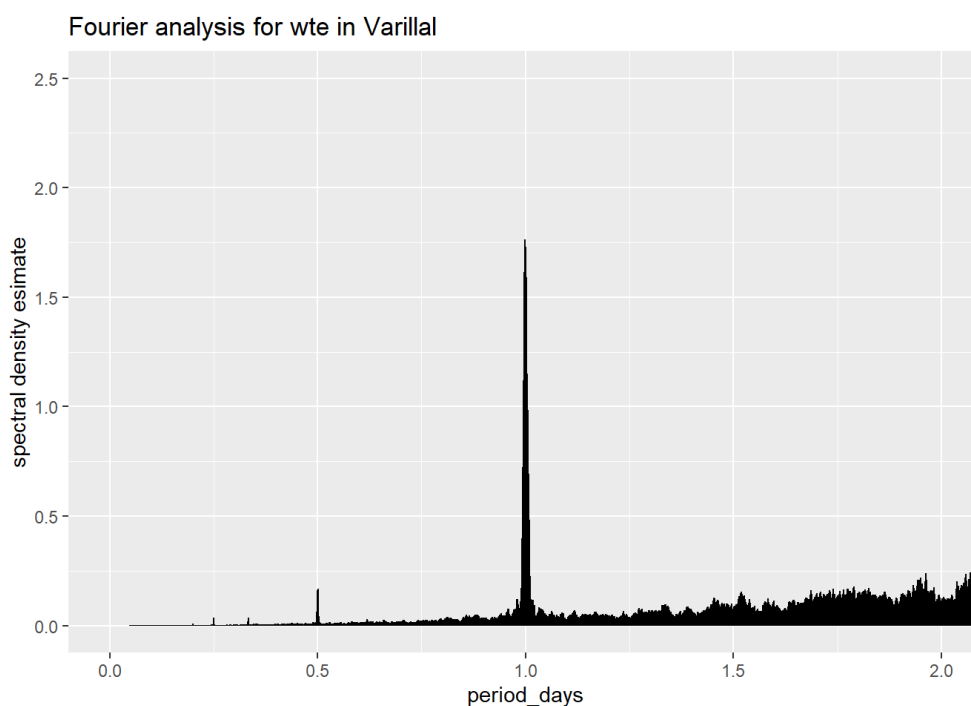


Figure 5 - 8 : Periodogramme de la station Varillal pour les données des hauteurs des eaux de nappe.

Test de Mann et Whitney

Dans notre étude, nous aurons besoins de tester statistiquement si les tendances centrales (médiane des Boxplot) des lagunes sont différentes les unes des autres et ainsi de vérifier l'hétérogénéité de

chaque lagune. Cela nous permettra de tester l'hypothèse qu'une lagune présente un comportement similaire aux autres lagunes concernant la dynamique de salinisation des eaux du sol.

Le test de Mann et Whitney est un test statistique qui permet de comparer deux groupes avec une seule variable continue sans faire d'hypothèse sur sa distribution (Mann & Whitney, 1947; Woolson, 2008). Nous parlons alors de test non paramétrique. Ce test nécessite deux groupes d'échantillons indépendants et évalue la probabilité (p-valeur) d'obtenir une différence plus extrême que celle que nos mesures montrent si les échantillons provenaient d'une même population. Plus cette valeur est faible et plus il est probable que les échantillons viennent de distributions distinctes, et donc que les lagunes aient une dynamique de salinité distincte. Le test de Mann et Whitney est préféré au test t lorsque les données ne peuvent pas répondre aux différentes hypothèses paramétriques du test t.

C'est un test qui n'utilise pas directement les valeurs brutes mais leur rang, correspondant à l'ordre dans lequel se présente les observations des deux échantillons après avoir été réunis et triés. Le test vérifie l'hypothèse H_0 :

H_0 : les deux groupes appartiennent à la même population

H_1 : Les deux groupes sont issus de deux populations distinctes

Pour réaliser ce test, nous utiliserons la commande R `wilcox.test(y~x, data)`. Nous en tirons les p-valeurs qui permettent de vérifier ou rejeter l'hypothèse H_0 selon laquelle les valeurs des deux groupes viennent de la même distribution. Nous comparerons nos p-valeurs à la valeur seuil $\alpha = 0.05$ traditionnellement utilisée en recherche scientifique mais proposerons également une interprétation nuancée.

5.2. Site d'étude

Les mesures et les prélèvements des échantillons d'eau et de sol utilisés dans ce travail ont été réalisés au sein du Parc National de Palo Verde en Costa Rica.

5.2.1. Campagnes de terrain

Trois campagnes de terrain ont été menées en vue de récolter des échantillons et de prendre des mesures d'électroconductivité.

La première campagne de terrain, nommé IDCS, a été réalisée du lundi 13 au lundi 27 septembre 2021. Approximativement chaque jour, une nouvelle zone était exploitée. Le but de la campagne est de quadriller tant que faire se peut la surface des lagunes pour en cartographier la salinité. Pour ce faire, l'électroconductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des sols, des eaux de surface et leur température ($^{\circ}\text{C}$) ont été mesurées à plusieurs profondeurs et à différents points géographiques espacés régulièrement dans les zones accessibles des différentes lagunes du parc. La turbidité de l'eau de surface a également été relevée de façon qualitative en fonction de l'aspect de l'eau. Nous n'avons malheureusement pas pu construire un disque de Secchi avec les outils dont nous disposions sur place. Nous avons déterminé plusieurs catégories d'aspects : boueux, laiteux, rougeâtre, sombre et clair.

La deuxième campagne de terrain, nommée IDT, avait comme objectif de réaliser un transect de mesure de la conductivité électrique des eaux de surface et des sols, perpendiculairement à la rivière. Nous sommes partis du bord de la rivière Tempisque jusqu'au niveau de la station Palo Verde, traversant ainsi toute la lagune de Palo Verde. La campagne IDT a été effectuée le jeudi 23 septembre 2021 au matin. Le transect a une longueur d'approximativement 1.5 km. Une mesure de la conductivité et un échantillon d'eau et de sol ont été réalisés tous les 75 mètres. L'accès au transect ne pouvait pas se faire à pied pour des raisons de sécurité mais également à cause du niveau de l'eau qui parfois pouvait atteindre plus d'1.80 mètres. Pour réaliser le transect, il a donc été préférable se déplacer à cheval.

En chaque point de mesure a été également notée la présence ou non de *Typha*. L'objectif était d'essayer de relever la conductivité électrique en chaque zone dans laquelle nous avions le plus de chance de trouver *Typha*. Malheureusement, les zones avec une densité importante de *Typha* n'étaient pas accessibles durant la période considérée. Aussi, un relevé des types de végétations aquatiques a aussi été pris en compte dans un rayon de dix mètres du point de mesure. Cela permettra d'avoir une première base de données de la répartition et la densité végétale.

Tout point de mesure a été géolocalisé à l'aide d'un GPS portatif digital et photographié grâce à une application mobile « SurveyCam ». La date, l'heure de la mesure, le nom de la lagune et les conditions météorologiques ont également été enregistrés.

La troisième campagne de terrain (IDEt) avait comme objectif d'évaluer l'évolution temporelle de la CE. Pour ce faire, un point d'accès se situant proche de la station OTS a été sélectionné afin de réaliser

des relevés de conductivité électrique de l'eau de surface biquotidiennement. Cela a permis de suivre l'évolution temporelle de EC dans une zone fixe.

5.2.2. Accessibilité des lagunes

En pratique néanmoins les problèmes d'accessibilité et de sécurité restreignent considérablement les zones candidates aux prélèvements. L'accessibilité est limitée par différents facteurs. Souvent ces prélèvements ne sont possibles que sur un chemin large de quelques mètres (Figure 5-9) (chemin sous l'eau). La profondeur de l'eau dépasse souvent 150cm, hauteur au-delà de laquelle il ne nous est plus possible de nous déplacer à pied. Utiliser un bateau est généralement impossible à cause de la densité de végétation. Le cheval est une alternative possible à laquelle nous avons eu recours pour la campagne IDT, il est en effet possible de monter à cheval avec de l'eau jusqu'aux hanches, ce qui permet de traverser des zones de profondeur d'eau supérieure (Figure 5-10). Cette alternative est plus sûre, moins physiquement éprouvante mais demande une organisation élaborée (coordination avec le guide) et son coût limite son utilisation (80 dollars par jour). Certaines zones sont extrêmement boueuses, la hauteur de boue varie de 30 à 40 cm et rend l'avancée pénible (Figure 5-11), limitant la distance parcourable en une journée (les expéditions duraient entre 6 et 8 heures). La traversée des zones denses en végétation est facilitée par l'utilisation de machettes mais leur efficacité est limitée et de nombreuses zones restent impénétrables (Figure 5-12). Les préoccupations de sécurité sont principalement liées aux buffles d'eau et aux crocodiles. Leurs populations sont concentrées dans certaines zones, par exemple la Bocana et Nicaragua sont en majorité inaccessibles de par leur grande concentration en crocodiles, tandis que Pozza Verde, Chamorro, et Varillal n'en abritent quasiment pas.



Figure 5 - 9 : Poza Verde, Chemin « facile », la végétation est modérée et l'eau arrive au niveau de la poitrine (+/- 1.30m)



Figure 5 - 10 : Transect, traversée de Palo Verde à cheval, l'eau est trop profonde pour se déplacer à pied mais la végétation est trop abondante pour se déplacer en bateau. Le cheval apporte de plus une sécurité supplémentaire.



Figure 5 - 11 : Nicaragua, La boue rend les déplacements difficiles et limite la longueur des trajets qu'on peut effectuer en une journée.



Figure 5 - 12 : Chamorro, zone inaccessible, cette densité de végétation rends les déplacements impossibles, les machettes ne suffisent pas pour s'y frayer un chemin

5.2.3. Mode opératoire d'échantillonnage

L'ensemble des échantillons d'eau a été récolté dans des flacons en polyéthylène à col large de 30 ml. L'échantillonnage des eaux de surface a été réalisé en immergeant les flacons à la main à plus ou moins dix centimètres en-dessous de la surface de l'eau. Une fois le flacon rempli, il était ensuite ressorti de l'eau et vidé de son contenu. Cette opération a été réalisée trois fois avant d'obtenir l'échantillon qui sera conservé et rempli à 95 % de sa capacité. Les échantillons d'eau ont été transportés dans une glacière puis ont ensuite été conservés au réfrigérateur à une température comprise entre 4 et 5°C.

L'échantillonnage des sols a été réalisé à une vingtaine de centimètres de la surface. Les échantillons ont été prélevés grâce à une tarière à double pelle (tarière agricole) qui a permis de réaliser des prélèvements sur des zones inondées. Le prélèvement des sols a toujours été fait sur des sols saturés en eaux, c'est-à-dire dans des zones inondées (souvent plus d'un mètre d'eau). L'extraction du sol engendre un mélange avec les eaux de surface. Néanmoins les sols argileux du fait de leur fine granulométrie tendent à conserver l'eau dans leurs pores. L'eau présente dans les échantillons après égouttage est donc essentiellement celle qui s'y trouvait avant l'extraction. Il est donc raisonnable de considérer que le mélange aura peu d'impact sur les résultats de l'analyse des sols.

Les échantillons ont ensuite été placés dans des sacs en plastique fermés hermétiquement après avoir été égouttés le plus possible. Les sols ont été conservés dans un endroit frais et sec.

5.2.4. Localisation de l'échantillonnage

Pour les différentes campagnes de terrain, 100 échantillons de sol et 20 échantillons d'eau ont été collectés (ANNEXE C). Les sols ont été échantillonnés dans les six différentes lagunes du parc : Poza Verde, Palo Verde, Varillal, Chamorro, Nicaragua et La Bocana (Figure 5-13).

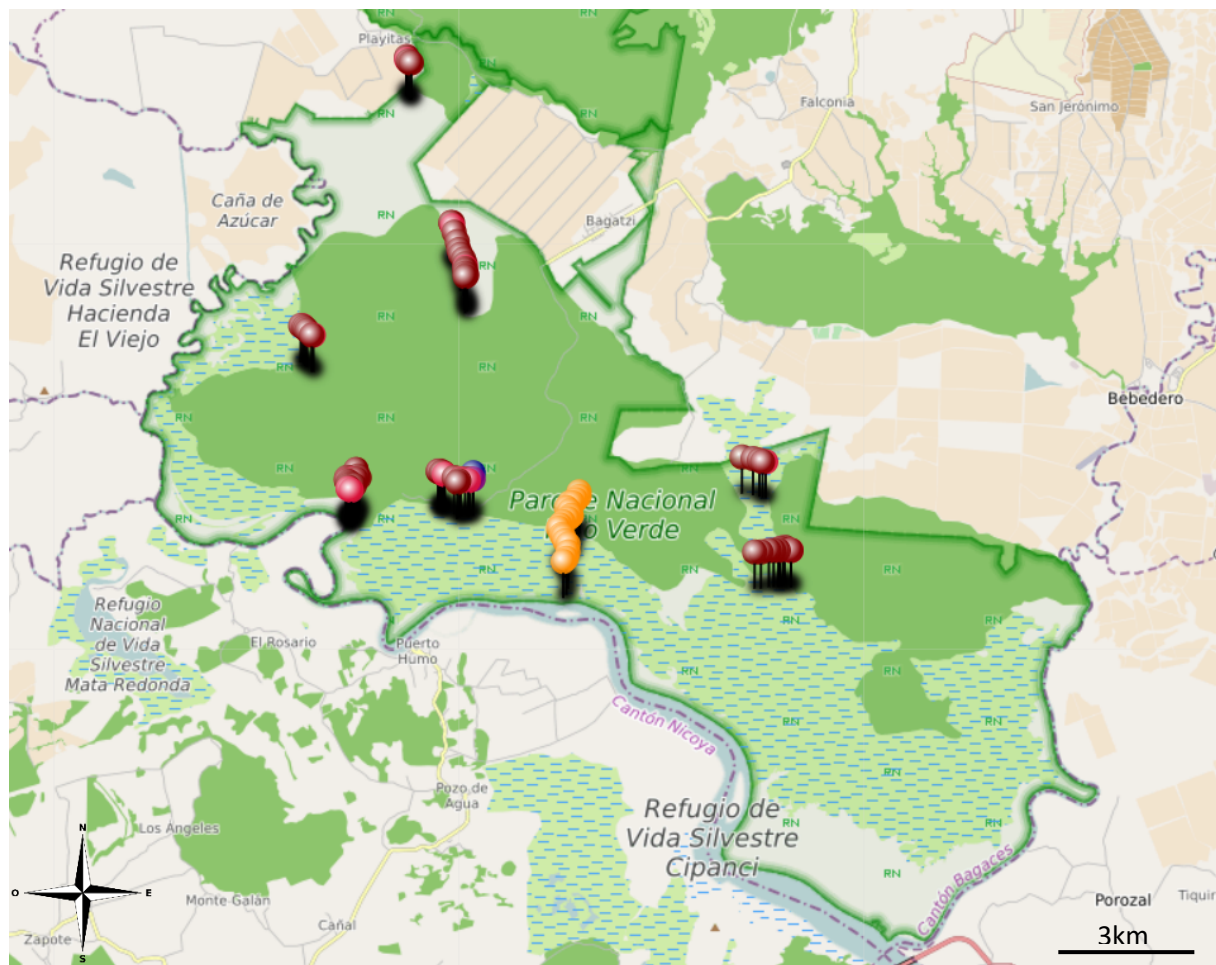


Figure 5 - 13 : Carte de localisation des différents points de mesure de l'électroconductivité des eaux de surface et d'échantillonnage de sol (bordeaux), d'échantillonnage d'eau (rouge clair), de la station OTS (bleu) et du transect (orange) (Parque Nacional Palo Verde - uMap)

Pour la première campagne de terrain IDCS, un maximum d'échantillons et de mesures a été réalisé dans chaque lagune (Tableau 6-1). Le nombre d'échantillons dépendant de l'accessibilité et des conditions des terrains, une couverture spatiale homogène (quadrillage de la surface des lagunes) n'a pas pu être réalisée car la plupart des lagunes présentaient un danger trop important (crocodiles, buffles, ...) ou les niveaux d'eau trop importants. Les points de données sont séparés les uns des autres de 40 à 50 mètres.

Durant la campagne IDT, 20 échantillons de sols et d'eau ont été prélevés. Durant la campagne, les échantillons étaient transportés dans des sacs hermétiques à l'eau.

Durant l'échantillonnage des sols et des eaux des deux campagnes de terrain (IDCS et IDT), la présence de précipitations ou leur occurrence durant la nuit précédente étaient relevées.

La durée des campagnes d'échantillonnage dépendait de la difficulté à parcourir la lagune à pied. Chamorro a pris beaucoup de temps étant donné que son sol était boueux et ralentissait significativement l'avancée.

Tableau 6 - 1 : Localisation, nombre et type d'échantillons collectés pendant la campagne de terrain IDCS (Couverture Spatiale) et IDT (Transect Tempisque-Palo Verde).

Station	Nombre mesures électroconductivité eau surface	Nombre échantillons de sol	Nombre échantillons eau surface
Poza Verde	22	22	4
Varillal	7	7	2
Chamorro	22	22	4
Palo Verde	33	33	2
Nicaragua	11	11	2
La Bocana	5	5	1
	Total : 80	Total : 80	Total : 15

5.2.5. Mesure EC des eaux de surface des campagnes IDCS et IDT

A chaque point de localisation, une mesure de la conductivité électrique et de la température a été réalisée. Cette dernière a été effectuée grâce à un Conductimètre 3310 équipé de la Sonde TetraCon 325/C. La première mesure de conductivité des eaux de surface est prise au niveau du sol puis la sonde est remontée verticalement de 10 centimètres en 10 centimètres afin de prendre les prochaines

mesures. De plus, la présence ou non de *Typha* ainsi que le nom des espèces de plantes environnantes (rayon de 10 mètres) ont également été relevés. L'ensemble des manipulations prenait approximativement 5 à 10 minutes.

Mode opératoire en laboratoire : Analyse EC sur sol

Les échantillons de sols prélevés sont analysés afin de mesurer leur salinité. Cette analyse apporte une information importante sur la dynamique de salinité du parc que la simple analyse des eaux de surface ne fournit pas. En effet, durant la saison humide, les eaux de pluie peuvent fortement diluer les eaux de surface et de ce fait la mesure de leur salinité est moins caractéristique du point de mesure.

Pour réaliser la mesure de la salinité des sols prélevés, nous utilisons la méthode de pâte non-saturée. Cette dernière consiste dans un premier temps à sécher les sols à l'air. Les 100 échantillons de sols ont ainsi été placés dans le Hall Technique de l'UCLouvain durant près de trois semaines. D'autres échantillons, notamment ceux qui présentaient un état 'boueux' plus important, ont été placés durant une quinzaine de jours dans des étuves à une température de 60°C. A cette température, suffisamment élevée pour sécher les échantillons rapidement, aucun élément n'est détruit par la chaleur.

La deuxième étape consiste en le broyage et le tamisage des sols séchés. Le broyage et le tamisage ont été réalisés dans la salle de broyage de l'UCLouvain. Tout d'abord, nous éliminons manuellement les racines, pierres ou feuilles présentes, l'échantillon est ensuite placé au centre de la table de broyage sur du papier Kraft, puis réduit en morceaux à l'aide d'un marteau. Les morceaux de sols sont broyés à l'aide d'une bouteille en verre afin d'obtenir une poudre grossière. Afin d'obtenir une poudre plus fine, le broyat est tamisé à 2mm. Une fois broyés et tamisés, les échantillons sont conservés dans des pots à échantillons à température ambiante et à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse de l'électroconductivité.

Pour déterminer la conductivité électrique des échantillons de sol, nous transférons 5 g de la fraction de sol brut dans un flacon, auquel nous ajoutons 25mL d'eau déminéralisée pour obtenir un rapport entre le poids du sol et l'eau de 1/5. Nous agiterons l'échantillon une quinzaine de secondes toutes les 20 minutes durant une heure. Nous laisserons ensuite reposer le mélange durant une heure. La mesure de la conductivité électrique s'effectuera à l'aide d'un conductimètre de correction de température

réglé à 20°C. Nous ajoutons la sonde du conductimètre dans le mélange afin d'obtenir la mesure de la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le protocole de mesure de l'électroconductivité a été réalisé en suivant les consignes explicitées dans « Qualité du sol – Détermination de la conductivité électrique spécifique (Issep S-II-7V3, 2014) » .

5.2.6. Pré-traitement et méthode d'analyse des données de campagnes

Le traitement des données et la plupart des calculs ont été réalisés via l'environnement de développement RStudio®. Les packages utilisés pour la réalisation de ce travail se trouvent dans en Annexe D.

Données EC sur eaux de surface

Une fois téléchargées, les données de mesures de la conductivité électrique pour les six lagunes sont pré-traitées dans RStudio®. Elles sont constituées d'une matrice de données sur l'électroconductivité de l'eau de surface pour les trois campagnes de terrain (IDCS, IDT et IDEt), sa température, les conditions météorologiques du relevé des données et des coordonnées GPS, ainsi que la date et l'heure de mesure. Une procédure standardisée et automatisée pour les dates et les données a été conçue.

Après l'étape de chargement et de préparation des données, nous avons construit différents boxplots afin d'une part de comparer les valeurs des eaux de surface des différentes lagunes et, d'autre part, de comparer les données récoltées avec les valeurs des séries temporelles.

Lors de la campagne de terrain IDCS, la présence ou non de *Typha* a été relevée dans la zone de mesure (rayon de 15-20 mètres). Pour représenter ces valeurs, nous avons également présenté sous forme de boxplot confrontant l'électroconductivité des eaux de surface montrant la présence de *Typha* et les mesures ne relevant pas la présence de *Typha* dans l'environnement direct.

Données EC sur sol

Les données de l'électroconductivité de la pâte salée sont reprises dans le tableau de l'Annexe E. Les données d'électroconductivité ont été triées par campagne de terrain : Couverture spatiale (IDCS), transect (IDT) et évolution temporelle (IDEt).

Les données de la campagne IDCS sont représentées par un boxplot amélioré, combinant le boxplot traditionnel et les valeurs brutes. La représentation en boxplot permet de résumer la distribution des valeurs tandis que les données brutes nous rappellent la taille limitée des échantillons et nous permettent de ne pas sur-interpréter les boxplots.

Les données de la campagne IDT sont représentées sur un graphique sur lequel l'axe des abscisses représente la longueur du transect de la rivière Tempisque jusqu'aux bords de la station Palo Verde au niveau de la station de mesure Palo verde. Le graphique est construit en utilisant les fonctions ggplot et geom_point, conçues pour visualiser des nuages de points.

6. RESULTATS ET DISCUSSION

6.1. Exploitation de la base de données existante

6.1.1 Bilan conceptuel

L'objet de cette section est l'étude et la compréhension des dynamiques hydrologiques de chaque lagune.

Pour commencer, nous avons établi un bilan conceptuel global du parc (Figure 6-1). Ce bilan a été construit à partir d'hypothèses qui concernent les interactions qu'il existe entre les différentes sources et réservoirs d'eau au sein du parc. Ces hypothèses ont été établies sur base d'études antérieures quant aux origines des eaux du sol, des nappes et de surface (Alonso, 2017; Lévy et al., 1992). Elles sont une première base afin de comprendre les interactions qu'il existe entre les différentes sources (Océan, précipitations, canaux d'irrigation) et réservoirs (Rivière, sol, eaux de surface et eaux souterraines). L'étude de la dynamique des eaux, notamment l'origine des eaux, est une première étape nécessaire pour comprendre la dynamique de la salinité des eaux et des sols.

L'eau du sol peut provenir de la nappe (remontée capillaire) ou de l'eau de surface (infiltration). Les canaux d'irrigations peuvent également contribuer à la recharger des eaux du sol par ruissellement. Les eaux de surface peuvent, provenir des précipitations ou des rivières lors du phénomène de débordement. Enfin, les eaux de nappe peuvent avoir comme origine le drainage de la zone vadose ou l'océan par intrusion saline.

Ce bilan nous permet d'établir de premières hypothèses sur les différentes sources salines. Sur le bilan conceptuel, ces sources salines sont représentées en différents tons d'orange. Lorsqu'une source saline potentielle apporte un taux important de sel, elle sera représentée en un ton plus foncé (canaux d'irrigation et océan) tandis que les sources potentielles amenant un taux moins important de sel seront représentées par un orange plus clair (rivière et eaux souterraines). Les eaux de surface sont considérées comme une source de salinité minime.

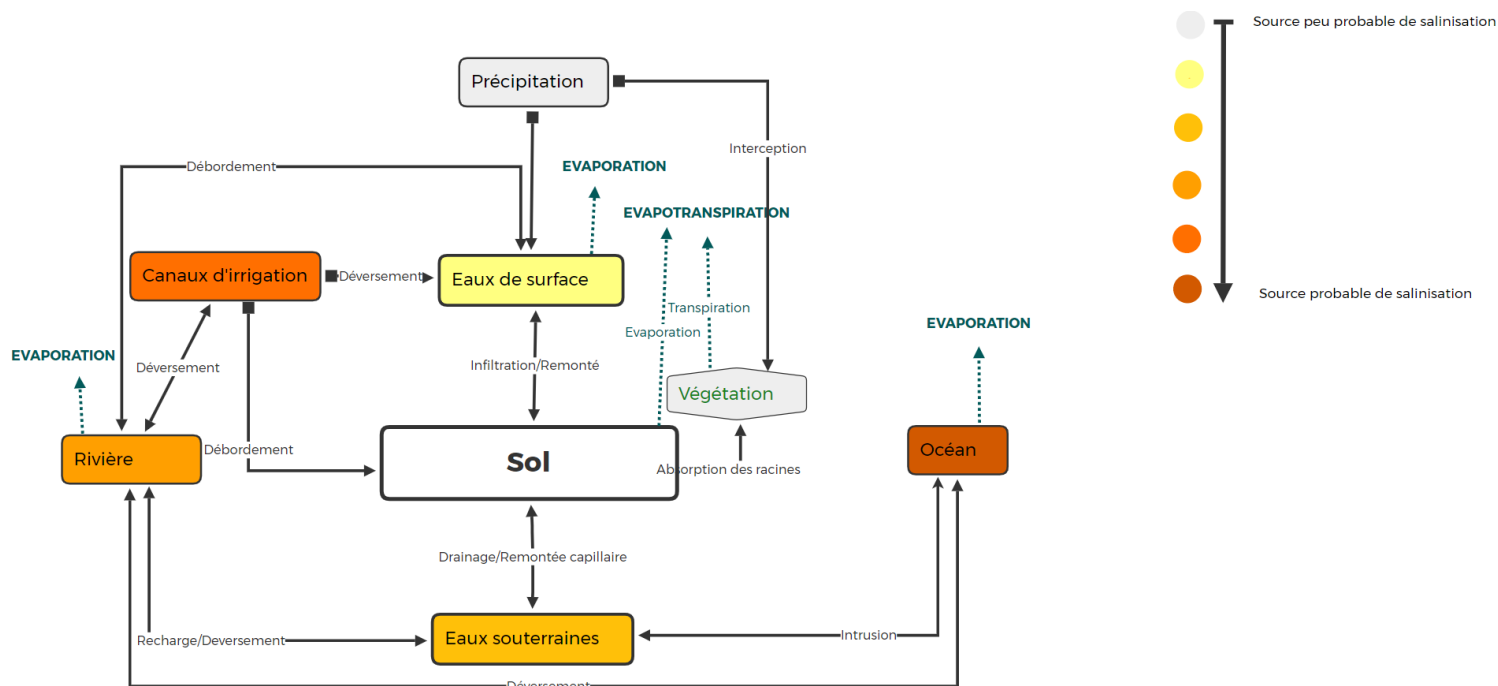


Figure 6 - 1 : Bilan conceptuel des différents réservoirs et leurs interactions au sein du Parc Naturel Palo Verde. Les différents tons d'orange indiquent si un(e) réservoir/source influence fortement ou faiblement l'apport en sel dans le parc.

Le bilan conceptuel global peut être décliné pour chaque lagune en indiquant les processus les plus importants en fonction de leur localisation par rapport aux différentes sources d'eau (Figure 6-2). En effet, une de nos hypothèses est que plus une lagune est proche d'une source potentielle de salinité (océan, rivière, canaux d'irrigation) plus elle est susceptible d'avoir un taux de salinité élevé. Les lagunes Palo Verde et Nicaragua sont les lagunes les plus proches de l'océan, nous supposons donc un effet plus important des eaux du golfe sur la dynamique hydrologique de ces lagunes. De même, Poza Verde et La Bocana sont les stations se trouvant directement en contact avec les canaux d'irrigation voisins et seraient donc plus susceptibles d'être affectées par leurs eaux. Aux stations Palo Verde, Varillal, Poza Verde, Chamorro et Nicaragua on pourrait observer l'impact d'une recharge par débordements de la rivière se trouvant à proximité.

Nous nous proposons de tester ces hypothèses en nous servant des données de réseaux dont nous disposons.

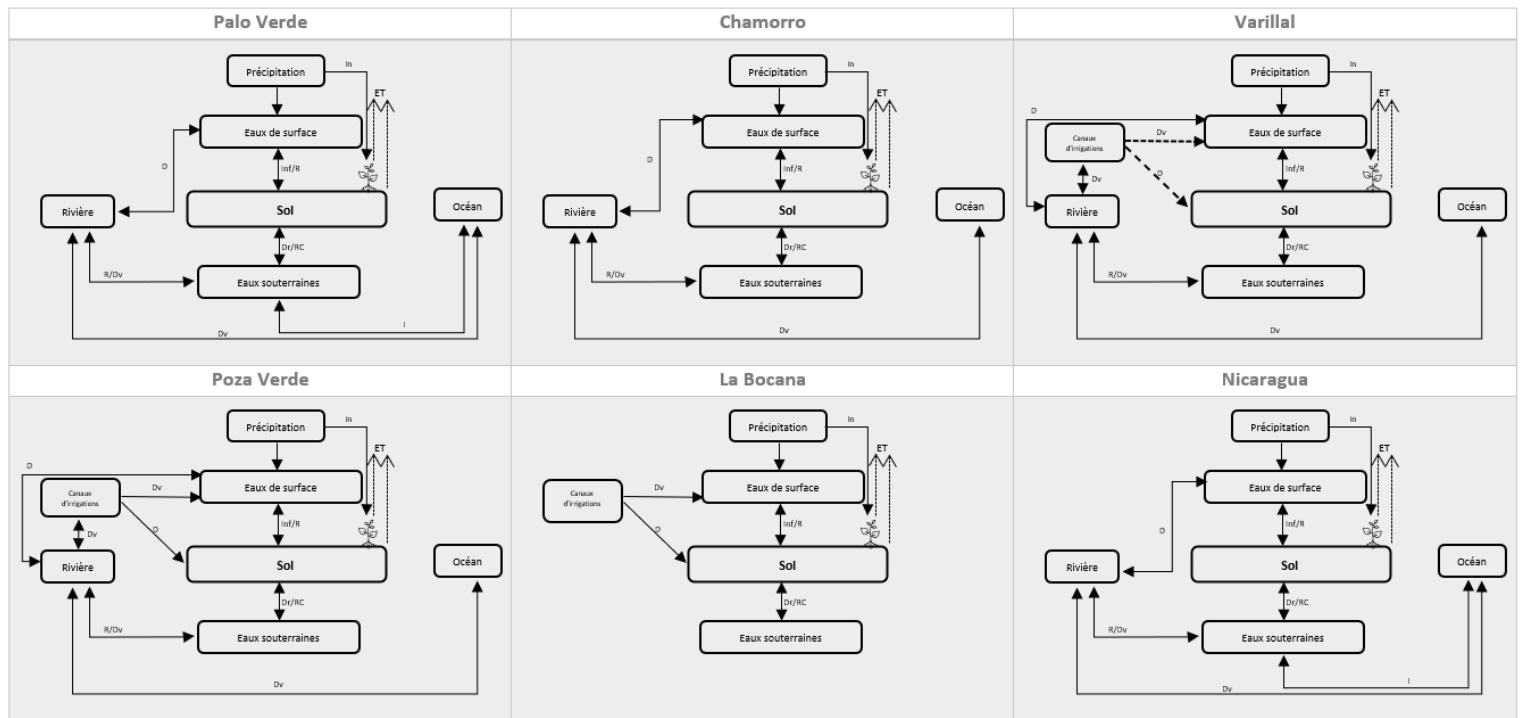


Figure 6 - 2 : Bilans conceptuels des différents réservoirs et sources d'eau avec leurs interactions représentées pour les six lagunes. Avec ET : Evapotranspiration, In : Interception, D : Débordement, Dv : Déversement, I : Intrusion, Dr : Drainage, RC : Remontée capillaire et Inf : Infiltration.

6.1.2. Hydrologie

Les niveaux d'eau souterraines et de surface ne cessent de changer. Ces changements semblent être régis par plusieurs mécanismes : débordements de rivière, précipitations, écoulements, infiltrations, etc (Alonso, 2017) qui répondent à des variations cycliques et dont les périodes peuvent être différentes d'une lagune à une autre. Ainsi, lors des changements de saisons, par exemple, les niveaux d'eau varient. A ces variations de basse fréquence s'ajoutent des variations de périodes plus courtes. Des cycles journaliers sont connus et ont été précédemment étudiés (Alonso, 2017).

Nous avons accès à une base de données contenant des mesures relevées toutes les 15 minutes depuis 2013. Les variables mesurées sont le niveau de la nappe et des eaux de surface, l'électroconductivité, la température et les précipitations. Cette base de données sera exploitée pour créer des visualisations en vue d'améliorer notre compréhension de la dynamique hydrologique du parc.

Visualisation des niveaux d'eau dans le temps

Nous avons représenté les graphiques du niveau d'eau de surface (en rouge) et de la nappe (en bleu) pour chaque station en fonction des années fournies par la base de données (Figure 6-3). Nous

observons ainsi l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps. Les hauteurs d'eau des différentes stations présentent une dynamique saisonnière. La hauteur de la nappe diminue en saison sèche (de décembre à mai) et dès l'arrivée de la saison humide va se recharger rapidement en eaux. Les montées des eaux de nappes peuvent être très impressionnantes, parfois plus d'un mètre en seulement 30 minutes. Cela est difficile à interpréter et peu de phénomènes peuvent contribuer à un si grand apport d'eau avec une durée si courte. Il est à noter que beaucoup d'observations sont inexistantes ou sujet à questionnement. Ceci est expliqué par des problèmes techniques survenus ou des opérations de maintenance.

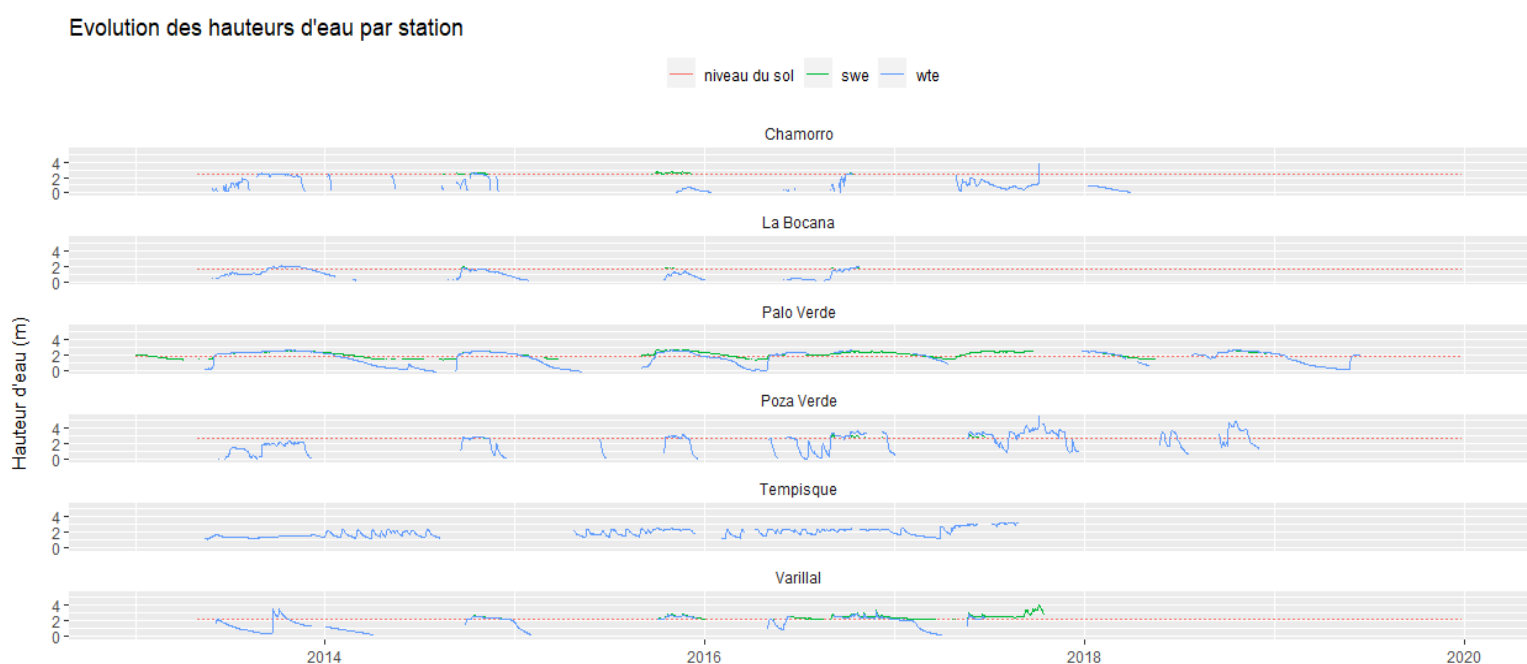


Figure 6 - 3 : Hauteur de la nappe phréatique (WTE), de l'eau de surface (SWE) et des eaux souterraines de la rivière Tempisque relevée toutes les 15 minutes. Les stations de surveillance WTE et celles de SWE sont espacées de 1,5 m, sauf pour la station Poza Verde qui est espacée de 700 m.

Durant la saison humide, lorsque nous sommes en condition de saturation, nous observons que l'eau des nappes des lagunes Palo Verde, Chamorro et La Bocana atteint approximativement le même niveau. En effet, les eaux s'équilibrent en surface au sein du parc créant un continuum. En saison sèche, les stations Palo Verde et La Bocana montrent un comportement de décharge similaire suggérant ainsi que la nappe de ces deux stations est connectée.

Nous observons une dynamique très différente pour la station Tempisque située en bordure de la rivière. En effet, cette station ne semble pas suivre la dynamique saisonnière et ne semble pas être couplée au régime des précipitations, en revanche les niveaux d'eau semblent étroitement liés au

rythme des marées. Les marées sont causées par l'alignement entre la Terre, la lune et le soleil, appelé syzygie. Elles créent des débordements de la rivière dans cette zone (Wester et al., 2018). Les données du niveau des eaux de nappes nous montrent qu'à cet endroit, les eaux de nappes sont plus influencées par les débordements de la rivière. En effet, le niveau des eaux de la nappe au niveau de la station Tempisque augmente et lorsqu'il dépasse la berge, l'eau de la rivière déborde et s'écoule dans la zone humide du parc pour ensuite s'infiltrer dans les nappes souterraines. Aussi, nous observons que les eaux de la nappe des lagunes au niveau des stations de mesure sont plus élevées que le niveau subtidal dans la rivière Tempisque. Cela pourrait signifier que les eaux des nappes peuvent se déverser dans la rivière.

Ce lien qu'entretiennent la rivière et les lagunes est observable sur les séries temporelles. Au niveau de la lagune Poza Verde, par exemple, nous constatons la présence de pics verticaux pour les eaux souterraines qui correspondent à des arrivées d'eau brusques et pourraient donc correspondre aux moments de débordement de la rivière. En octobre 2017, une montée des eaux souterraines présente une remontée plus importante atteignant plus de 4 mètres de hauteur. Nous observons ce même pic d'eau souterraine pour la station Chamorro. Nous supposons que ces grandes remontées d'eau sont associées aux conditions climatiques extrêmes survenues durant cette période (tempête). Cela aura eu comme conséquence un plein de *run-off* dans le bassin versant engendrant ainsi un débit dans la rivière très important inondant toute la plaine.

Au sein de la série temporelle de la station Palo Verde, nous observons des mouvements journaliers (Figure 6-4) et biquotidiens (Figure 6-5) pour la nappe et la surface. Ce phénomène est d'autant plus mis en évidence durant la période sèche. Ceci est lié au cycle de marée qui a lieu quotidiennement, créant ainsi des petites variations du niveau d'eau (de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres). Poza verde et La Bocana présentent également ces variations journalières même si moins visibles.

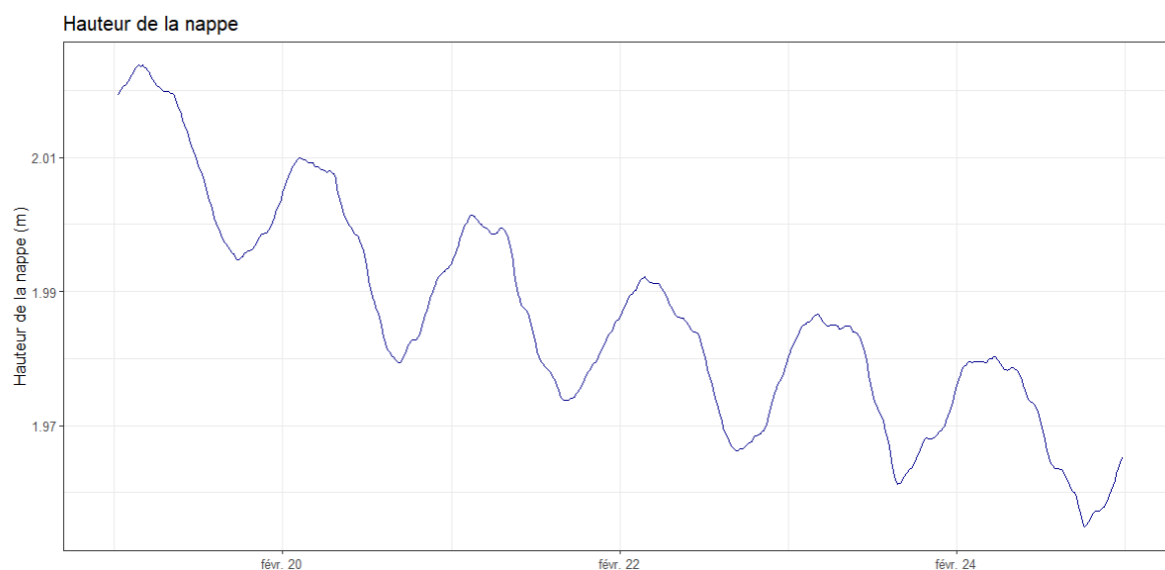


Figure 6 - 4 : Evolution de la hauteur de la nappe de la station Palo verde durant la dernière semaine de février 2017.

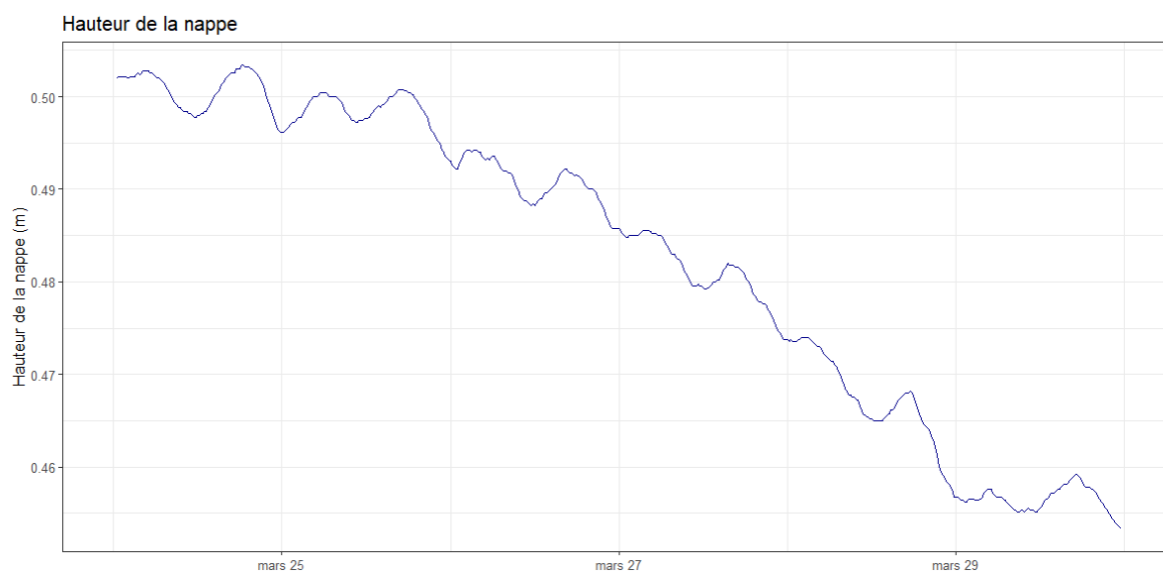


Figure 6 - 5 : Evolution de la hauteur de la nappe de la station Palo verde durant la dernière semaine de mars 2019.

Analyse des niveaux d'eau

Pour avoir une vue sur l'ensemble des données de réseau de WTE (eaux de nappe) nous les représentons sous forme de boîtes à moustache (ou boxplot). Le boxplot, présente pour chaque station la médiane des observations, les quartiles et les données extrêmes.

Le Boxplot reprenant les données WTE (Figure 6-6) nous résume la distribution la hauteur de la nappe pour les cinq stations (nous ne disposons pas de données pour Nicaragua). Il est à noter que la

station Poza Verde ne peut être directement comparée avec le Boxplot des autres stations car elle possède un niveau de référence différent des quatre autres stations.

Varillal et Palo Verde présentent des distributions similaires. Varillal montre une dissymétrie au niveau de sa médiane, cela indique que la moitié supérieure des valeurs montre une moindre variance, et est essentiellement concentrée à environ 2.5 m au-dessus du *datum* de référence tandis que la moitié inférieure est plus dispersée. La même observation peut être faite pour Palo Verde. Les médianes des stations La Bocana et Chamorro sont proches, mais les hauteurs d'eau sont plus variables pour la station Chamorro.

Il est important de noter que nous possédons plus de données durant les saisons humides et plus de valeurs manquantes durant les saisons sèches. De plus, lorsque les niveaux d'eau se trouvent sous l'instrument de mesure, aucune valeur n'est relevée. Sans valeurs manquantes et avec des mesures totalement fiables, les boxplots pourraient être différents.

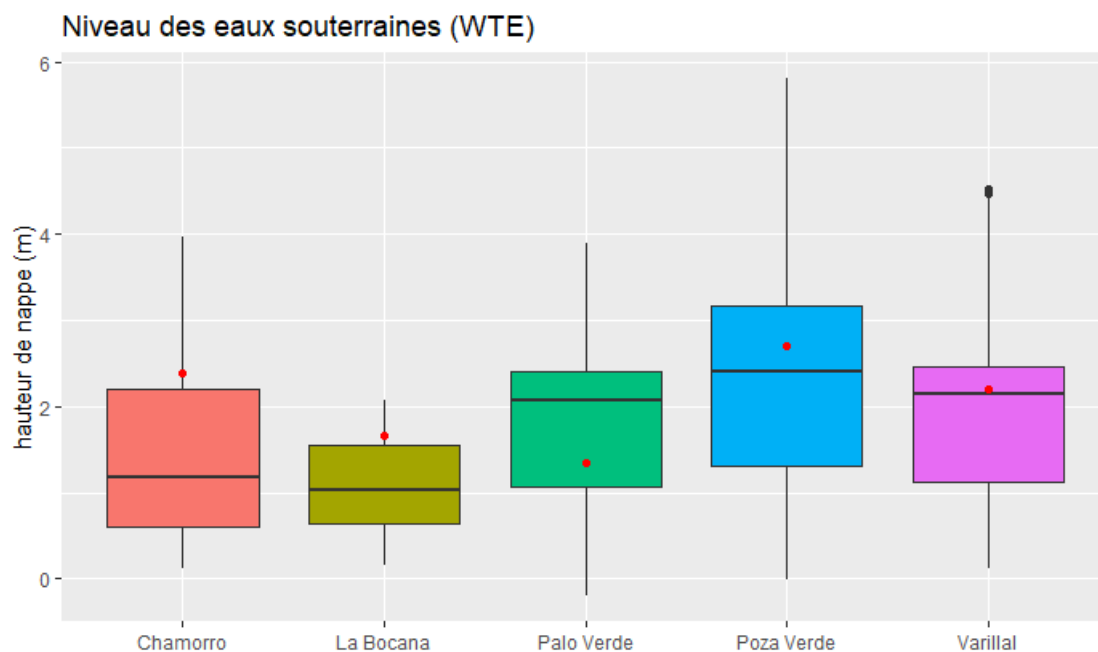


Figure 6 - 6 : Boîte à Moustache du niveau des eaux souterraines (WTE) pour la station Chamorro, La Bocana, Palo Verde, Poza Verde et Varillal. Le niveau du sol (par rapport au datum de référence) est représenté par un point rouge pour chaque station.

Les Boxplot de WTE nous ont permis de voir la médiane de nos données et leur distribution entre les différentes stations. C'est un outil visuel afin de comparer les différentes stations entre elles.

L'utilisation des Boxplot mis côte à côte en fonction des stations permet de montrer les différences entre les groupes et d'identifier les valeurs d'intérêts.

L'interprétation des niveaux des eaux de surface est plus difficile. Les eaux de surface sont moins stables et leurs distributions sont dissymétrique principalement car il existe un mélange entre les différentes eaux de surface du parc. En effet, n'étant pas délimitées par des frontières physiques, les eaux de surface sont plus susceptibles de se mélanger entre elles. De plus, elles sont moins constantes car plus soumises au mouvement des eaux de surface engendré par les conditions météorologique. Les boxplots de ces données n'offrent pas d'information utile et ne sont pas représentés.

Analyse de Fourier des niveaux d'eau

L'analyse des séries temporelles par décomposition de Fourier nous indique une période de 0.5 jour pour les cinq stations c'est-à-dire que nous observons une montée et une descente des eaux deux fois par jour ; ceci pourrait correspondre au cycle de marées M2 soit deux cycles complets de 12 heures et 25 minutes appelés marée semi-diurne générée par la lune moyenne. L'indication d'un cycle biquotidien pourrait appuyer le phénomène de recharge de la nappe des lagunes par la rivière. Les variations sont transmises principalement pas le phénomène de remontées des eaux dans le fleuve mais aussi car le golfe se situe à proximité.

Pour les stations Palo Verde, Poza Verde, Chamorro et Varillal, l'analyse de Fourier nous présente également des pics de fréquence journalière. Cela peut être expliqué par le phénomène de marée journalière mais peut également correspondre au phénomène d'évapotranspiration. En effet, les maxima et les minima correspondent aux heures de consommation des eaux des plantes (US Department of Commerce).

Origine des eaux du parc

Il est difficile de caractériser l'hydrologie complète du parc. En effet, les données dont nous disposons limitent l'approfondissement des réflexions et rendent difficile la confirmation des hypothèses de départs. De plus, le système reste très complexe et parfois certains événements restent difficiles à interpréter. Cependant, grâce au jeu de données, nous avons pu appuyer certaines de nos hypothèses et interpréter les caractéristiques majeures pour chaque lagune.

Les premiers graphiques des niveaux des eaux de surface et de nappe en fonction du temps (Figure 6-3) montrent des montées et des descentes de niveau qui semblent être principalement régies par les précipitations et l'évaporation. Nous retrouvons également une grande variabilité interannuelle de l'hydropériode. De plus, les lagunes présentent chacune un comportement hydrologique spécifique, il est envisageable qu'elles soient soumises localement à des processus majeurs avec des temporalités différentes, ce qui suggérerait l'existence d'apports en eau autres que les précipitations, variant selon la localisation de la lagune par rapport au golfe ou à la rivière.

Aux stations Poza Verde, Varillal et Chamorro (Figure 6-3 : Chamorro, Poza Verde, Varillal) on observe des variations du niveau d'eau relativement importantes durant une grande partie de l'année. Cela peut être expliqué d'une part par les débordements de la rivière adjacente et d'autre part par l'infiltration latérale et aux ruissellements des eaux de pluie. De plus, ces trois stations présentent des cycles journaliers et biquotidiens permettant d'appuyer l'hypothèse de l'influence de la rivière sur les lagunes. Poza Verde montre également une forte variabilité interannuelle (Figure 6-3 : Poza Verde) des niveaux d'eau qui pourrait être due aux ruissellements des eaux des canaux d'irrigations se situant à proximité de la lagune.

A la station La Bocana le profil hydrologique (Figure 6-3 : La Bocana) peut s'expliquer par l'hypothèse des écoulements d'eaux venant des canaux d'irrigation à proximité de la lagune. Cette hypothèse est soutenue par la présence de nombreuses irrégularités et instabilités interannuelles des niveaux d'eau tout comme la station Poza Verde. L'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface suggère que ces dernières pourraient être rechargées par la nappe à un certain moment de l'année.

La station Palo Verde est située dans une zone où le niveau d'eau est haut tout au long de l'année. Durant la saison sèche les autres lagunes présentent des niveaux d'eau bas, souvent sous le capteur, alors que Palo Verde présente un niveau d'eau non négligeable (Figure 6-3). Si Palo Verde garde un niveau d'eau plus longtemps tout au long de l'année, c'est probablement dû à sa topographie. Cette dernière, plus basse qu'aux autres stations (à part Nicaragua), engendrerait une accumulation d'eau stagnante. De plus, les marées de la rivière Tempisque, bien visibles sur la série temporelle des niveaux d'eau, sont corrélées aux observations de Palo Verde, ce qui montre un impact de la rivière sur les eaux de Palo Verde.

De ce fait, la rivière Tempisque et le golfe jouent un rôle notable dans l'hydropériode du parc. En effet, ils contribuent certainement à la modification et à la variation des niveaux des eaux souterraines et de surface. Il est également probable que les eaux issues des canaux d'irrigations influence, à petit échelle, la dynamique des niveaux d'eau pour certaines stations.

6.1.3. Salinité

Visualisation des données de l'électroconductivité dans le temps

Nous présentons un graphique mettant en parallèle les précipitations, les températures et l'électroconductivité avec les niveaux d'eau (Figure 6-7 à 6-9). Nous pouvons ainsi interpréter les niveaux de salinité en fonction des variations du niveau d'eau. Cela peut guider notre interprétation sur la dynamique de salinité des eaux souterraines et de surface. Ces graphiques mis en parallèle pourront nous aider à appuyer ou non nos hypothèses quant aux différentes sources de salinité. Certaines hypothèses sont difficilement vérifiables sur base des données dont nous disposons.

Mise en parallèle avec les graphiques des précipitations, la station Palo verde (figure 6-7) nous montre que la phase de latence entre les périodes de précipitations et le remplissage de la nappe est souvent faible. Nous observons cependant, quelques fois une phase de latence entre le retour des pluies et la réaction de la nappe juste après des périodes plus longues de décharge. Cela peut être expliqué par le temps d'infiltration des eaux et par la profondeur de l'outils de mesure se trouvant au-dessus de la nappe. Nous n'observons alors aucune valeur jusqu'à ce que la nappe atteigne le capteur (Figure 6-8, septembre 2015).

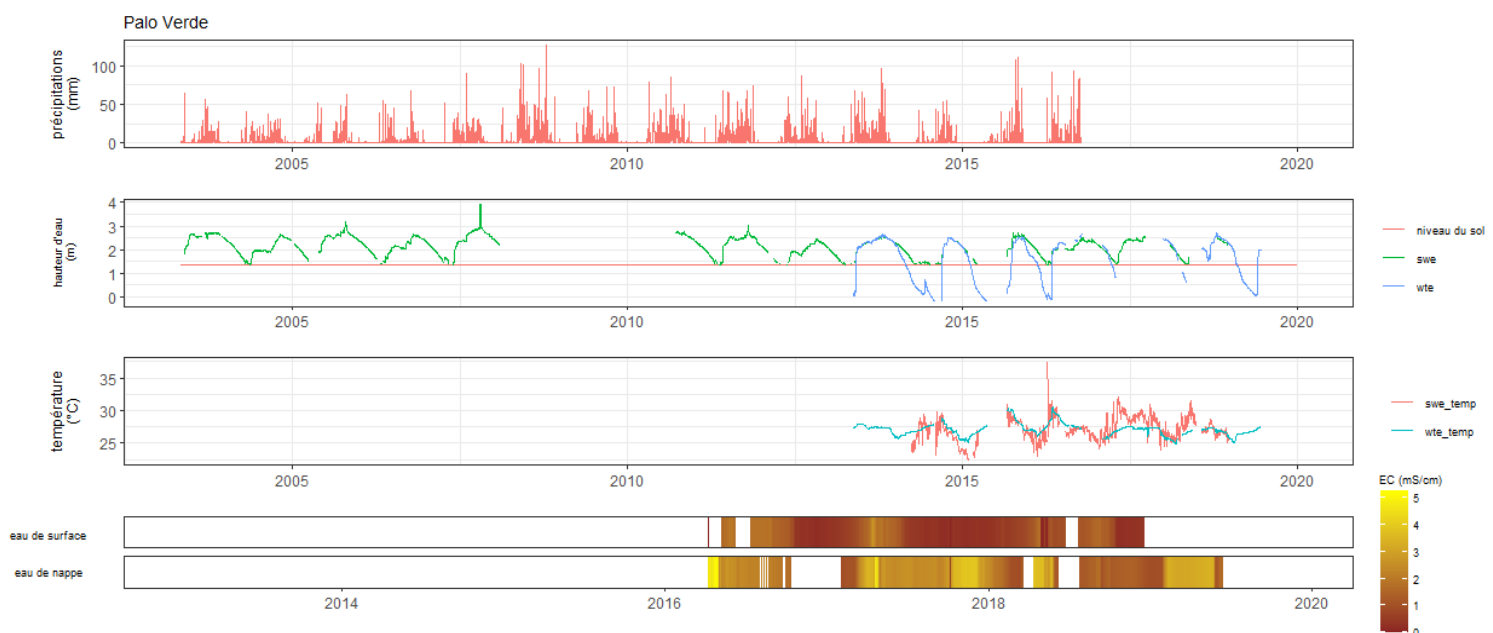


Figure 6 - 7 : Evolution des précipitations, du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Palo Verde (agrégées par jour).

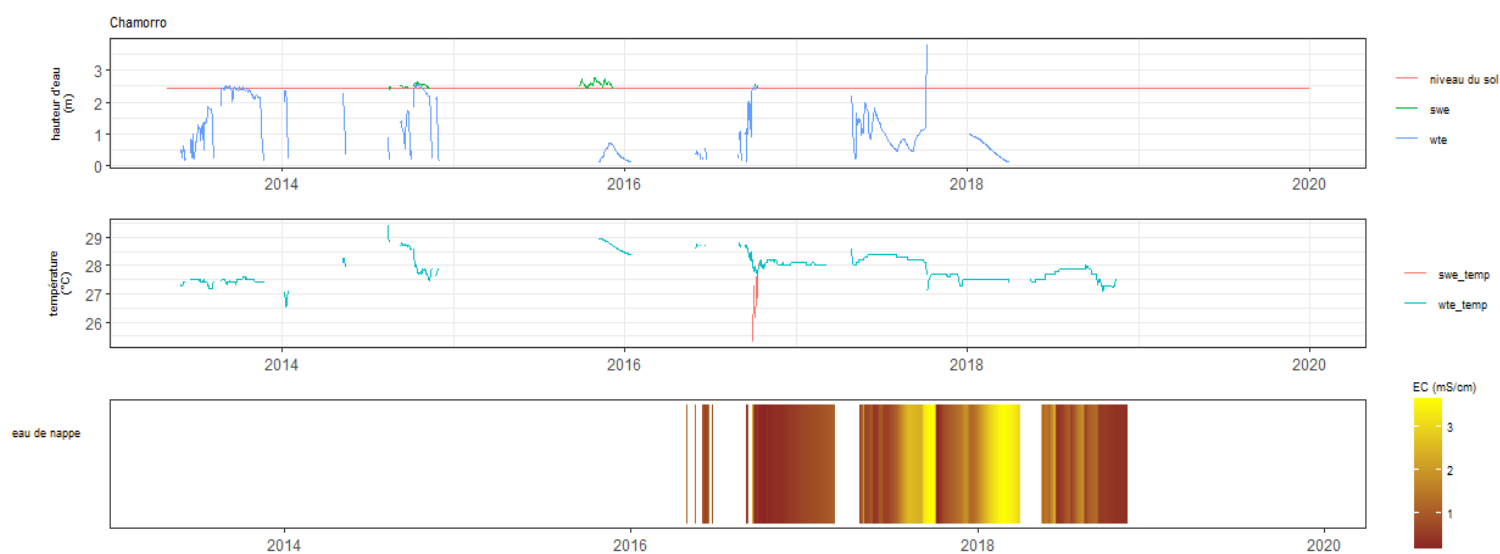


Figure 6 - 8 : Evolution du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Chamorro (agrégées par jour).



Figure 6 - 9 : Evolution des précipitations, du niveau des eaux souterraines et de surface, de la température et de la salinité (mS/cm) de ces dernières à Poza Verde (agrégées par jour).

La station Poza Verde ne montre pas d'interaction linéaire entre la salinité et les niveaux d'eau de surface et de nappe (Figure 6-9). Cependant, nous observons que lorsque l'eau stagne, les valeurs de EC montrent une grande variabilité. Lorsque l'eau de nappe se trouve en surface, les valeurs d'EC baissent en profondeur. Ce phénomène peut être engendré par des problèmes de piézomètre. En effet, la manière dont le piézomètre est construit a pour conséquence que ce qu'on mesure est peut-être simplement les eaux de surface qui se mélangent avec les eaux souterraines à travers le piézomètre.

Les figures 6-10 à 6-12 ont été construites de sorte que chaque point représente une donnée et qu'en plus d'être représentées individuellement, ces données ont chacune une couleur qui nous informe de leur valeur d'EC. Plus les tons sont jaunes, plus l'EC est fort, plus ils sont bleus, plus l'EC est faible. La ligne en pointillée grise représente le niveau du sol. Au niveau de la station Varillal dans les alentours de mai 2017 par exemple (Figure 6-10), nous voyons de manière évidente, les différentes valeurs sous forme de points colorés. Chaque point a été relevé toutes les 15 minutes. Ce qui saute aux yeux est qu'en un peu plus d'une heure, nous avons une montée des eaux souterraines de plus d'un mètre. Ce phénomène de montée des eaux rapide est difficile à interpréter. Nous observons cela de manière récurrente et sur plusieurs stations. La valeur de salinité lors de ces montées d'eau est relativement élevée (entre 5.5 et 6 mS/cm) qui est sûrement dû à une entrée d'eau saline.

La station Varillal possède une salinité au niveau des eaux de nappe relativement haute. Cela s'explique par la connexion des eaux du golfe. Aussi, les pics d'EC correspondent souvent à des pics de montées d'eau ce qui peut être liée à des entrées d'eau saline probablement expliquées par une recharge en eau par la rivière.

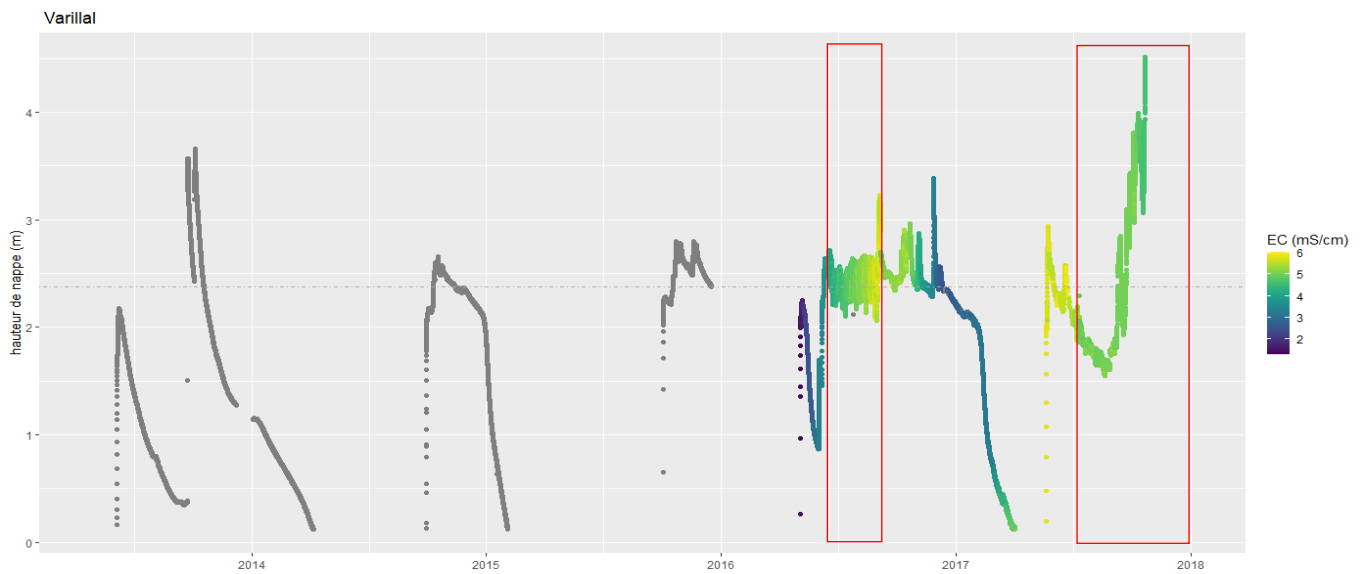


Figure 6 - 10 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Varillal. Les données à questionnement sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.

Pour la lagune Chamorro (figure 6-11), nous remarquons une corrélation entre le niveau d'eau et l'EC: les pics du niveau d'eau correspondent à un EC plus bas. Et lorsque nous nous trouvons avec un niveau plus bas que celui de la nappe, l'EC est plus important. Cela peut en partie être expliqué par le phénomène d'évaporation.

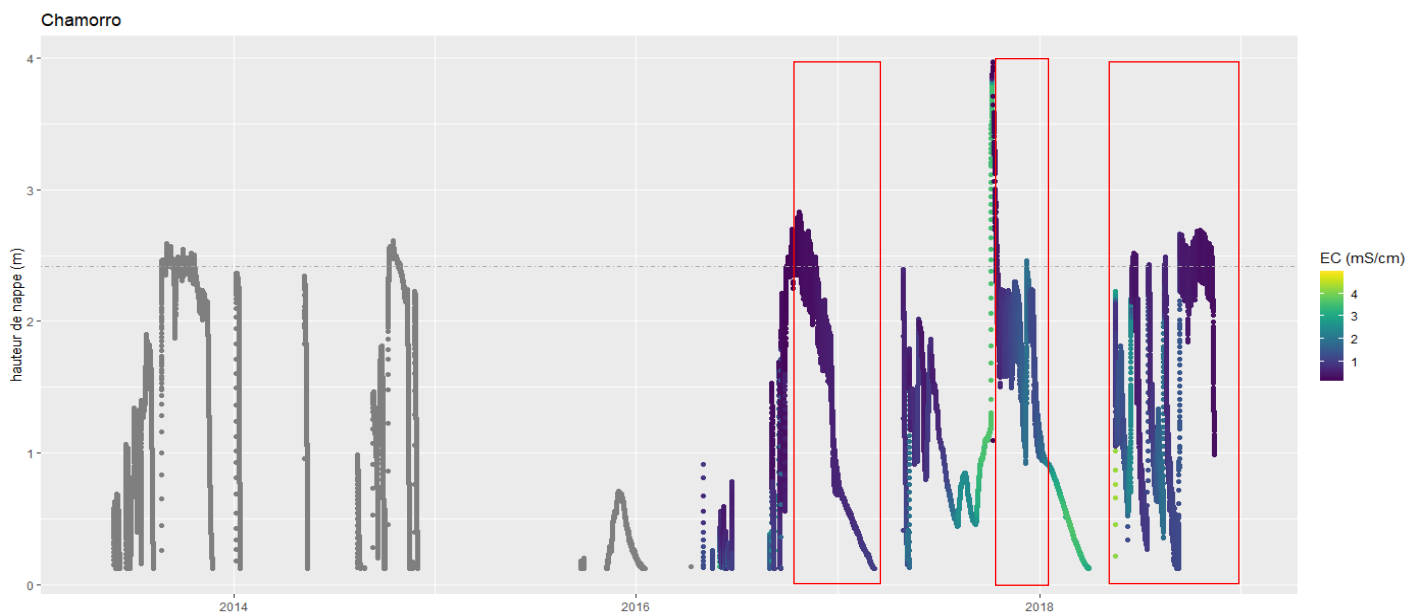


Figure 6 - 11 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Chamorro. Les données à questionnement sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.

Au niveau de la station Palo verde (figure 6-12), durant les saisons où les pluies sont plus intenses, nous observons les montées des niveaux d'eau de nappe et de surface. Lorsque nous mettons en parallèle le graphique de la hauteur d'eau de la nappe avec l'électroconductivité de la nappe, nous avons une certaine cohérence. En effet, lorsque nous avons des pics du niveau de l'eau de la nappe cela va correspondre à une baisse de l'électroconductivité. Ce phénomène peut être expliqué par l'introduction d'eau de source au niveau de la nappe (précipitation). Nous observons également ce phénomène pour les eaux de surface mais de manière moins évidente. Il existe un lien entre la température et l'électroconductivité des eaux de surface et de la nappe. Lorsque la température est élevée, l'électroconductivité augmente également. Il est probable que l'augmentation de l'évaporation des eaux crée par une température plus importante engendre une concentration plus importante en sel.

Palo verde possède un taux d'EC au niveau de la nappe relativement haut par sa proximité avec la rivière qui est elle-même rechargée par les eaux salines du golfe. Les eaux de la nappe sont très hautes en EC et une augmentation du niveau d'eau va correspondre à une diminution de EC par l'infiltration des eaux de pluie durant les saisons humides.

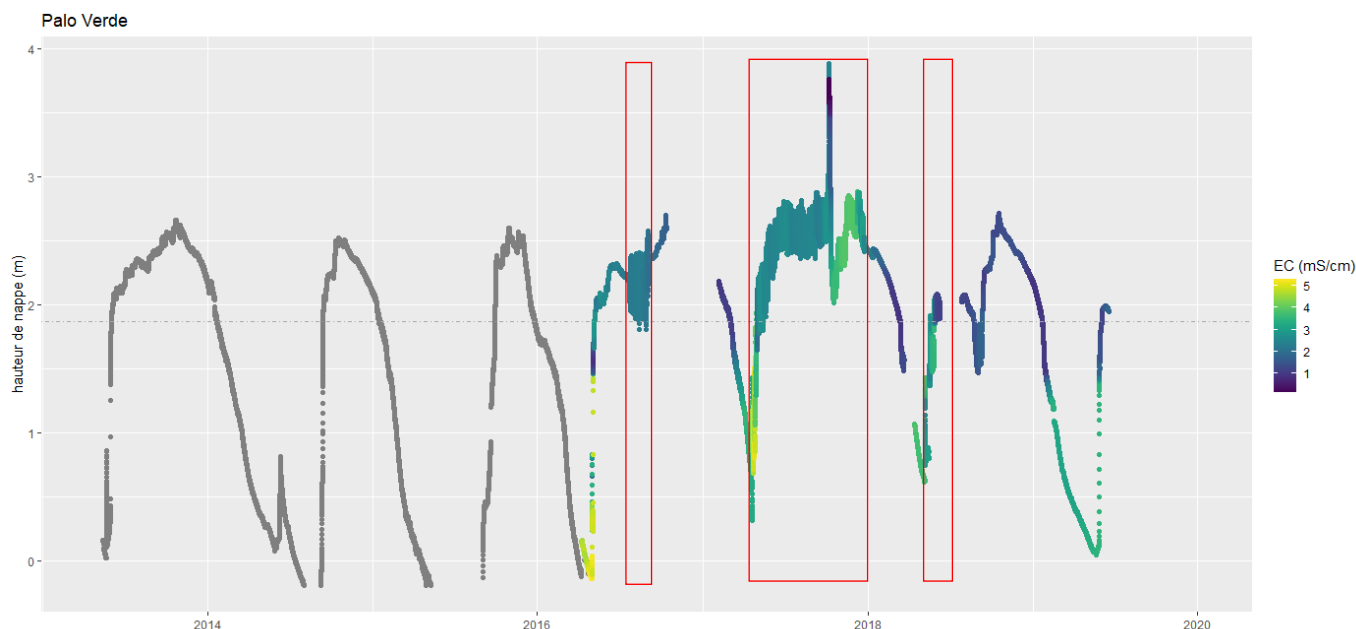


Figure 6 - 12 : Evolution du niveau des eaux souterraines à Palo Verde. Les données à questionnement sont encadrées. La couleur de la courbe renseigne sur l'électroconductivité (gris si inconnue). Le niveau du sol est représenté en pointillés.

Nous remarquons que les valeurs d'EC les plus intenses se présentent lorsque nous avons des niveaux d'eau qui diminuent, cela peut être expliqué par des moments d'évaporation importants. L'eau est évaporée laissant une eau plus concentrée en sel.

Analyse des séries temporelles de l'électroconductivité

Les boîtes à Moustache reprenant les données de l'électroconductivité, permettent de présenter les variations de la salinité entre les différentes stations. Au niveau des eaux de nappe, seule la station La Bocana ne présente pas de donnée sur l'électroconductivité. Pour les eaux de surface, les stations La Bocana et Chamorro qui ne présentent pas de donnée sur la salinité.

Concernant les données de WTE (Figure 6-13) des eaux souterraines, Poza Verde est la station qui possède le moins de variations de salinité. Les stations Chamorro, Palo Verde et Varillal présentent une dissymétrie de la médiane pouvant indiquer que les données ne sont pas normalement distribuées.

Au niveau des eaux souterraines, la station de Varillal présente des valeurs de salinité plus importantes que les autres stations. Ce résultat inattendu pourrait être expliqué par des intrusions latérales d'eau saline vers la nappe souterraine. Ceci impliquerait que la nappe de Varillal soit plus sujette aux intrusions que celles des autres lagunes.

Quant aux données de SWE (Figure 6-14) des eaux de surface, nous observons que la salinité est beaucoup plus faible que dans les eaux souterraines. Cela peut s'expliquer par le fait que les eaux de surface sont principalement rechargées par les précipitations. Les pluies possèdent une électroconductivité très faible, proche de 0 mS/cm. Les stations de mesure Poza Verde et Varillal restent peu variables et présentent des valeurs très faibles. Palo Verde présente également des valeurs faibles mais avec une plus grande variabilité. Cela peut être interprété par les débordements de la rivière qui sont importants au niveau de cette station.

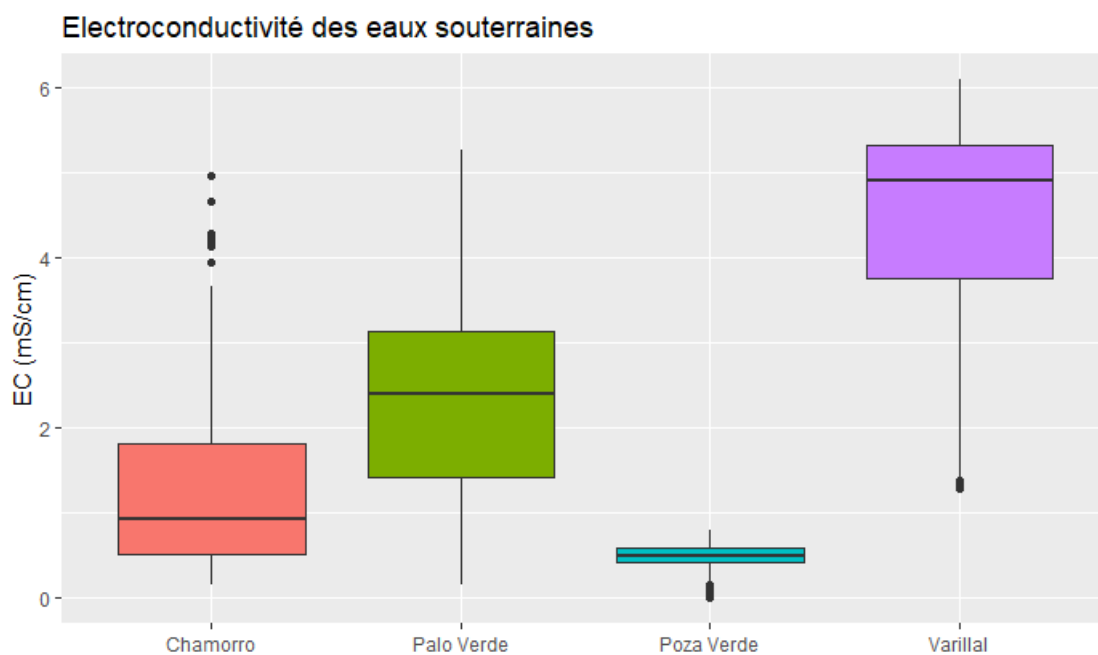


Figure 6 - 13 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux souterraines pour les stations de mesure de Chamorro, Palo Verde, Poza Verde et Varillal.

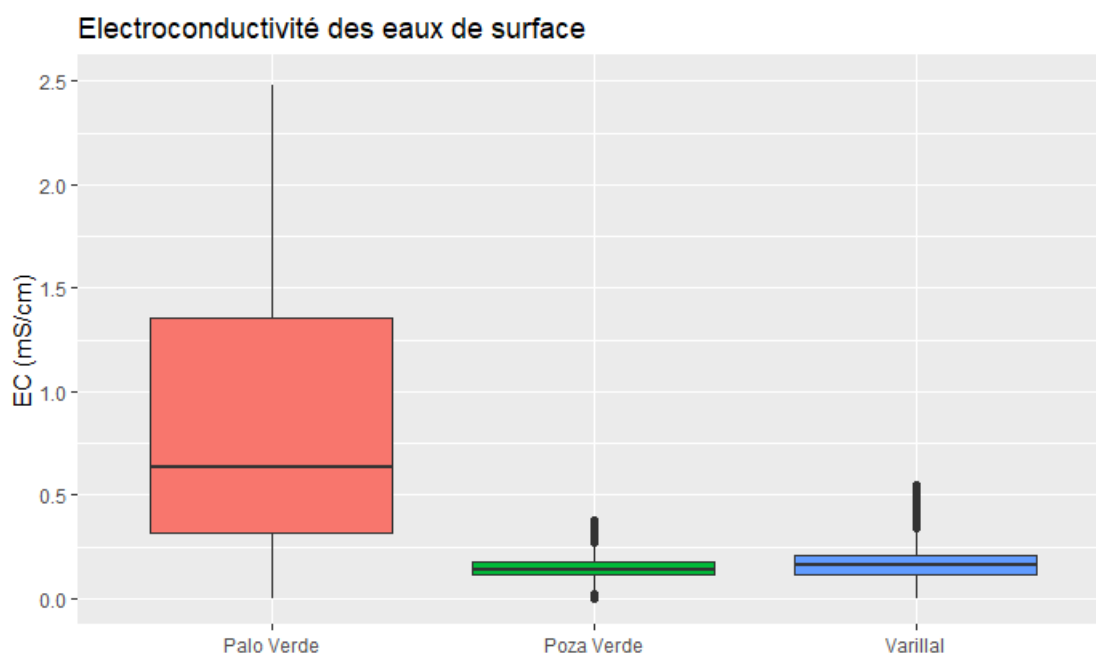


Figure 6 - 14 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de nappe pour les stations de mesure Palo Verde, Poza Verde et Varillal.

Interprétation préliminaire de la salinité

La base de données hydrométéorologique du parc Palo Verde contient également les données sur la conductivité électrique (EC, mS/cm) représentant le taux de salinité. Les données d'EC sont plus erratiques et ne présentent pas de cycle évident. Le jeu de donnée contient du bruit ce qui rend son interprétation plus difficile. De plus, chaque lagune présente une dynamique de salinité différente.

Les hypothèses de départ quant à l'origine de la salinité sont principalement concentrées sur les eaux de la rivière alimentées par le golfe et les eaux des canaux d'irrigations. Les eaux souterraines, elles-mêmes alimentées en eau saline venant du golfe, pourraient remonter et contribuer à la salinité des eaux du sol et de surface. Avec la base de données dont nous disposons, il est difficile de confirmer ces hypothèses. Cependant, l'analyse de l'origine des eaux permet d'en appuyer certaines.

Dans chacune des lagunes la salinité des eaux de surface est moins importante que celle des eaux souterraines. Ce phénomène peut s'expliquer par l'arrivées des eaux de pluies (eaux pures) en surface créant une dilution, et par le mélange des eaux de surface sur la totalité du parc.

Les stations Poza Verde, Varillal et Chamorro ne présentent pas de taux EC important. Il semble que la proximité avec les canaux d'irrigation ne contribue donc pas à l'augmentation de la salinité des eaux ou de manière très minime. Leur source de salinité principale est plus plausiblement les débordements

de la berge contenant un mélange d'eau de source et d'eau de mer. La station Varillal présente au niveau de la nappe une salinité plus importante que les autres stations. On peut supposer que la nappe est davantage rechargée par les eaux souterraines de la rivière.

La station Palo verde présente quant à elle la salinité la plus haute, notamment au niveau des eaux de surface. La rivière Tempisque influence directement la station grâce à ses débordements récurrents, surtout observables durant la saison humide. L'origine de la salinité est certainement les débordements de la rivière. La proximité de la lagune et du golfe explique ces valeurs relativement plus importantes.

6.2. Campagnes de terrain

Trois campagnes de terrains ont été réalisées au Parc National Palo Verde du 12 au 27 septembre 2021 (Figure 5-13).

La première campagne, nommée IDCS, consistait à relever un maximum de points de mesure dans chaque lagune. Nous ne disposions précédemment que de données relevées au niveau des stations de mesure, mesurer des points plus éloignés de ces différentes stations permet de tester l'hypothèse qu'une même lagune possède la même dynamique de salinité sur l'entièreté de sa superficie.

La deuxième campagne, nommée IDT, visait à prendre des mesures en traversant la lagune Palo Verde en partant de la rivière Tempisque et perpendiculairement à cette dernière. Ces mesures permettent de tester l'hypothèse de la salinisation des eaux par la proximité de la rivière.

Enfin, la dernière campagne, nommée IDEt, avait comme objectif de suivre l'évolutions de la conductivité électrique des eaux de surface en un point précis en y relevant des mesures d'électroconductivité deux fois par jour (matin et soir). Le point fixe choisi se situe à proximité de la station de recherche OTS et a été choisi pour des raisons de facilité d'accès. Les relevés ont eu lieu du 15 au 24 septembre.

L'étude de terrain nous a permis d'avoir une meilleure connaissance du comportement de la salinité au sein du parc et de mettre en valeur la corrélation entre la salinité et l'expansion de *Typha*. La visite de terrain nous a également permis de compléter notre base de données, notamment pour les

lagunes La Bocana et Nicaragua pour lesquelles aucune donnée sur la salinité n'avait pu être enregistrées précédemment.

6.2.1 Couverture spatiale

Beaucoup des zones du parc ne sont accessibles ni à pied, ni en bateau, ni en voiture. Cela pour plusieurs raisons : une densité végétale trop importante, un niveau des eaux trop haut ou encore la présence dangereuse d'animaux sauvages (crocodiles, buffles, ...).

Electroconductivité des eaux de surface

La figure 6-15 reprend la médiane des 80 mesures de salinité des eaux prélevées en surface pour les différentes stations. Comme nous l'avons également observé sur les données temporelles de la base de données, les valeurs de salinité des eaux de surface sont très faibles. La faiblesse de ces valeurs est expliquée par le fait que les pluies, faibles en électroconductivité (proche de 0 mS/cm), rechargent en grande partie ces eaux de surface.

Nous relevons cependant quelques informations. Palo Verde et Nicaragua sont les lagunes les plus salines (elles présentent également la plus grande densité de *Typha*) suivies par Chamorro, Varillal, La Bocana et finalement Poza Verde où on observe également la salinité la plus faible. La faiblesse de la salinité à Poza Verde a également été observée lors de l'analyse des séries temporelles et s'explique par le fait que ce soit la lagune la plus éloignée du golfe et la plus proche des canaux d'irrigations.

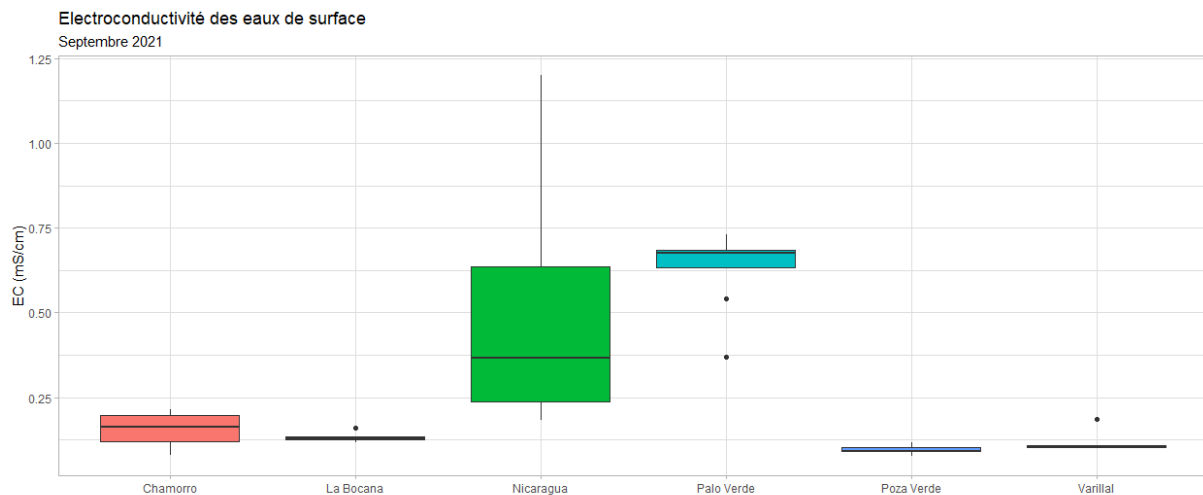


Figure 6 - 15 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface des six lagunes (Chamorro, La Bocana, Nicaragua, Palo Verde, Poza Verde et Varillal). Mesures réalisées en septembre 2021.

La Bocana, Poza Verde et Varillal ne présentent qu'une très faible variance comparée aux trois autres et principalement à Nicaragua. Cela semble indiquer que certaines lagunes présentent une salinité plus homogène que d'autres. Cependant, il est important de considérer que la variation d'EC reste très faible (entre 0.10 à 1.20 mS/cm) et que le nombre d'échantillons est variable d'une lagune à une autre. Dans le cas de La Bocana qui est une lagune difficile d'accès, seuls cinq échantillons ont pu être récoltés alors que pour d'autres lagunes l'échantillonnage est plus important.

Les données de campagne IDCS mises en parallèle avec les données de réseau prises uniquement durant la saison humide (de mai à décembre) montrent une électroconductivité médiane plus faible (Figure 6-16). Nous expliquons cela en partie car l'échantillonnage a été réalisé durant la deuxième moitié du mois de septembre. A cette période, les précipitations sont les plus importantes (Figure 6-17). Les pluies, source principale de recharge des eaux de surface, ont influencées la mesure de l'électroconductivité lors des campagnes de terrain rendant les valeurs globalement plus faibles que l'ensemble des valeurs relevées par la base de données comprenant toute la période de la saison humide. La salinité des eaux souterraines présente une électroconductivité plus importante que celle des eaux de surface. En effet, les nappes ne sont pas directement en lien avec les eaux de pluie et sont régulièrement influencées par l'intrusion d'eau saline venant du golfe (Alonso, 2017). Enfin, nous constatons que les données de réseau présentent une plus grande variabilité que les données des campagnes. Cela peut être expliqué par le fait que le réseau de donnée de eaux de surface a été

relevé sur une plus longue durée (plusieurs années) et présente donc un plus grand nombre de mesures. Nous en concluons donc que le temps crée une variabilité dans les données de salinité.

Les données de campagne de Palo Verde confirment ce qu'on observe avec les données de réseau (Figure 6-18). La distribution de données est différente, comme le montrent les boxplots, mais ceci s'explique par le faible nombre de mesures pour les données de campagnes, les médianes cependant sont proches.

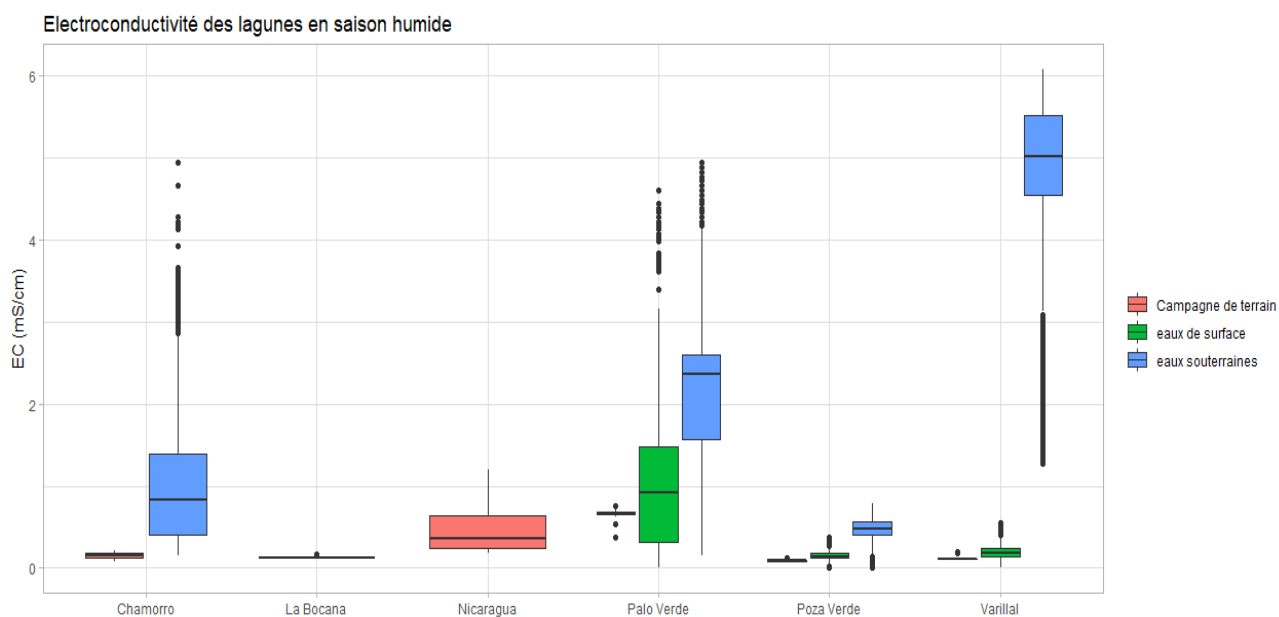


Figure 6 - 16 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface de la campagne de terrain (rouge), des eaux de surface du réseau de donnée (vert) et des eaux souterraines (bleu) pour les six lagunes (Chamorro, La Bocana, Nicaragua, Palo Verde, Poza Verde et Varillal) durant la saison humide.

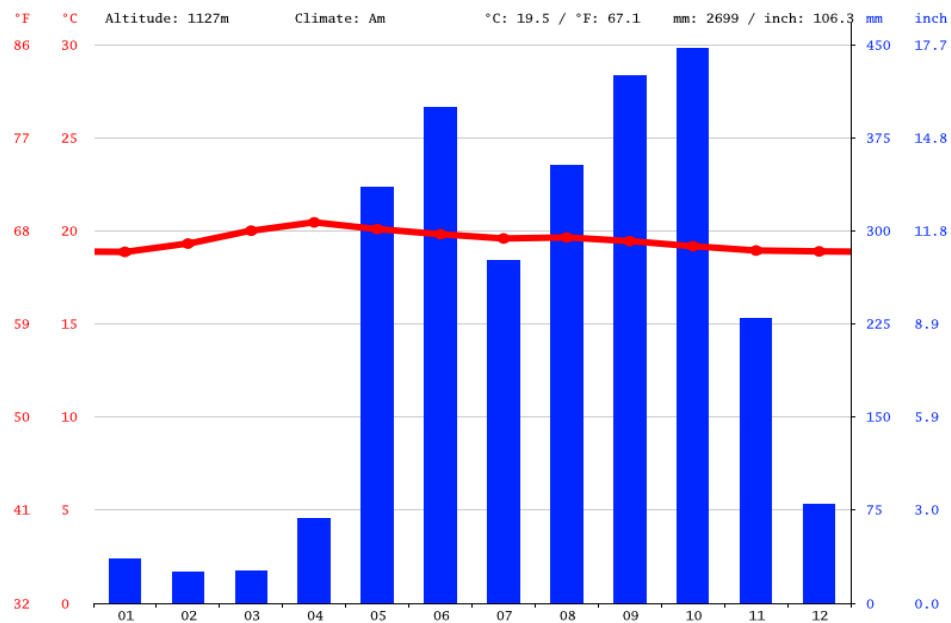


Figure 6 - 17 : Figure 6-16 : Diagramme ombrothermique de San José au Costa Rica (2019) (San José – Climate.org).

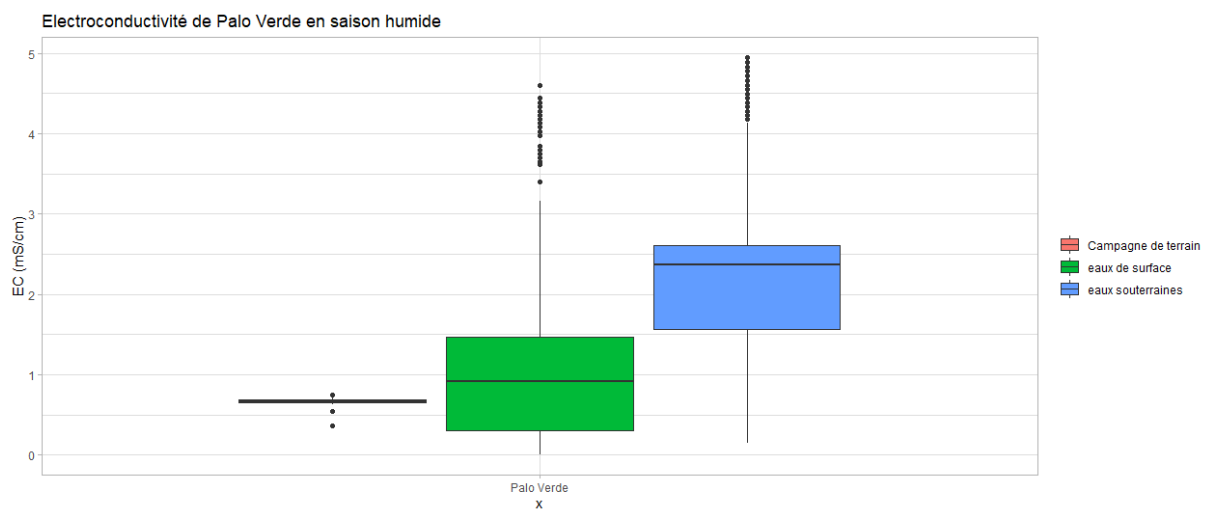


Figure 6 - 18 : Boîte à moustache de l'électroconductivité (mS/cm) des eaux de surface de la campagne de terrain (rouge), des eaux de surface du réseau de donnée (vert) et des eaux souterraines (bleu) pour Palo Verde durant la saison humide.

En chaque point de donnée, nous avons récolté des échantillons de sol. Ces derniers ont été analysés au laboratoire afin de mesurer la salinité des eaux des sols. Cependant, les valeurs qui en ressortent ne pourront pas être comparées avec les séries temporelles du réseau car pour la mesure de la conductivité électrique des eaux du sol, nous avons réalisé une dilution de 1/5. En mélangeant le sol

séché avec cinq fois sa masse en eau, nous diluons les eaux du sol créant ainsi une valeur de salinité plus faible. L'analyse des données pourra uniquement nous informer sur l'hétérogénéité des lagunes.

La conductivité électrique de la pâte salée est représentée par un demi-boxplot. À droite de chaque Boxplot, nous présentons les données pour chaque lagune (Figure 6-19). Cette représentation permet de mettre en perspective les boxplots en donnant une idée de la distribution exacte des nombreuses observations. Comme observé sur la mesure de l'électroconductivité des eaux de surface (Figure 6-15), Palo Verde et Nicaragua sont plus salines que les quatre autres lagunes et possèdent une variabilité de données plus importante.

Nous souhaitons vérifier si les différentes lagunes présentent des dynamiques de salinité distinctes. Le test de Mann et Whitney est adapté pour les faibles échantillons tels que les nôtres. Nous l'appliquons aux données d'électroconductivité pour chaque paire de lagune et présentons les p-valeurs obtenues dans le tableau 6-2.

Ces p-valeurs représentent la probabilité qu'on n'aurait d'observer une différence au moins aussi extrême entre les 2 groupes s'ils avaient la même dynamique de salinité.

Les p-valeurs inférieures à 0.05 sont représentées en vert, elles indiquent qu'on peut raisonnablement supposer que les deux lagunes comparées se comportent distinctement.

Les p-valeurs supérieures sont indiquées en orange, à l'exception des très hautes p-valeurs, supérieures à 0.5, qu'on représente en rouge.

Pour la Bocana et Varillal la p-valeur est extrêmement importante (0.75), nous ne pouvons pas affirmer que leurs données appartiennent à différentes distributions. Étant donné le faible nombre d'observations nous ne pouvons néanmoins pas conclure non plus qu'elles appartiennent à la même distribution, d'autant plus que d'un point de vue géographique les deux lagunes sont éloignées l'une de l'autre. Palo Verde et Nicaragua montrent aussi une grande p-valeur (0.53), avec un échantillon supérieur (même si toujours limité). En considérant le fait que les deux lagunes sont limitrophes et à proximité du golfe on peut prudemment défendre l'hypothèse que ces deux stations partagent leur dynamique de salinité.

Si on exclut la Bocana et Varillal de par leur faible nombre de données et la paire Palo Verde / Nicaragua détaillée ci-dessus, toutes les p-valeurs restantes sont faibles. La plus élevée est observée entre Chamorro et Poza Verde (0.59), même si cette p-valeur est supérieure au seuil de 0.05 traditionnellement considéré, elle indique que Chamorro et Poza Verde ne partagent probablement pas leur dynamique de salinité.

En tout et pour tout il semble raisonnable de ne pas grouper les lagunes, même si davantage des données pourrait remettre en cause ces observations, notamment entre Palo Verde et Nicaragua.

En avril 2015, le profil de conductivité a été réalisé en vue de mesurer la salinité tout au long de la rivière Tempisque (Figure 6-20 et 6-21). A cet effet des mesures ont été prises à des intervalles de 500 mètres le long de la rivière en partant du Golfe. On observe que le profil de salinité de la rivière Tempisque diminue au fur et à mesure que nous nous éloignons de l'embouchure du Golfe. Nous constatons la même évolution lorsque nous observons les valeurs de conductivité des lagunes. Nicaragua, la lagune se trouvant le plus proche du Golfe, présente le profil de salinité le plus élevé. Chamorro, la plus éloignée du golfe suivant la rivière, présente le profil de salinité le plus faible. Cette observation appuie l'hypothèse de la recharge en eau saline par la rivière. En effet, lors des débordements de la rivière, plus une lagune est proche du golfe plus son profil salin sera important.

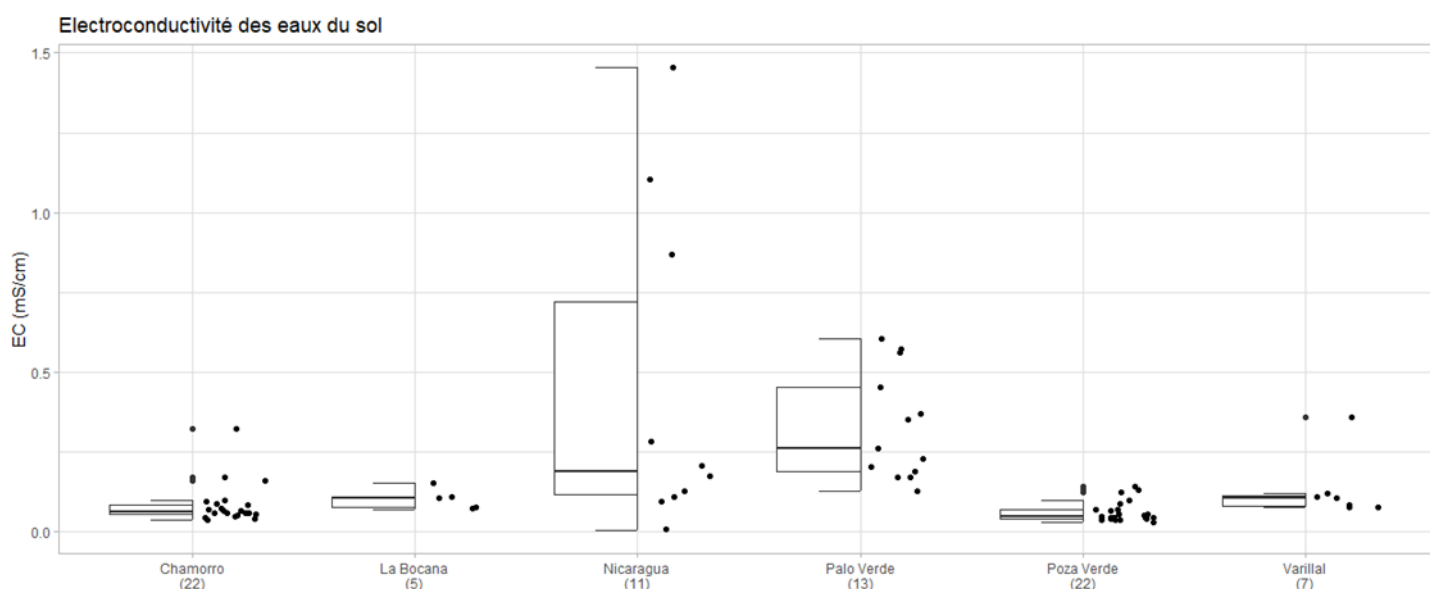


Figure 6 - 19 : Electroconductivité des eaux des sols échantillonnées lors de la campagne de terrain IDCS en septembre 2021 pour les six lagunes. Le nombre d'observations est indiqué entre parenthèse.

Tableau 6 - 2 : TABLEAU CROISEE DES P-VALEURS DU TEST DE MANN ET WHITNEY SUR LES VALEURS DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE LA CAMPAGNE IDCS.

	Poza Verde	Varillal	Chamorro	Palo Verde	Nicaragua	La Bocana
Poza Verde		0,0075	0,059	0,0000016	0,0014	0,016

Varillal	0,0075		0,013	0,0017	0,088	0,75
Chamorro	0,059	0,013		0,00000026	0,013	0,055
Palo Verde	0,0000016	0,0017	0,00000026		0,53	0,00047
Nicaragua	0,0014	0,088	0,013	0,53		0,099
La Bocana	0,016	0,75	0,055	0,00047	0,099	



Figure 6 - 21 : Emplacement des profils de conductivité électrique le long de la rivière Tempisque (Alonso, 2017).

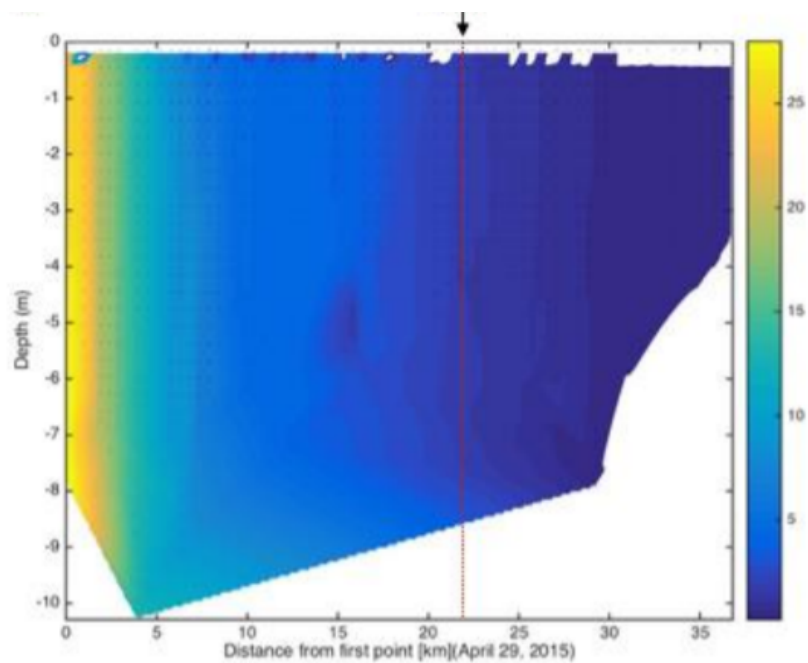


Figure 6 - 20 : Grille interpolée de profils de conductance spécifique dans le fleuve Tempisque. Conductance spécifique en mS/cm (Alonso, 2017).

6.2.2 Transect

La Campagne de terrain Transect (IDT) traverse de la lagune Palo Verde en partant de la station Tempisque (Figure 5-13). Cette campagne de terrain a été mise en place afin de montrer l'effet de la salinisation de la lagune par la proximité de la rivière Tempisque. Durant les périodes de débordements, la rivière se déverserait dans la lagune. Ainsi, plus nous nous trouvons à proximité de la rivière (perpendiculairement) plus la salinité est importante.

Le transect a une longueur de 1500 mètres. La première mesure a été réalisée au point 1 qui se situe à quelques mètres de la rivière Tempisque. Nous avons relevé un échantillon de sol tous les 75 mètres pour obtenir un totale de 20 échantillons de sol. Nous avons également mesuré la salinité de l'eau de surface pour un point sur deux, c'est à dire tous les 150 mètres. La figure 6-22 illustre la conductivité électrique des eaux de surface durant le transect. Nous remarquons que nous avons peu de variation de l'électroconductivité. L'échantillonnage s'est fait lorsqu'il pleuvait, ce qui explique cette faible variation et les valeurs de la salinité proche de 0. Nous notons une légère augmentation de la salinité lorsque nous nous rapprochons de Palo Verde.

La figure 6-23 représente la mesure de la salinité des eaux du sol du Transect. Ces mesures d'électroconductivité sont plus représentatives que la mesure de la salinité des eaux de surface car sont moins directement influencées par les eaux de pluies, les sols gardent en mémoire le taux de salinité plus longtemps que les eaux de surface. A proximité de la rivière Tempisque les valeurs de la conductivité électrique sont les plus élevées et elles diminuent progressivement lorsqu'on s'en éloigne. Cette observation peut révéler l'influence que la rivière a sur la salinisation de la lagune Palo Verde. Cependant, nous observons une remontée de la salinité sur les 300 derniers mètres à proximité du bord de la lagune Palo Verde. Une cause probable pouvant l'expliquer est la présence d'un *estero*. Ce dernier représente des flux préférentiels de surface durant lesquels les eaux plus salines du fleuve Tempisque atteignent plus rapidement certaines zones de la lagune. La topographie peut également jouer un rôle et expliquer ce phénomène de zones plus salines à certains endroits de la lagune. Des zones plus basses sont plus susceptibles de garder de l'eau stagnante et plus riche en sel.

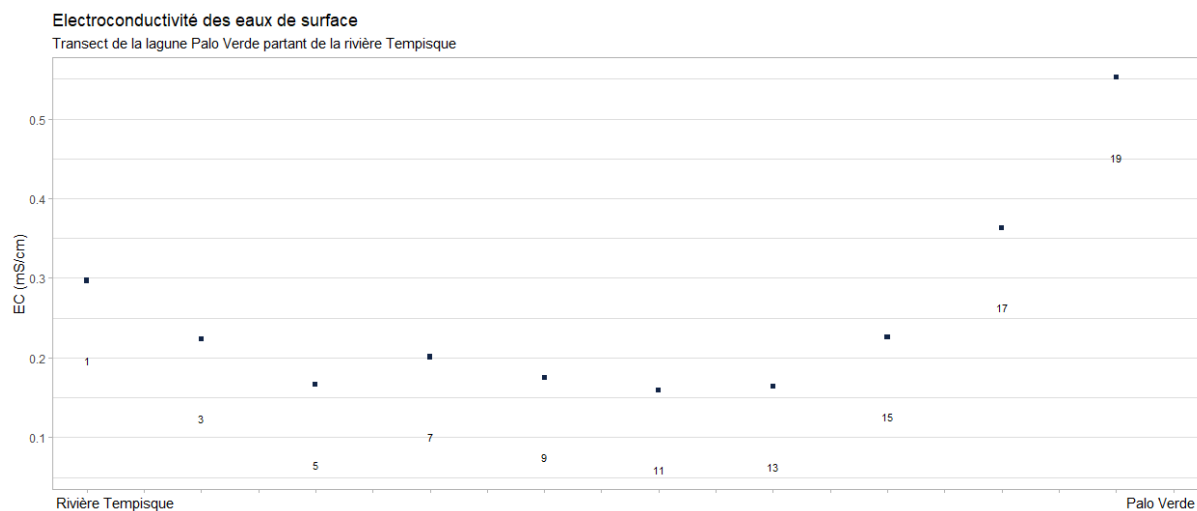


Figure 6 - 22 : Electroconductivité des eaux de surface du Transect partant de la rivière Tempisque jusqu'au niveau de la station Palo Verde. Chaque point est séparé approximativement de 150 mètres. Le transect à une longueur de 1500 mètres (Septembre 2021).

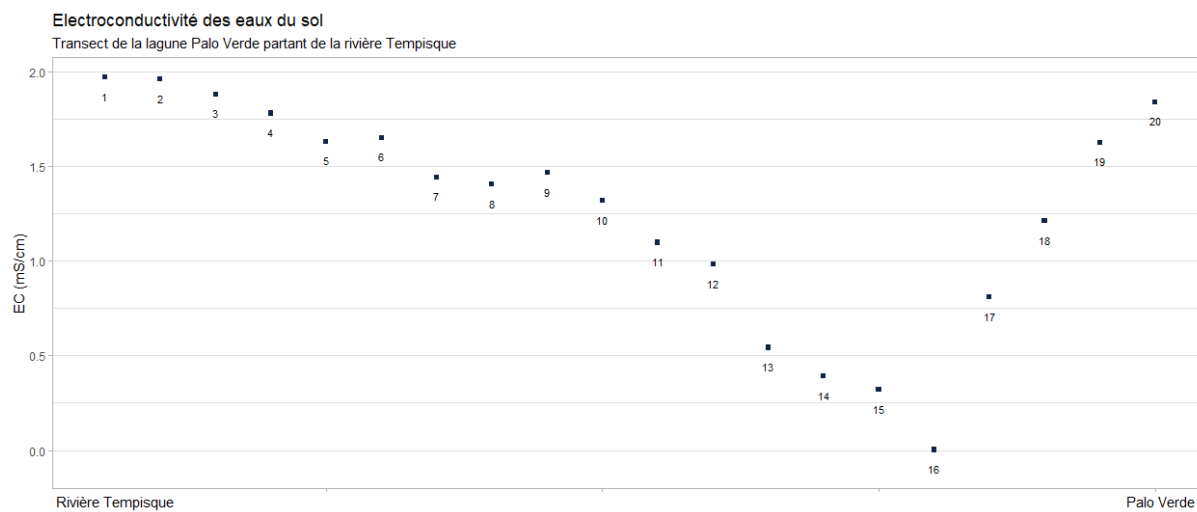


Figure 6 - 23: Electroconductivité des eaux du sol du transect partant de la rivière Tempisque jusqu'au niveau de la station Palo Verde. Chaque point est séparé approximativement de 75 mètres. Le transect à une longueur de 1500 mètres (Septembre 2021).

6.2.3. Evolution temporelle

La troisième campagne de terrain vise à étudier l'évolution temporelle de la salinité en un point fixe (figure 5-13) avec des mesures biquotidiennes (matin et soir) de la conductivité électrique de l'eau de surface (tableau 6-3). Durant les huit jours de suivi, la salinité a augmenté malgré des pluies intenses (Figure 6-24). Les données ne nous révèlent pas de moment de la journée plus susceptible d'avoir le taux de salinité plus haut. En d'autres termes, la salinité peut être plus importante le matin ou le soir qu'il y ait eu une période pluvieuse ou non.

En observant comment évolue la salinité en un point précis, nous avons pu constater que l'évolution de la salinité des eaux de surface dans la station Palo Verde montrait ce même comportement. Nous avons représenté l'évolution de l'électroconductivité du réseau de donnée pour la même période (15 au 25 septembre) avec les années 2016, 2017 et 2018 (Figure 6-26). Le moment de la journée (matin ou soir) n'influence pas la mesure de la salinité. La variation de la salinité entre le matin et le soir est, en effet, très faible. Cependant, les valeurs de salinité des eaux de surface du réseau présentent une électroconductivité plus importante. Cela est expliqué par la position du capteur située au niveau de sol tandis que les relevées de mesure de la campagne IDEt a été faite à une quinzaine de centimètres de la surface de l'eau. Puisque l'eau saline est plus dense, elle restera au fond de la colonne d'eau.

Sur les séries temporelles de 2016 et 2017, l'électroconductivité diminue aux files des jours tandis que les valeurs pour la campagne de terrain à tendance à augmenter. En ce qui concerne 2018, nous observons une baisse pour les premiers jours puis une remonté de la salinité. Cela montre que la conductivité varie d'une année à l'autre. Cependant, il est important de considérer les conditions météorologiques variables durant cette période qui expliqueraient ces tendances ascendantes et descendantes de la salinité d'une année à une autre. De plus, le nombre d'observations est faible et la période de mesure est courte (10 jours).

Tableau 6 - 3 : RELEVÉ DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE, LA TEMPÉRATURE ET LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUE POUR LA CAMPAGNE IDET-ÉVOLUTION TEMPORELLE D'UN POINT FIXE SITUÉ DANS LA LAGUNE PALO VERDE, PROCHE DE LA STATION DE RECHERCHE OTS.

date	EC [uS/cm]	Temp [°C]	Pr [cm]	Meteo	Heure
15092021	444	27,9	0	ensoleille	854
15092021	320	27,2	0	pluie	1805
16092021	345	26,9	0	ensoleille	828
16092021	310	29,6	0	ensoleille	1745
17092021	296	27,7	0	ensoleille	825
17092021	403	28,7	0	ensoleille	1835
18092021	455	29,1	0	ensoleille	848
18092021	466	28,3	0	ensoleille	1807
19092021	535	25,5	0	ensoleille	848
19092021	525	29,4	0	pluie	1800
20092021	550	28,7	0	ensoleille	800
20092021	560	29	0	ensoleille	1745
21092021	575	28,7	0	ensoleille	840
21092021	584	28,9	0	pluie	1758
22092021	591	28,8	0	ensoleille	908
22092021	688	29,2	0	ensoleille	1748
24092021	594	27,4	0	pluie	750
24092021	683	28,3	0	pluie	1732

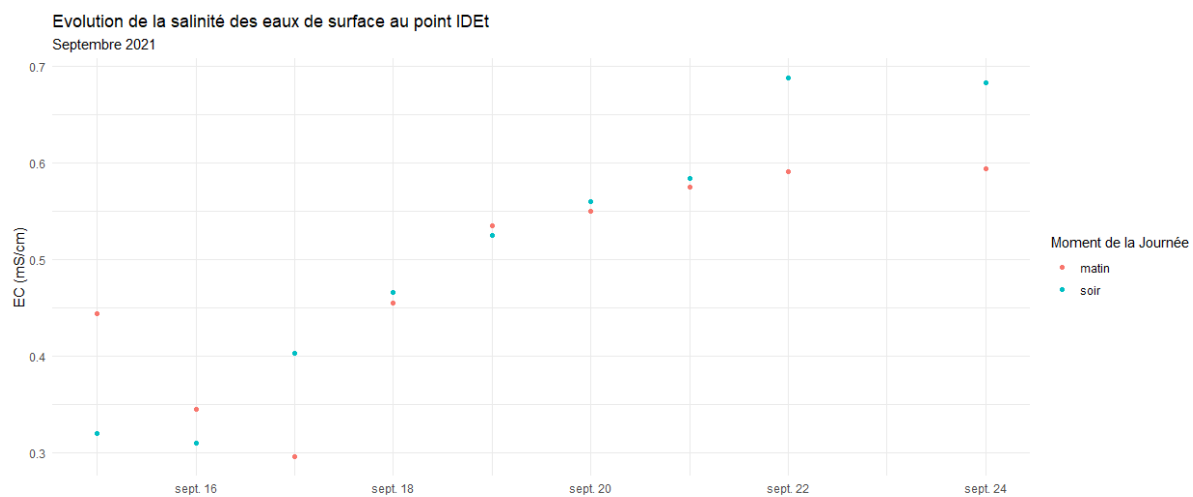


Figure 6 - 24 : Evolution de l'électroconductivité des eaux de surface en un point fixe localisé dans la lagune Palo Verde proche de la station de recherche OTS. Les mesures sont réalisées le matin (entre 7h30 et 9h) et le soir (entre 17h30 et 18h40).

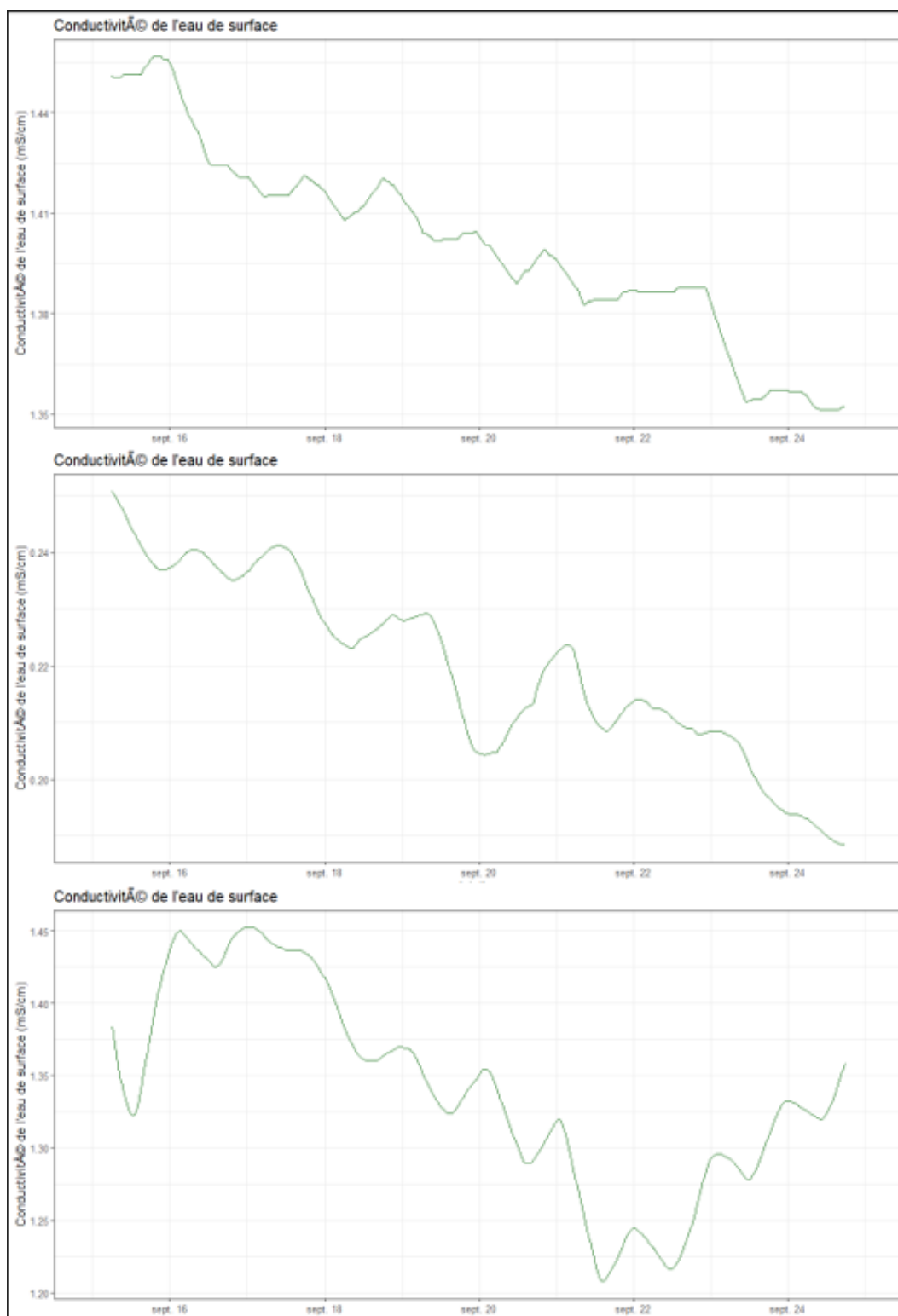


Figure 6 - 26 : Evolution de l'électroconductivité des eaux de surface de la station Palo Verde du 15 au 25 septembre pour l'année 2016, 2017 et 2018 respectivement.

6.2.4 Association entre *Typha* et salinité

Lors des campagnes de terrains nous avons relevé la présence ou non de *Typha* en chaque point de mesure et d'échantillonnage. La carte suivante (Figure 6-27), nous révèle les points de coordonnées avec *Typha* (points verts) et sans *Typha* (point gris). *Typha* se localise dans les lagunes La Bocana, Nicaragua et Palo Verde. Nicaragua et Palo Verde sont les lagunes qui présentaient le taux de salinité le plus élevé. Une salinité élevée semble plus susceptible d'indiquer la présence de *Typha*.

La figure 6-28 présente les données de salinité en fonction de la présence ou non de *Typha* sous forme de Boxplot. Les points de mesure pour lesquels *Typha* était présent montrent une médiane plus élevée. Dans des zones où la salinité est basse nous n'observons pas la présence de *Typha*.

Les deux lots de donnée (EC avec *Typha* et EC sans *Typha*) semblent avoir été construits de manière similaire, avec un peu moins d'observations pour le lot T ($n = 34$) que pour le lot NT ($n = 65$). Nous observons que l'électroconductivité médiane lorsque *Typha* est présente est supérieur à la médiane des données NT. Cela signifie que plus de trois quarts des points de mesure relevant la présence de *Typha* sont plus salins que la salinité médiane des points de mesure ne relevant pas la présence de *Typha*.

Afin de vérifier ces observations, nous réalisons le test de Mann et Whitney. La p-valeur est de $1.67e-05$ (< 0.05), elle est très faible et nous permet de rejeter l'hypothèse H_0 selon laquelle les données des deux lots proviennent de la même distribution. Ceci met en évidence la corrélation entre la présence de *Typha* et la salinité. Pour appuyer cette constatation, il serait intéressant de réaliser le même test avec des échantillons plus importants et de réussir à réaliser la mesure de la salinité sur d'avantage de zone du parc avec la présence de *Typha*.

Les points situés près de la rivière Tempisque relevé lors de la campagne IDT possèdent les valeurs de salinité les plus élevés mais ne présentent cependant pas la présence de *Typha*. Cela peut être interprété par le fait que *Typha* se développe mal lorsque l'eau atteint des taux trop importants de salinité. *Typha* gagne en prolifération par rapport aux zones qui sont en même temps inondées et présentant un taux de salinité important. Cependant, dans d'autres régions plus salines du parc, *Typha* perd la compétition face à l'arbuste Palo Verde, très présent dans la zone proche du fleuve Tempisque.

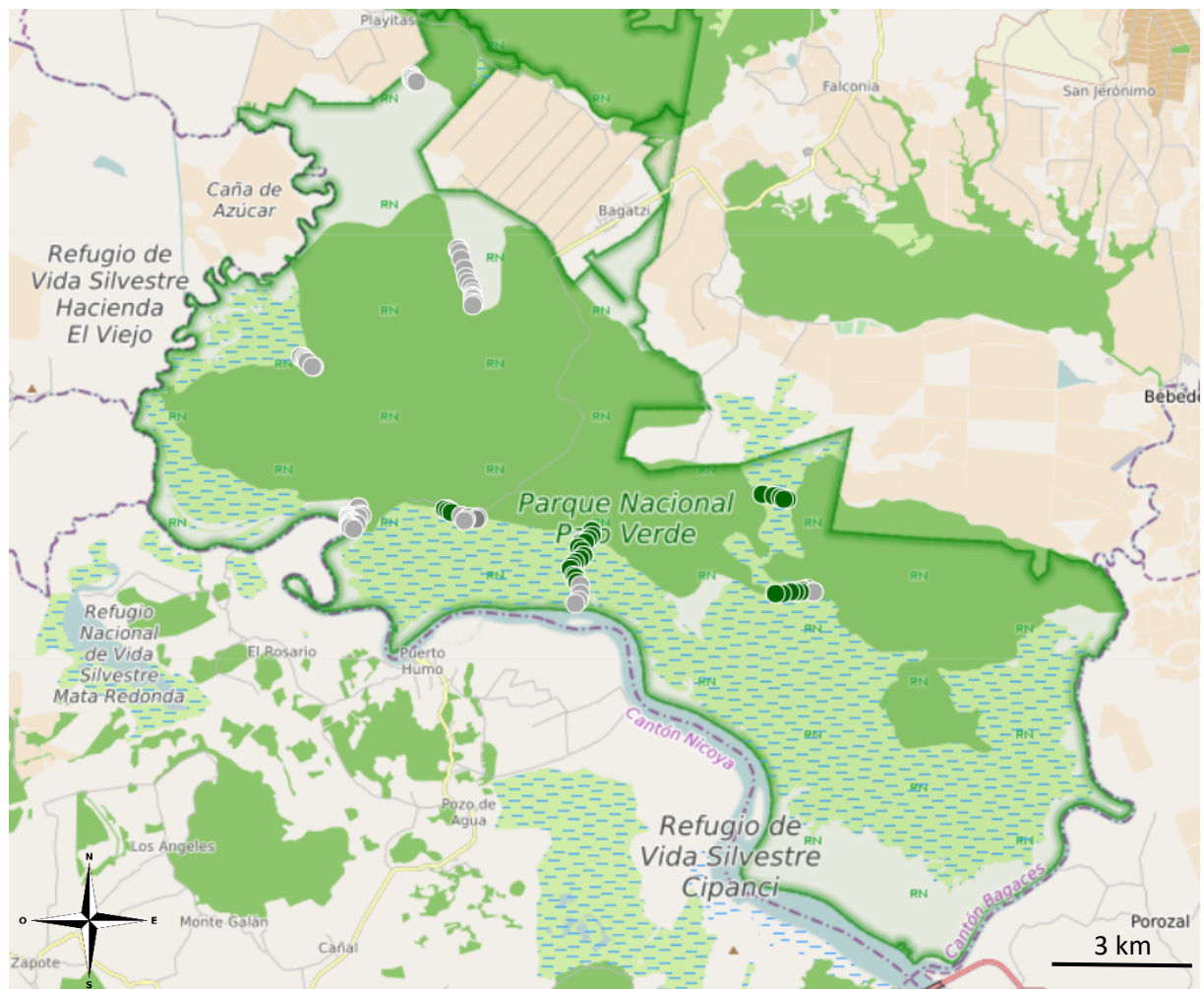


Figure 6 - 27 : Carte du Parc National Palo Verde. Les emplacements de mesure et d'échantillonnage des eaux et sols sont indiqués par un point vert (présence de Typha) et gris (absence de Typha) (Parque Nacional Palo Verde - uMap).

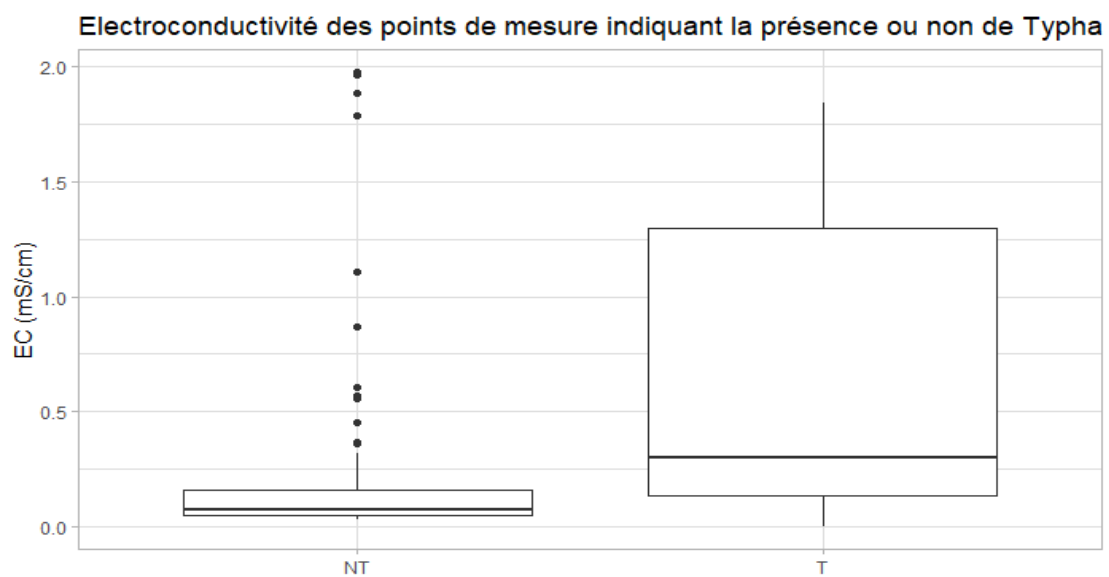


Figure 6 - 28 : Boxplot des points de mesure de l'électroconductivité. Le Boxplot NT représente les points pour lesquels il n'y avait pas la présence de Typha lors des mesures. Le Boxplot T représente les points pour lesquels il y avait la présence de Typha lors des mesures de salinité.

7. CONCLUSION

La zone humide du parc Palo Verde (Costa Rica) a subi des changements hydrologiques ces dernières décennies entraînant un déséquilibre dans l'écosystème, notamment la prolifération de la plante invasive *Typha domingensis*. L'objectif de ce mémoire était de contribuer à une meilleure compréhension du bilan hydrique et salin des six lagunes de la zone humide du parc. Cela s'est fait d'une part grâce à l'exploitation de la base de données qui nous a permis d'observer la dynamique des niveaux des eaux de la nappe et de surface des différentes stations. Et d'autre part, grâce aux campagnes de terrains menées en septembre 2021, nous avons pu apporter des données supplémentaires sur la salinité des lagunes à la base de données mais surtout améliorer la couverture des mesures en réalisant des prélèvements à 100 nouveaux emplacements (à comparer aux 4 points de mesures disponibles précédemment).

Les résultats obtenus lors des campagnes de terrains et les données déjà enregistrées dans la base de données nous ont permis de suivre les trois objectifs établis au début du travail. Ces objectifs nous ont conduit à différentes conclusions.

Dans un premier temps nous avons exploité la base de données hydrométéorologiques du parc, contenant des données sur le niveau des eaux de surface et souterraines, leur température et leur conductivité électrique au niveau des stations de mesures réparties dans les lagunes du parc. La plus grande partie des données débutait en 2013 pour le niveau des eaux et 2015 pour les données de l'électroconductivité. L'analyse des séries temporelles nous a fourni des informations sur le bilan hydrique. Les lagunes semblent présenter des comportements hydrologiques distincts, ce qui impliquerait que l'apport en eau du golfe et de la rivière Tempisque varie selon la zone. En général, l'hydrologie est fortement influencée par le cycle des saisons, avec une grande contribution des pluies lors de la saison humide. L'hydrologie des stations Chamorro, Varillal et Poza Verde est influencée par les débordements réguliers de la berge de la berge de la rivière Tempisque. On observe en effet des variations relativement importantes du niveau d'eau la présence de cycles biquotidiens dans les mesures du niveau des eaux souterraines. L'hypothèse selon laquelle l'hydrologie des stations la Bocana et Poza verde est influencée par des écoulements d'eaux des canaux d'irrigation est soutenue par la présence de nombreuses irrégularités interannuelles dans les niveaux d'eau. La rivière et les eaux du golfe semblent contribuer à l'hydropériode de la zone humide et les canaux d'irrigation semblent avoir une influence minime sur la dynamique des eaux.

Dans un second temps, nous avons interprété les séries temporelles de la salinité pour quelques stations. Les données de salinité sont plus chaotiques et présentent plus de bruit rendant leur étude plus difficile. Cependant, nous avons pu en sortir quelques informations. Les eaux de pluie alimentent les eaux de surface et diminuent le taux de salinité, ce taux est de ce fait différent de celui qu'on observe pour les eaux souterraines. Ces dernières contiennent des valeurs de salinité relativement importantes lorsque la station est victime des débordements de la rivière. Les canaux d'irrigation ne semblent pas contribuer significativement à l'augmentation de la salinité des eaux de surface ou souterraines.

Il est important de considérer que les données présentent beaucoup de bruit et que certaines données ne sont pas fiables (marquées comme "questionnables" dans la base de données) et doivent être considérées avec une attention particulière.

Grâce aux campagnes de terrain nous avons pu mesurer la salinité des eaux de surface et des sols en différents points des lagunes Nicaragua, La Bocana et Chamorro. Celles-ci nous permettent de comparer les lagunes entre elles. Il en ressort que les lagunes présentent semblent présenter des dynamiques de salinité distincte, malgré quelques similarités. Palo Verde et Nicaragua présentent notamment des dynamiques de salinités proches, celle-ci s'explique par le fait que leur source de salinité principale est l'eau de golfe se trouvant à proximité des deux sites. Lorsque nous nous éloignons de la rivière, le taux de salinité des eaux de surface et des sols ont tendance à diminuer. Afin d'apporter une meilleure interprétation quand à la dynamique de la salinité du parc il serait nécessaire de réaliser davantage de mesures. Une couverture plus importante permettrait de confirmer l'hypothèse d'hétérogénéité des lagunes et d'appuyer les hypothèses sur les sources probables de salinité.

Durant les études de terrain, la présence de *Typha* a été relevée. Ceci nous a permis d'étudier pour la première fois l'association entre la présence de *Typha* et les valeurs de salinité des eaux de surface et du sol au sein du parc. Malgré une quantité de données restreinte nous avons pu établir une corrélation entre la salinité et la présence de *Typha*. En effet, il semblerait que la zone plus saline présenterait une densité de *Typha* plus importante. Afin de confirmer cette hypothèse il serait pertinent de réaliser des mesures de salinité des sols et des eaux dans les zones où *Typha* est le plus abondante.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- Akhtar, N., Hameed, M., Nawaz, F., Ahmad, K. S., Hamid, A., Segovia-Salcedo, C., Shahnaz, M. M., Akhtar, N., Hameed, M., Nawaz, F., Ahmad, K. S., Hamid, A., Segovia-Salcedo, C., & Shahnaz, M. M. (2017). Leaf anatomical and biochemical adaptations in *Typha domingensis* Pers. Ecotypes for salinity tolerance. *Botanical Sciences*, 95(4), 807-821. <https://doi.org/10.17129/botsoci.886>
- Akhter, N., Aqeel, M., Shahnaz, M. M., Alnusairi, G. S. H., Alghanem, S. M., Kousar, A., Hashem, M., Kanwal, H., Alamri, S., Ilyas, A., Al-zoubi, O. M., & Noman, A. (2021a). Physiological homeostasis for ecological success of *Typha* (*Typha domingensis* Pers.) populations in saline soils. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(4), 687-701. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00963-x>
- Akhter, N., Aqeel, M., Shahnaz, M. M., Alnusairi, G. S. H., Alghanem, S. M., Kousar, A., Hashem, M., Kanwal, H., Alamri, S., Ilyas, A., Al-zoubi, O. M., & Noman, A. (2021b). Physiological homeostasis for ecological success of *Typha* (*Typha domingensis* Pers.) populations in saline soils. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(4), 687-701. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00963-x>
- Alliance SIDALC. (s. d.). Consulté 8 janvier 2022, à l'adresse <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=057887>
- Alonso, A. (2017). *Novel quantification of long-term hydrological and landscape spatiotemporal dynamics of coupled natural human systems : The case study of the tempsique-Palo Verde National Park Coastal wetland, Costa Rica.*
- Apfelbaum, S. (1985). Cattail (*Typha* spp.) Management. *Natural Areas Journal*, 5.
- Baptiste Crombé. (2019). *Estimation of the spatial and temporal variability of evapotranspiration in a wetland under hydro-ecological stress.* UCLouvain.

- Beare, P. A., & Zedler, J. B. (1987). Cattail invasion and persistence in a coastal salt marsh : The role of salinity reduction. *Estuaries*, 10(2), 165-170. <https://doi.org/10.2307/1352181>
- Boettinger, J. L. (1997). Aquisalids (Salorthids) and Other Wet Saline and Alkaline Soils : Problems Identifying Aquic Conditions and Hydric Soils. In *Aquic Conditions and Hydric Soils : The Problem Soils* (p. 79-97). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub50.c5>
- Brackish Marsh—Island Ecology 2012. (s. d.). Consulté 8 janvier 2022, à l'adresse <https://sites.google.com/site/islandecology12/ecosystems/brackish-marsh>
- Castellanet, C. (2019). *Etude pour l'évaluation des besoins pour le contrôle du Typha dans le delta du fleuve au Sénégal et en Mauritanie Rapport d'état des lieux et bilan des méthodes de lutte contre le typha.*
- Ceron, C. N., Melesse, A. M., Price, R., Dessu, S. B., & Kandel, H. P. (2015). Operational Actual Wetland Evapotranspiration Estimation for South Florida Using MODIS Imagery. *Remote Sensing*, 7(4), 3613-3632. <https://doi.org/10.3390/rs70403613>
- Chabbi, A., McKee, K. L., & Mendelssohn, I. A. (2000). Fate of oxygen losses from *Typha domingensis* (Typhaceae) and *Cladium jamaicense* (Cyperaceae) and consequences for root metabolism. *American Journal of Botany*, 87(8), 1081-1090. <https://doi.org/10.2307/2656644>
- Ciotir, C., & Freeland, J. (2016). Cryptic intercontinental dispersal, commercial retailers, and the genetic diversity of native and non-native cattails (*Typha* spp.) in North America. *Hydrobiologia*, 768. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2538-0>
- Convention sur les zones humides. (1971). *Les zones humides : Qu'est-ce que c'est ?*
- Cuina, T. A., Tianb, Y., Bettsa, S. A., & Chalm, R. (s. d.). *Wheat*.
- Daniels, A. (2004). PROTECTED AREA MANAGEMENT IN THE WATERSHED CONTEXT : A CASE STUDY OF PALO VERDE NATIONAL PARK, COSTA RICA. *undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/PROTECTED-AREA-MANAGEMENT-IN-THE-WATERSHED-CONTEXT%3A-Daniels/7fcf97b882e40598bd2f46bb191502f911c7e464>

- Davis, S. M. (1991). Growth, decomposition, and nutrient retention of *Cladium jamaicense* Crantz and *Typha domingensis* Pers. In the Florida Everglades. *Aquatic Botany*, 40(3), 203-224.
[https://doi.org/10.1016/0304-3770\(91\)90059-E](https://doi.org/10.1016/0304-3770(91)90059-E)
- Enrich-Prast, A., Suzuki, M., & BS, E. (2008). Allometric relations for *Typha domingensis* natural populations. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 20, 305-311.
- FLOREALPES : Comparaison de *Typha angustifolia* et *Typha domingensis*. (s. d.). Consulté 5 janvier 2022, à l'adresse
https://www.florealpes.com/comparaison.php?compar_code_1=typhaangustifolia&compar_code_2=typhaangusti&nouveau=1&PHPSESSID=dmee1fgj78rrbiil95qqjo0u47
- Gallant, A. L. (2015). The Challenges of Remote Monitoring of Wetlands. *Remote Sensing*, 7(8), 10938-10950. <https://doi.org/10.3390/rs70810938>
- Gell, P., Finlayson, M., & Davidson, N. (2016). Understanding change in the ecological character of Ramsar wetlands : Perspectives from a deeper time – synthesis. *Marine and Freshwater Research*, 67, 869. <https://doi.org/10.1071/MF16075>
- Glenn, E., Brown, J., & Blumwald, E. (1999). Salt Tolerance and Crop Potential of Halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences - CRIT REV PLANT SCI*, 18, 227-255.
<https://doi.org/10.1080/07352689991309207>
- Grace, J. B. (1987). The Impact of Preemption on the Zonation of Two *Typha* Species Along Lakeshores. *Ecological Monographs*, 57(4), 283-303. <https://doi.org/10.2307/2937088>
- Grace, J. B. (1989). Effects of Water Depth on *Typha Latifolia* and *Typha Domingensis*. *American Journal of Botany*, 76(5), 762-768. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1989.tb11371.x>
- Hameed, M., Basra, S., Naz, N., & Al-Qurainy, F. (2010). Anatomical adaptations of *Cynodon dactylon* (L.) Pers., from the salt range Pakistan, to salinity stress. I. Root and stem anatomy. *Pak. J. Bot*, 42, 279-289.
- Herbert, E. R., Boon, P., Burgin, A. J., Neubauer, S. C., Franklin, R. B., Ardón, M., Hopfensperger, K. N., Lamers, L. P. M., & Gell, P. (2015). A global perspective on wetland salinization : Ecological

- consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 6(10), art206.
<https://doi.org/10.1890/ES14-00534.1>
- James Arndt & Ryan Emmanuel. (2016). *Hydrology of Wetland and Related Soils* (Vol. 3, p. 40-100).
- Jimenez, J. (2001). *La cuenca del Río Tempisque : Perspectivas para un manejo integrado*.
- Jiménez-Rodríguez, C. D., Esquivel-Vargas, C., Coenders-Gerrits, M., & Sasa-Marín, M. (2019). Quantification of the Evaporation Rates from Six Types of Wetland Cover in Palo Verde National Park, Costa Rica. *Water*, 11(4), 674. <https://doi.org/10.3390/w11040674>
- Jolly, I. D., McEwan, K. L., & Holland, K. L. (2008). A review of groundwater–surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. *Ecohydrology*, 1(1), 43-58. <https://doi.org/10.1002/eco.6>
- Kaplan, D. A., & Muñoz-Carpena, R. (2014). Groundwater salinity in a floodplain forest impacted by saltwater intrusion. *Journal of Contaminant Hydrology*, 169, 19-36.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2014.04.005>
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland Ecology : Principles and Conservation*. Cambridge University Press.
- Keller, W. (2008). Wavelets in Geodesy and Geodynamics. In *Wavelets in Geodesy and Geodynamics*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110198188>
- Kirksey, E. (2012). Living with Parasites in Palo Verde National Park. *Environmental Humanities*, 1(1), 23-55. <https://doi.org/10.1215/22011919-3609958>
- Körner, T. W. (1989). *Fourier Analysis*. Cambridge University Press.
- Larsen, L. G., Moseman, S., Santoro, A., Hopfensperger, K., & Burgin, A. (2010). A complex-systems approach to predicting effects of sea level rise and nitrogen loading on nitrogen cycling in coastal wetland ecosystems. 67-92.
- Lévy, B., Matos, R., & Rodriguez, M. (1992). Les enjeux écologiques de Palo Verde (Costa Rica). *M@ppemonde*, 3, 33.

- Lim, T. K. (2016). *Typha domingensis*. In T. K. Lim (Éd.), *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants : Volume 12 Modified Stems, Roots, Bulbs* (p. 114-121). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-26065-5_5
- Macek, P., & Rejmánková, E. (2007). Response of emergent macrophytes to experimental nutrient and salinity additions. *Functional Ecology*, 21(3), 478-488. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01266.x>
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60.
- Miao, S.-L., Newman, S., & Sklar, F. (2000). Effects of habitat nutrients and seed sources on growth and expansion of *Typha domingensis*. *Aquatic Botany*, 68, 297-311.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00127-3)
- Miao, Z. (2007). *Biomass Estimates for Major Boreal Forest Species in West-Central Canada*.
- Michael Forsberg. (2018). *Success in the Salt Marsh*.
- Michael, J. (2016). *Wetland Soils, Genesis Hydrology Landscapes and Classification* (Second Edition).
- Mifsud, D. A., & Thomas, J. C. (2013). Persistence of herpetofauna in the urbanized rouge river ecosystem. *Open Journal of Ecology*, 3(3), 234-241. <https://doi.org/10.4236/oje.2013.33027>
- Miller, B. A., Crumpton, W. G., & van der Valk, A. G. (2009). Spatial distribution of historical wetland classes on the Des Moines Lobe, Iowa. *Wetlands*, 29(4), 1146-1152.
<https://doi.org/10.1672/08-158.1>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. John Wiley & Sons.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., Zhang, L., & Anderson, C. J. (2009). *Wetland Ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Monge Monge, A. A. (1999). *Estudio de la Dinámica del Bosque Seco Tropical a Través de Parcelas Permanentes de Muestreo en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste Costa Rica* [Gestion des données].

- Mora, J., & Castañeda, F. (2021). Nest site selection and nesting behavior of the mud turtle *Kinosternon scorpiodes* (Testudines, Kinosternidae) in Palo Verde National Park, Costa Rica : Implications for management. *Neotropical Biology and Conservation*, 16, 273-287. <https://doi.org/10.3897/neotropical.16.e60754>
- Naz, N., Hameed, M., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., & Arshad, M. (2010). Relationships between gas-exchange characteristics and stomatal structural modifications in some desert grasses under high salinity. *Photosynthetica*, 48(3), 446-456. <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0059-7>
- Newman, S., Grace, J. B., & Koebel, J. W. (1996). Effects of Nutrients and Hydroperiod on *Typha*, *Cladium*, and *Eleocharis* : Implications for Everglades Restoration. *Ecological Applications*, 6(3), 774-783. <https://doi.org/10.2307/2269482>
- Oliveira, J. P. V., Pereira, M. P., Duarte, V. P., Corrêa, F. F., Castro, E. M., & Pereira, F. J. (2018). Cadmium tolerance of *Typha domingensis* Pers. (Typhaceae) as related to growth and leaf morphophysiology. *Brazilian Journal of Biology*, 78(3), 509-516.
- Parkhurst, D. F. (1994). Diffusion of CO₂ and other gases inside leaves. *New Phytologist*, 126(3), 449-479. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04244.x>
- Parque Nacional Palo Verde—UMap. (s. d.). Consulté 10 janvier 2022, à l'adresse https://umap.openstreetmap.fr/fr/map/parque-nacional-palo-verde_656233#14/10.3335/-85.3186
- Perillo, G., Wolanski, E., Cahoon, D. R., & Hopkinson, C. S. (2018). *Coastal Wetlands : An Integrated Ecosystem Approach*. Elsevier.
- Plasencia Fraga, J. (2017). *Biología y ecología de las poblaciones de Typha domingensis en el embalse San Juan de la Sierra del Rosario, Cuba* José Miguel Plasencia Fraga.
- Popp, M. (1995). Salt Resistance in Herbaceous Halophytes and Mangroves. In H.-D. Behnke, U. Lüttge, K. Esser, J. W. Kadereit, & M. Runge (Éds.), *Progress in Botany : Structural Botany Physiology Genetics Taxonomy Geobotany/Fortschritte der Botanik Struktur Physiologie Genetik*

Systematik Geobotanik (p. 416-429). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79249-6_19

Qian, Y., Miao, S. L., Gu, B., & Li, Y. C. (2009). Effects of burn temperature on ash nutrient forms and availability from cattail (*Typha domingensis*) and sawgrass (*Cladium jamaicense*) in the Florida Everglades. *Journal of Environmental Quality*, 38(2), 451-464. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0126>

Résolution VI.1. (1996). *Principes Opérationnels du Registre de Montreux*.

RESSOURCES DES ZONES HUMIDES : état, tendances, services écosystémiques et capacité de restauration | Examen annuel de l'environnement et des ressources. (s. d.). Consulté 7 janvier 2022, à l'adresse <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>

Santos, K., Pereira, M., Ferreira, A., Rodrigues, L., Castro, E., Corrêa, F., & Pereira, F. (2015). *Typha domingensis* Pers. Growth responses to leaf anatomy and photosynthesis as influenced by phosphorus. *Aquatic Botany*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2015.01.007>

Sasa, M., Armengol, X., Bonilla, F., Mesquita-Joanes, F., Piculo, R., Rojo, C., Rueda, R., & Monrós, J. (2015). Seasonal wetlands in the Pacific coast of Costa Rica and Nicaragua : Environmental characterisation and conservation state. *Limnetica*, 34, 1-16.

Seun oladejo, O. (2018). *Treatment of Brackish Water by Three Macrophytes in Constructed Wetlands*. 191-197.

Sifton, H. (2011). The germination of light-sensitive seeds of *Typha latifolia* L. *Canadian Journal of Botany*, 37, 719-739. <https://doi.org/10.1139/b59-057>

Skarie, R. L., Richardson, J. L., McCarthy, G. J., & Maianu, A. (1987). Evaporite Mineralogy and Groundwater Chemistry Associated with Saline Soils in Eastern North Dakota. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1372-1377. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050050x>

- Smith, S. G. (1986). The Cattails (typha) : Interspecific Ecological Differences and Problems of Identification. *Lake and Reservoir Management*, 2(1), 357-362.
<https://doi.org/10.1080/07438148609354657>
- Smith, S. M., Garrett, P. B., Leeds, J. A., & McCormick, P. V. (2000). Evaluation of digital photography for estimating live and dead aboveground biomass in monospecific macrophyte stands. *Aquatic Botany*, 67(1), 69-77. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00085-6)
- Smith, S. M., & Newman, S. (2001). Growth of southern cattail (*Typha domingensis* pers.) Seedlings in response to fire-related soil transformations in the northern Florida Everglades. *Wetlands*, 21(3), 363-369. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2001\)021\[0363:GOSCTD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2001)021[0363:GOSCTD]2.0.CO;2)
- Soil Science Society of America Journal* : Vol 44, No 5. (s. d.). Consulté 6 janvier 2022, à l'adresse <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/toc/14350661/1980/44/5>
- Taureau, F., & Daniel, I. (2019). *Etude préliminaire sur les modalités de gestion des milieux humides de la Guadeloupe face à leur envahissement par T. domingensis* Daniel Imbert & Florent Taureau.
- The Organization for Tropical Studies (OTS)*. (s. d.). Consulté 7 janvier 2022, à l'adresse <https://tropicalstudies.org/>
- Thiam, A. (2012). *Etude de la flore vasculaire, de la végétation et des macrophytes aquatiques proliférants dans le Delat du fleuve Sénégal et le Lac de Guiers (Sénégal)*.
<http://bibnum.ucad.sn/viewer.php?c=ths&d=THS-7558>
- Trama, F., Rizo-Patrón, F., Kumar, A., Gonzalez, E., & Somma, D. (2009). Wetland Cover Types and Plant Community Changes in Response to Cattail-Control Activities in the Palo Verde Marsh, Costa Rica. *Ecological Restoration*, 27, 278-289. <https://doi.org/10.3368/er.27.3.278>
- Tufail, A., Aqeel, M., Khalid, N., Ahsan, M., Khilji, S. A., Ahmad, F., Hameed, M., Noman, A., Alamri, S., & Hashem, M. (2020). SALT TOXICITY IN A NATURAL HABITAT INDUCES STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODIFICATIONS AND MODULATE METABOLISM IN BERMUDA GRASS (*CYNODON DACTYLON* [L.] PERS.) ECOTYPES. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(5), 6569-6588. https://doi.org/10.15666/aeer/1805_65696588

- Typha domingensis*—*Massette australe*. (s. d.). Consulté 3 janvier 2022, à l'adresse <https://www.genialvegetal.net/-Massette-australe->
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. (s. d.). *Why do we have spring tides in the fall?* Consulté 10 janvier 2022, à l'adresse <https://oceanservice.noaa.gov/facts/springtide.html>
- van Rijn, L. C. (2011). Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part I : Tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dynamics*, 61(11), 1719-1741. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0453-0>
- Varnell, C., Thawaba, S., & Solis, M. (2010). *Typha Domingensis*—A Potential Tool for Bioremediation of Wetlands as Relevant to Environmental Forensics : A Case Study from Palo Verde, Costa Rica. *Environmental Forensics - ENVIRON FORENSICS*, 11, 102-107. <https://doi.org/10.1080/15275920903558364>
- Waylen, P. R., Quesada, M. E., & Caviedes, C. N. (1996). Temporal and Spatial Variability of Annual Precipitation in Costa Rica and the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 16(2), 173-193. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199602\)16:2<173::AID-JOC12>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199602)16:2<173::AID-JOC12>3.0.CO;2-R)
- Wester, S. J., Grimson, R., Minotti, P. G., Booij, M. J., & Brugnach, M. (2018). Hydrodynamic modelling of a tidal delta wetland using an enhanced quasi-2D model. *Journal of Hydrology*, 559, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.014>
- Whigham, D. F., Jordan, T. E., & Miklas, J. (1989). Biomass and Resource Allocation of *Typha angustifolia* L. (Typhaceae) : The Effect of within and between Year Variations in Salinity. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 116(4), 364-370. <https://doi.org/10.2307/2996626>
- White, S. D., & Ganf, G. G. (1998). The influence of convective flow on rhizome length in *Typha domingensis* over a water depth gradient. *Aquatic Botany*, 62(1), 57-70. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00077-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00077-1)

- Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2011). The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy & Environmental Science*, 4(8), 2669-2681. <https://doi.org/10.1039/C1EE01029H>
- Williams, W. D. (2001). Anthropogenic salinisation of inland waters. In J. M. Melack, R. Jellison, & D. B. Herbst (Éds.), *Saline Lakes : Publications from the 7th International Conference on Salt Lakes, held in Death Valley National Park, California, U.S.A., September 1999* (p. 329-337). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2934-5_30
- Woolson, R. F. (2008). Wilcoxon Signed-Rank Test. In *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials* (p. 1-3). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct979>

ANNEXES

Annexe A : Convention Ramsar relative aux zone humides

Article 1 et 2

Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau

Ramsar, Iran, 2.2.1971
telle qu'amendée par le protocole du 3.12.1982
et les amendements de Regina du 28.5.1987

Paris, le 13. juillet 1994
Directeur de l'Office des Normes internationales et des Affaires juridiques
Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)

Les Parties contractantes,

RECONNAISSANT l'interdépendance de l'Homme et de son environnement;

CONSIDÉRANT les fonctions écologiques fondamentales des zones humides en tant que régulateurs du régime des eaux et en tant qu'habitats d'une flore et d'une faune caractéristiques et, particulièrement, des oiseaux d'eau;

CONVAINCUES que les zones humides constituent une ressource de grande valeur économique, culturelle, scientifique et récréative, dont la disparition serait irréparable;

DÉSIREUSES d'enrayer, à présent et dans l'avenir, les empiétements progressifs sur ces zones humides et la disparition de ces zones;

RECONNAISSANT que les oiseaux d'eau, dans leurs migrations saisonnières, peuvent traverser les frontières et doivent, par conséquent, être considérés comme une ressource internationale;

PERSUADÉES que la conservation des zones humides, de leur flore et de leur faune peut être assurée en conjuguant des politiques nationales à long terme à une action internationale coordonnée;

Sont convenues de ce qui suit:

Article Premier

1. Au sens de la présente Convention, les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres.

2. Au sens de la présente Convention, les oiseaux d'eau sont les oiseaux dont l'existence dépend, écologiquement, des zones humides.

Article 2

1. Chaque Partie contractante devra désigner les zones humides appropriées de son territoire à inclure dans la Liste des zones humides d'importance internationale, appelée ci-après, "la Liste", et qui est tenue par le Bureau institué en vertu de l'article 8. Les limites de chaque zone humide devront être décrites de façon précise et reportées sur une carte, et elles pourront inclure des zones de rives ou de côtes adjacentes à la zone humide et des îles ou des étendues d'eau marine d'une profondeur supérieure à six mètres à marée basse, entourées par la zone humide, particulièrement lorsque ces zones, îles ou étendues d'eau ont de l'importance en tant qu'habitat des oiseaux d'eau.

2. Le choix des zones humides à inscrire sur la Liste devrait être fondé sur leur importance internationale au point de vue écologique, botanique, zoologique, limnologique ou hydrologique. Devraient être inscrites, en premier lieu, les zones humides ayant une importance internationale pour les oiseaux d'eau en toutes saisons.

3. L'inscription d'une zone humide sur la Liste est faite sans préjudice des droits exclusifs de souveraineté de la Partie contractante sur le territoire de laquelle elle se trouve située.

4. Chaque Partie contractante désigne au moins une zone humide à inscrire sur la Liste au moment de signer la Convention ou de déposer son instrument de ratification ou d'adhésion conformément aux dispositions de l'article 9.

5. Toute Partie contractante a le droit d'ajouter à la Liste d'autres zones humides situées sur son territoire, d'étendre celles qui sont déjà inscrites, ou, pour des raisons pressantes d'intérêt national, de retirer de la Liste ou de réduire l'étendue des zones humides déjà inscrites et, le plus rapidement possible, elle informe de ces modifications l'organisation ou le gouvernement responsable des fonctions du Bureau permanent spécifiées par l'article 8.

6. Chaque Partie contractante tient compte de ses engagements, sur le plan international, pour la conservation, la gestion, et l'utilisation rationnelle des populations migratrices d'oiseaux d'eau, tant lorsqu'elle désigne les zones humides de son territoire à inscrire sur la Liste que lorsqu'elle exerce son droit de modifier ses inscriptions.

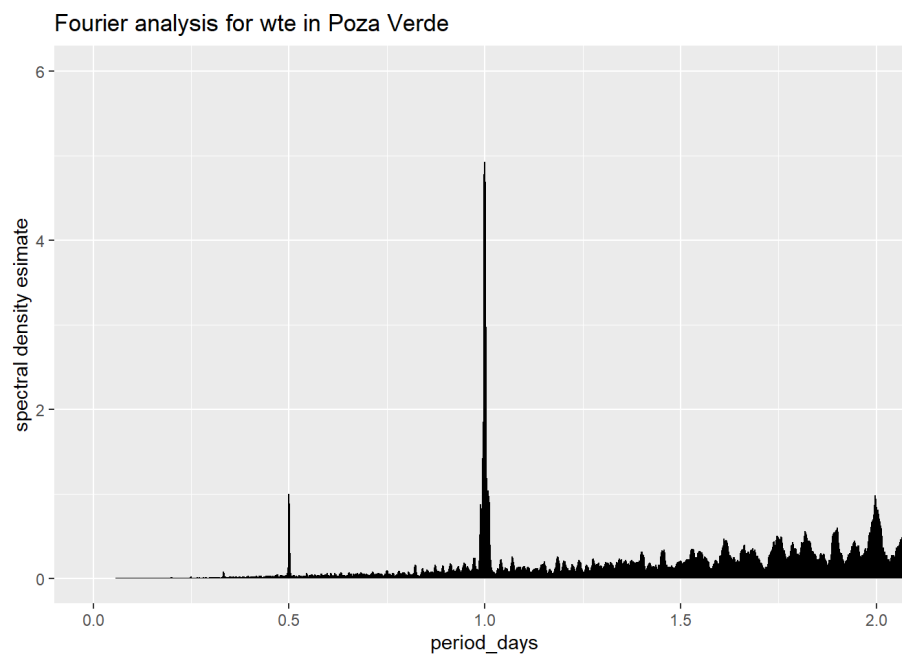
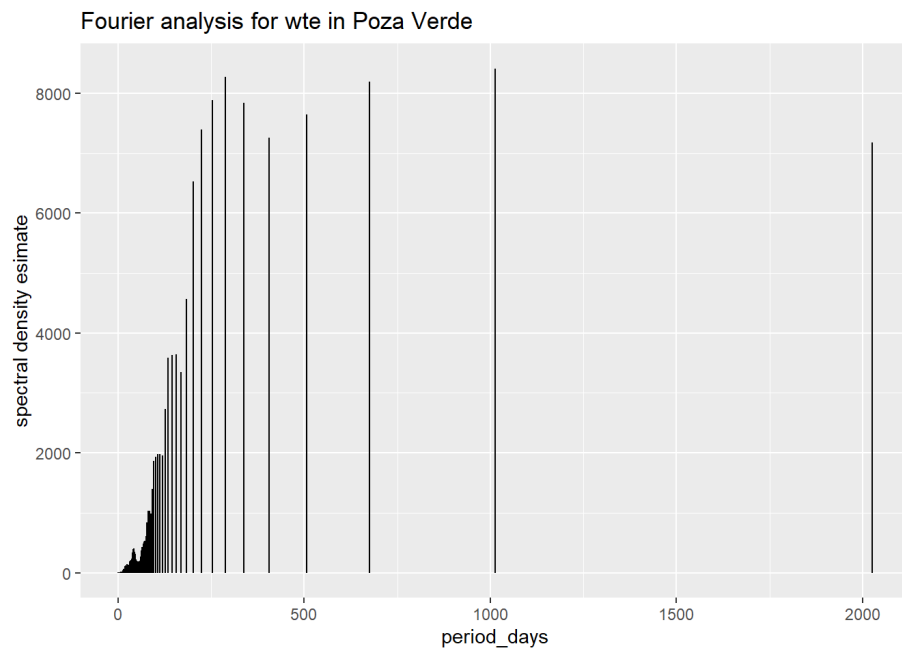
Article 3

1. Les Parties contractantes élaborent et appliquent leurs plans d'aménagement de façon à favoriser la conservation des zones humides inscrites sur la Liste et, autant que possible, l'utilisation rationnelle des zones humides de leur territoire.

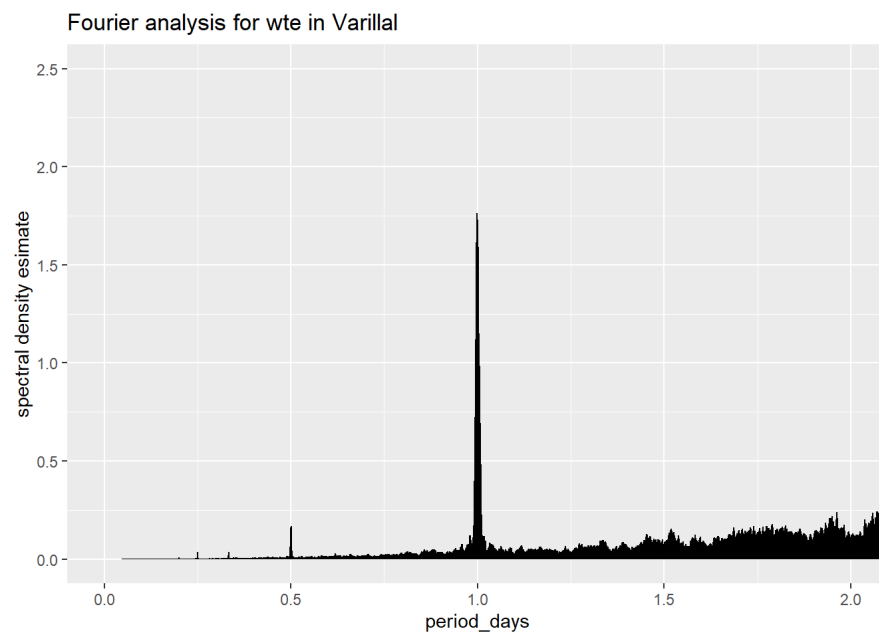
2. Chaque Partie contractante prend les dispositions nécessaires pour être informée dès que possible des modifications des caractéristiques écologiques des zones humides situées sur son territoire et inscrites sur la Liste, qui se sont produites, ou sont en train ou susceptibles de se produire, par suite d'évolutions technologiques, de pollution ou d'une autre intervention humaine. Les informations sur de telles modifications seront transmises sans délai à l'organisation ou au gouvernement responsable des fonctions du Bureau permanent spécifiées à l'article 8.

Annexe B : Périodogramme de l'analyse de Fourier sur les données des niveaux des eaux souterraine

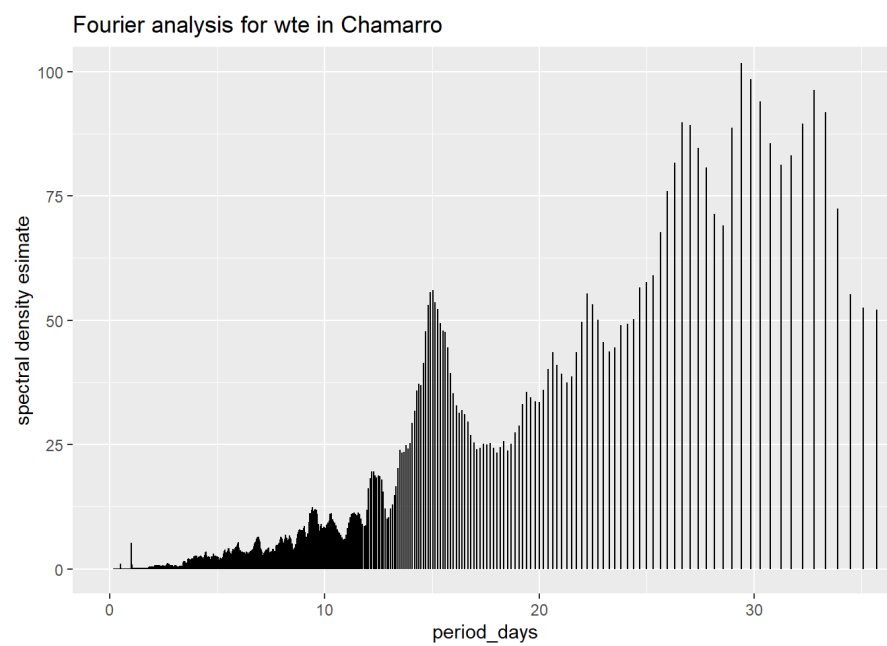
Station Poza Verde (Analyse brute)



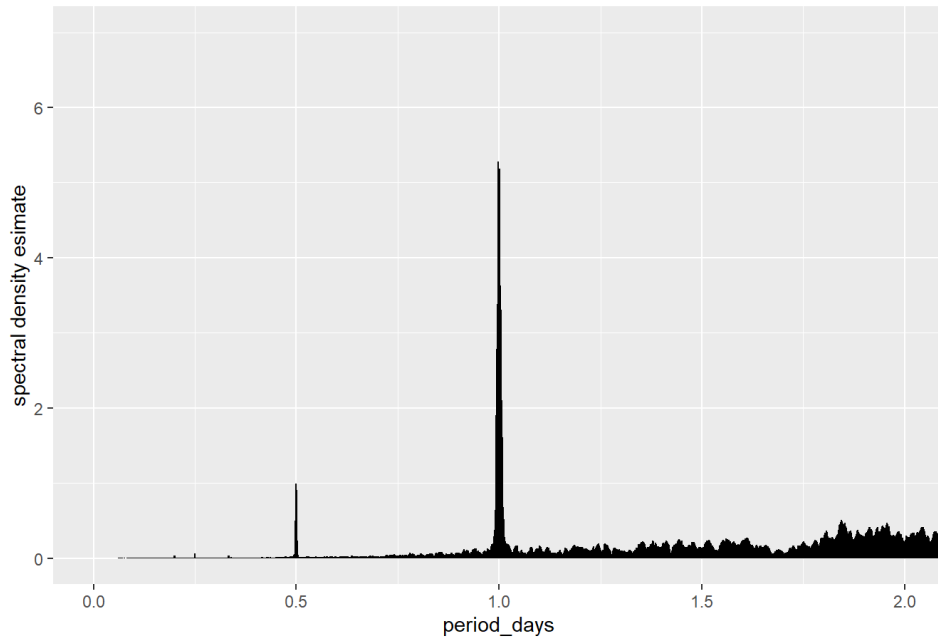
Station Varillal (analyse brute)



Station Chamorro (analyse brute)

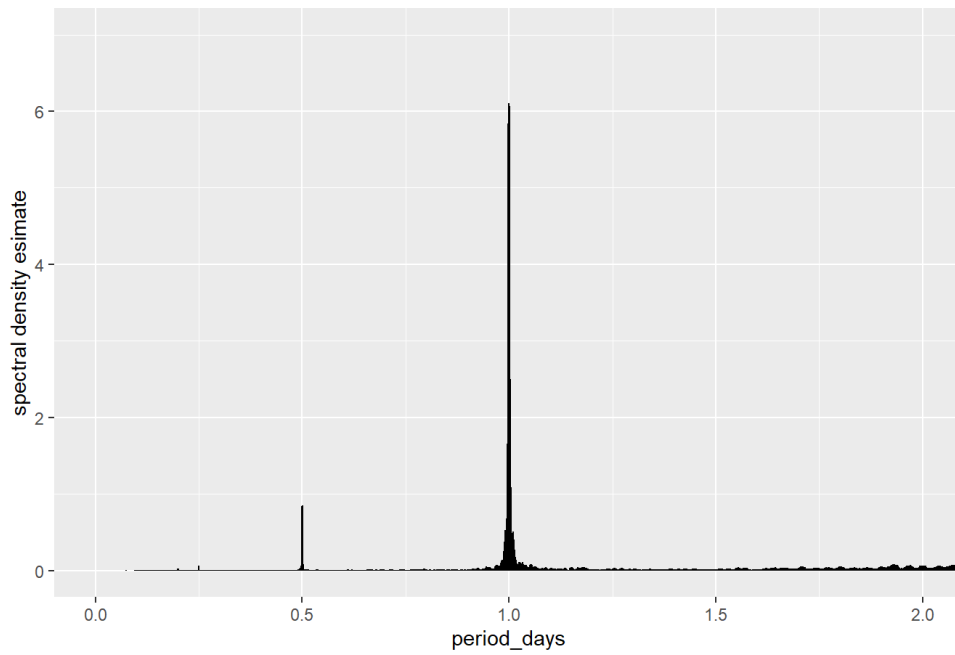


Fourier analysis for wte in Chamarro

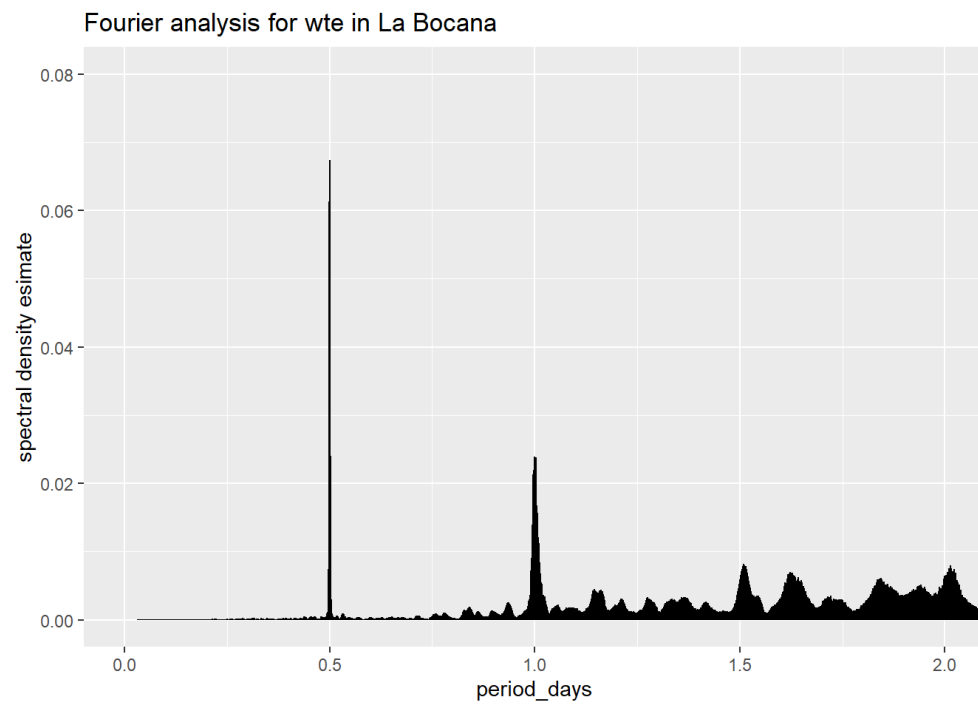


Station Palo Verde (analyse brute)

Fourier analysis for wte in Palo Verde



Station La Bocana (analyse brute)



Annexe C : Mesures et observations relevées durant les trois campagnes de terrain

Campagne Couverture Spatiale_IDCS

N	lagune	Date	Heure	Localisation	EC [uS/cm]	Temp [°C]	Pr [cm]	Tur	Typha	Type de vég (R= 10 m)	Ech Eau	meteo	pluie (Apr/N uit)
1	Chamorro	15092021	946	10,34157 -85,36514	169	27.1	0	B	NT	VL LA PR	1	ensoleille	1
1	Chamorro	15092021	946	10,34157 -85,36514	165.9	27.1	10	B	NT	VL LA PR	1	ensoleille	1
1	Chamorro	15092021	946	10,34157 -85,36514	165.1	27.3	20	B	NT	VL LA PR	1	ensoleille	1
2	Chamorro	15092021	957	10,34186 -85,36532	176	27.6	0	B	NT	LA	0	ensoleille	1
3	Chamorro	15092021	1009	10,34183 -85,36595	80.9	35.8	0	L	NT	EE H	1	ensoleille	1
4	Chamorro	15092021	1021	10,34223 -85,36588	89.8	30.2	0	BL	NT	PS CP	0	ensoleille	1
4	Chamorro	15092021	1021	10,34223 -85,36588	86.3	31.4	10	BL	NT	PS CP	0	ensoleille	1
5	Chamorro	15092021	1029	10,34253 -85,366	178	26.8	0	BR	NT	NP PR PS	0	ensoleille	1
5	Chamorro	15092021	1029	10,34253 -85,366	156.5	26.7	10	BR	NT	NP PR PS	0	ensoleille	1
6	Palo Verde	15092021	1056	10,34397 -85,34162	685	27.3	0	C	NT	SA LA PR	0	ensoleille	1
6	Palo Verde	15092021	1056	10,34397 -85,34162	672	27.3	10	C	NT	SA LA PR	0	ensoleille	1
6	Palo Verde	15092021	1056	10,34397 -85,34162	668	27.5	20	C	NT	SA LA PR	0	ensoleille	1
6	Palo Verde	15092021	1056	10,34397 -85,34162	655	27.7	30	C	NT	SA LA PR	0	ensoleille	1
6	Palo Verde	15092021	1056	10,34397 -85,34162	630	28.1	40	C	NT	SA LA PR	0	ensoleille	1
7	Palo Verde	15092021	1109	10,34391 -85,34159	675	27.4	0	C	T	NP MR	1	ensoleille	1
7	Palo Verde	15092021	1109	10,34391 -85,34159	678	28	10	C	T	NP MR	1	ensoleille	1
7	Palo Verde	15092021	1109	10,34391 -85,34159	660	28.7	20	C	T	NP MR	1	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	655	27	0	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	651	27	10	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	654	27	20	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	653	27.3	30	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	651	27.4	40	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	651	27.6	50	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
8	Palo Verde	15092021	1119	10,34361 -85,34174	647	28.8	60	C	NT	EC TG	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	693	27.1	0	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	727	27.1	10	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	712	27.1	20	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	727	27.5	30	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	723	27.6	40	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
9	Palo Verde	15092021	1133	10,34328 -85,342	750	30.3	50	TN	NT	NP PR AS	0	ensoleille	1
10	Pozo Verde	15092021	1419	10,38732 -85,34026	95.9	27.9	0	C	NT	PasAqua	0	pluie	1
11	Pozo Verde	15092021	1426	10,3875 -85,34021	97.2	28.2	0	B	NT	AS	0	pluie	1
11	Pozo Verde	15092021	1426	10,3875 -85,34021	97.2	28.2	10	B	NT	AS	0	pluie	1
11	Pozo Verde	15092021	1426	10,3875 -85,34021	97.2	28.2	20	B	NT	AS	0	pluie	1
12	Pozo Verde	15092021	1437	10,38792 -85,34036	109	28	0	C	NT	CA	0	pluie	1
12	Pozo Verde	15092021	1437	10,38792 -85,34036	109	28	10	C	NT	CA	0	pluie	1
12	Pozo Verde	15092021	1437	10,38792 -85,34036	109	28	20	C	NT	CA	0	pluie	1

13	Poza Verde	15092021	1445	10,38858 -85,34029	92.5	27.4	0	C	NT	PasAqua	0	pluie	1
13	Poza Verde	15092021	1445	10,38858 -85,34029	93	27.4	10	C	NT	PasAqua	0	pluie	1
14	Poza Verde	15092021	1453	10,38899 -85,34037	110	27.6	0	C	NT	TG VL NP	0	pluie	1
14	Poza Verde	15092021	1453	10,38899 -85,34037	108	27.6	10	C	NT	TG VL NP	0	pluie	1
14	Poza Verde	15092021	1453	10,38899 -85,34037	107.8	27.6	20	C	NT	TG VL NP	0	pluie	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85	25.1	0	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85	25.1	10	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85.2	25.1	20	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85.1	25.1	30	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85.2	25.1	40	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85.3	25.1	50	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
15	Poza Verde	16092021	1004	10,38938 -85,34041	85.3	25.1	60	BC	NT	PR	1	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	85.6	25.4	0	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	85.6	25.4	10	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	85.6	25.4	20	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	85.9	25.4	30	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	86	25.5	40	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
16	Poza Verde	16092021	1014	10,3898 -85,34059	86.2	25.6	50	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
17	Poza Verde	16092021	1023	10,39083 -85,34077	94.8	25.4	0	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
17	Poza Verde	16092021	1023	10,39083 -85,34077	94.7	25.4	10	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
17	Poza Verde	16092021	1023	10,39083 -85,34077	94.6	25.4	20	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
17	Poza Verde	16092021	1023	10,39083 -85,34077	94.4	25.4	30	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
17	Poza Verde	16092021	1023	10,39083 -85,34077	94.4	25.4	40	BC	NT	AS	0	ensoleille	1
18	Poza Verde	16092021	1033	10,3919 -85,3413	91.4	25.4	0	C	NT	AS	0	ensoleille	1
18	Poza Verde	16092021	1033	10,3919 -85,3413	91.7	25.4	10	C	NT	AS	0	ensoleille	1
18	Poza Verde	16092021	1033	10,3919 -85,3413	92.5	25.4	20	C	NT	AS	0	ensoleille	1
18	Poza Verde	16092021	1033	10,3919 -85,3413	92.5	25.6	30	C	NT	AS	0	ensoleille	1
18	Poza Verde	16092021	1033	10,3919 -85,3413	92.1	25.6	40	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	78.5	25.8	0	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	78.5	25.8	10	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	81.5	26	20	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	81.5	26	30	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	81.5	26.1	40	C	NT	AS	0	ensoleille	1
19	Poza Verde	16092021	1043	10,39277 -85,34164	81.3	26.1	50	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.4	25.7	0	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.4	25.7	10	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.4	25.7	20	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.4	25.7	30	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.3	25.7	40	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.3	25.7	50	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.3	25.7	60	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	75.9	25.7	70	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	75.9	25.7	80	C	NT	AS	0	ensoleille	1
20	Poza Verde	16092021	1100	10,39454 -85,34225	76.3	26.2	90	C	NT	AS	0	ensoleille	1
21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.8	25.8	0	B	NT	NA	0	ensoleille	1
21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.6	25.8	10	B	NT	NA	0	ensoleille	1

21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.7	25.8	20	B	NT	NA	0	ensoleille	1
21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.7	26	30	B	NT	NA	0	ensoleille	1
21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.7	26.1	40	B	NT	NA	0	ensoleille	1
21	Poza Verde	16092021	1120	10,39654 -85,34279	80.6	26.1	50	B	NT	NA	0	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	92.6	26.7	0	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	92.8	26.5	10	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	92.8	26.5	20	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	93	27.7	30	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	93.4	27.7	40	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	93.1	27.7	50	B	NT	NA	1	ensoleille	1
22	Poza Verde	16092021	1136	10,39814 -85,34334	93.1	27.7	60	B	NT	NA	1	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91	26.4	0	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.2	26.4	10	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.3	26.4	20	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.3	26.4	30	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.5	26.4	40	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.6	26.4	50	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.6	26.4	60	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.6	26.4	70	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.6	26.4	80	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	91.7	27.2	90	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
23	Poza Verde	16092021	1148	10,39859 -85,34331	93	27.2	100	C	NT	BG NP TG	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	91	26.3	0	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	91.1	26.3	10	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	91.3	26.3	20	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	92	26.3	30	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	92.4	26.3	40	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	92.6	26.3	50	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	92.6	26.3	60	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	93	27.3	70	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
24	Poza Verde	16092021	1200	10,39876 -85,34354	92.9	27.3	80	C	NT	TG NP	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	90.6	25	0	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	90.7	25	10	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	90.8	25	20	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	90.9	25	30	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91	25	40	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.1	25	50	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.1	26.3	60	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.2	26.3	70	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.3	26.3	80	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.7	26.7	90	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	91.9	27.1	100	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	93.4	27.1	110	C	NT	TG	0	ensoleille	1
25	Poza Verde	16092021	1207	10,3988 -85,34352	93.7	27.1	120	C	NT	TG	0	ensoleille	1
26	Nicaragua	17092021	1000	10,32863 -85,26968	671	32	0	C	NT	NA	1	ensoleille	0
27	Nicaragua	17092021	1015	10,32909 -85,27133	366	28	0	B	NT	PR LA TG	0	ensoleille	0

28	Nicaragua	17092021	1025	10,32898 -85,27202	240	27.5	0	C	T	NA	0	ensoleille	0
29	Nicaragua	17092021	1038	10,32898 -85,27217	235	28.1	0	C	T	NA	0	ensoleille	0
30	Nicaragua	17092021	1047	10,32928 -85,27108	1200	27.1	0	C	T	PA PR	0	ensoleille	0
31	Nicaragua	17092021	1059	10,3286 -85,26975	601	29	0	B	NT	PR PA TG NP	0	ensoleille	0
32	La Bocana	17092021	1129	10,34765 -85,27523	161	28.5	0	C	T	PR TG VL CA	1	ensoleille	0
32	La Bocana	17092021	1129	10,34765 -85,27523	162	28.5	10	C	T	PR TG VL CA	1	ensoleille	0
32	La Bocana	17092021	1129	10,34765 -85,27523	167	28.5	20	C	T	PR TG VL CA	1	ensoleille	0
32	La Bocana	17092021	1129	10,34765 -85,27523	171	28.6	30	C	T	PR TG VL CA	1	ensoleille	0
33	La Bocana	17092021	1149	10,34785 -85,27577	134.5	28.3	0	C	T	TG NN PB	0	ensoleille	0
33	La Bocana	17092021	1149	10,34785 -85,27577	135.1	28.4	10	C	T	TG NN PB	0	ensoleille	0
34	La Bocana	17092021	1201	10,34805 -85,27661	126.1	28.5	0	C	T	NN TG PA	0	ensoleille	0
34	La Bocana	17092021	1201	10,34805 -85,27661	126.4	28.7	10	C	T	NN TG PA	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.1	28.6	0	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.1	28.6	10	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.3	28.6	20	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.4	28.6	30	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.4	28.6	40	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
35	La Bocana	17092021	1208	10,34828 -85,27809	128.5	28.8	50	B	T	TG PS	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	116.4	28.6	0	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	116.6	28.6	10	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	113.4	28.6	20	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	114	28.6	30	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	118	28.6	40	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	117	28.6	50	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
36	La Bocana	17092021	1224	10,34867 -85,28025	119	28.8	60	B	T	WW LL TG VL EP	0	ensoleille	0
37	Palo Verde	17092021	1453	10,34373 -85,33969	675	28.9	0	B	NT	TG PA PR	1	ensoleille	0
37	Palo Verde	17092021	1453	10,34373 -85,33969	680	29.5	10	B	NT	TG PA PR	1	ensoleille	0
38	Palo Verde	17092021	1502	10,344 -85,33936	633	27.3	0	B	NT	PR TG PA	0	ensoleille	0
38	Palo Verde	17092021	1502	10,344 -85,33936	647	27.8	10	B	NT	PR TG PA	0	ensoleille	0
38	Palo Verde	17092021	1502	10,344 -85,33936	660	28.4	20	B	NT	PR TG PA	0	ensoleille	0
38	Palo Verde	17092021	1502	10,344 -85,33936	662	28.7	30	B	NT	PR TG PA	0	ensoleille	0
39	Palo Verde	17092021	1513	10,34412 -85,34039	730	29.1	0	C	NT	NA	0	ensoleille	0
40	Palo Verde	17092021	1533	10,3443 -85,34275	540	33	0	C	NT	PG TG HL	0	ensoleille	0
41	Varillal	18092021	1221	10,37461 -85,37352	185.5	29.9	0	B	NT	PG PR	1	ensoleille	0
41	Varillal	18092021	1221	10,37461 -85,37352	196.6	32	10	B	NT	PG PR	1	ensoleille	0
42	Varillal	18092021	1231	10,37464 -85,37358	108.1	27.1	0	BR	NT	PG PR	0	ensoleille	0
42	Varillal	18092021	1231	10,37464 -85,37358	111.6	27.1	10	BR	NT	PG PR	0	ensoleille	0
43	Varillal	18092021	1240	10,37558 -85,37478	108.5	26.2	0	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
43	Varillal	18092021	1240	10,37558 -85,37478	108.5	26.2	10	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
43	Varillal	18092021	1240	10,37558 -85,37478	108.4	26.2	20	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
43	Varillal	18092021	1240	10,37558 -85,37478	108.2	26.3	30	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
43	Varillal	18092021	1240	10,37558 -85,37478	108.1	26.4	40	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	106.2	25.6	0	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	106.2	25.6	10	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	106.2	25.6	20	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	106.1	25.8	30	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0

44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	105.8	28.9	40	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
44	Varillal	18092021	1248	10,37607 -85,37523	105.5	26.6	50	R	NT	PG PR	0	ensoleille	0
45	Varillal	18092021	1257	10,37652 -85,37557	102.9	27.1	0	B	NT	PG PR	0	ensoleille	0
45	Varillal	18092021	1257	10,37652 -85,37557	102.9	27.1	10	B	NT	PG PR	0	ensoleille	0
45	Varillal	18092021	1257	10,37652 -85,37557	103	27.6	20	B	NT	PG PR	0	ensoleille	0
45	Varillal	18092021	1257	10,37652 -85,37557	102.5	27.4	30	B	NT	PG PR	0	ensoleille	0
45	Varillal	18092021	1257	10,37652 -85,37557	102.5	27.3	40	B	NT	PG PR	0	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	103.4	27.4	0	B	NT	PR	1	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	103.4	27.4	10	B	NT	PR	1	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	103.4	27.4	20	B	NT	PR	1	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	103.6	27.4	30	B	NT	PR	1	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	103.6	27.4	40	B	NT	PR	1	ensoleille	0
46	Varillal	18092021	1303	10,37675 -85,3758	102	28.2	50	B	NT	PR	1	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	102.9	26.6	0	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	103	27.5	10	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	102.9	27.6	20	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	102.6	27.7	30	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	102.4	27	40	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	102.6	29.3	50	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
47	Varillal	18092021	1303	10,37686 -85,37596	101.8	25.5	60	B	NT	PR PG	0	ensoleille	0
48	Chamorro	19092021	1117	10,34276 -85,3658	122.3	29	0	B	NT	LA NP TG	0	ensoleille	0
48	Chamorro	19092021	1117	10,34276 -85,3658	124	29	10	B	NT	LA NP TG	0	ensoleille	0
49	Chamorro	19092021	1124	10,34304 -85,36571	122.4	29.3	0	BC	NT	LA NP TG	0	ensoleille	0
49	Chamorro	19092021	1124	10,34304 -85,36571	121.5	29.3	10	BC	NT	LA NP TG	0	ensoleille	0
50	Chamorro	19092021	1129	10,34318 -85,36561	128.8	27.5	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
50	Chamorro	19092021	1129	10,34318 -85,36561	124.5	27.5	10	C	NT	PR	0	ensoleille	0
51	Chamorro	19092021	1134	10,3433 -85,3657	115.6	29.3	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
52	Chamorro	19092021	1139	10,34349 -85,36603	114.3	27.5	0	C	NT	PR	1	ensoleille	0
53	Chamorro	19092021	1145	10,34357 -85,36609	116	27.4	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
54	Chamorro	19092021	1151	10,34383 -85,36617	118.2	27.4	0	C	NT	PR NP LA	0	ensoleille	0
55	Chamorro	19092021	1159	10,3443 -85,36619	140	26.7	0	C	NT	NA	0	ensoleille	0
56	Chamorro	19092021	1109	10,34414 -85,36583	160.1	26.9	0	BC	NT	CP	0	ensoleille	0
57	Chamorro	19092021	1215	10,34386 -85,36527	180	26.4	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
58	Chamorro	19092021	1220	10,3438 -85,36491	207	26.3	0	BC	NT	PR	1	ensoleille	0
59	Chamorro	19092021	1240	10,34409 -85,36414	213	27.2	0	C	NT	PR TG	0	ensoleille	0
60	Chamorro	19092021	1246	10,34419 -85,36353	199	28.1	0	BC	NT	PR	0	ensoleille	0
61	Chamorro	19092021	1252	10,34464 -85,36375	205	27.3	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
62	Chamorro	19092021	1259	10,3459 -85,36399	210	29.9	0	C	NT	PR	0	ensoleille	0
63	Chamorro	19092021	1303	10,34602 -85,36402	214	27.3	0	C	NT	NA	0	ensoleille	0
64	Chamorro	19092021	1327	10,34248 -85,36439	197.4	27.6	0	B	NT	PR	0	ensoleille	0
65	Poza Verde	21092021	1352	10,43412 -85,3532	NA	NA	NA	B	NT	EE	0	pluie	0
66	Poza Verde	21092021	1356	10,43385 -85,35318	104.7	32.7	0	B	NT	EE AS	0	pluie	0
67	Poza Verde	21092021	1300	10,43351 -85,35306	110	31.3	0	B	NT	EE AS	1	pluie	0
68	Poza Verde	21092021	1405	10,43324 -85,35292	98	31.3	0	B	NT	EE AS	0	pluie	0
69	Poza Verde	21092021	1410	10,43293 -85,35255	102.2	29.5	0	B	NT	EE NP	0	pluie	0
70	Poza Verde	21092021	1414	10,43276 -85,35204	117.7	34.1	0	BL	NT	EE	0	pluie	0

71	Palo Verde	24092021	1613	10,34501 -85,34495	370	14	NA	B	T	TG	1	enseille	1
72	Palo Verde	24092021	1616	10,34543 -85,34532	NA	NA	NA	B	T	TG	0	enseille	1
73	Palo Verde	24092021	1620	10,34547 -85,34574	NA	NA	NA	B	T	TG	0	enseille	1
74	Palo Verde	24092021	1623	10,34557 -85,34587	NA	NA	NA	C	T	TG	0	enseille	1
75	Palo Verde	24092021	1627	10,34566 -85,34622	NA	NA	NA	B	T	TG	0	enseille	1
76	Nicaragua	25092021	930	10,32883 -85,27251	NA	NA	NA	B	T	PA PR	0	enseille	0
77	Nicaragua	25092021	935	10,32874 -85,27333	182	13.4	NA	B	T	PA TG	1	enseille	0
78	Nicaragua	25092021	941	10,32865 -85,27463	NA	NA	NA	BC	T	TG	0	enseille	0
79	Nicaragua	25092021	949	10,32847 -85,27618	NA	NA	NA	B	T	TG	0	enseille	0
80	Nicaragua	25092021	952	10,32844 -85,27769	NA	NA	NA	B	T	PA	0	enseille	0

Campagne Transect_IDT

N°	Date	Localisation	EC [uS/cm]	T [°C]	Typha	Type de vég. (R=5 m)	EchEau
1	23092021	10,32625 -85,319	297	14,5	NT	herbe	1
2	23092021	10,32715 -85,3186			NT	herbe	0
3	23092021	10,3285 -85,31805	224	14,4	NT	EE	1
4	23092021	10,33004 - 85,31802			NT	EE	0
5	23092021	10,33072 - 85,31896	166,2	14,2	T	EE	1
6	23092021	10,33165 - 85,31900			T	EE	0
7	23092021	10,33223 - 85,31938	201	14,7	T	EE	1
8	23092021	10,33339 - 85,32007			T	EE	0
9	23092021	10,33417 - 85,31992	175,2	14,7	T	EE	1
10	23092021	10,33468 - 85,31902			T	PA EE	0
11	23092021	10,33542 - 85,31814	159,7	14,6	T	PA EE	1
12	23092021	10,33614 - 85,31748			T	PA EE	0
13	23092021	10,33635 - 85,31739	163,7	14,6	T	PA EE	1
14	23092021	10,33730 - 85,31782			T	PA EE	0
15	23092021	10,33800 - 85,31833	226	15,2	T	EE	1

16	23092021	10,33874 - 85,31793			T	EE	0
17	23092021	10,33903 - 85,31722	363	15,7	T	PA EE	1
18	23092021	10,33960 - 85,31645			T	PA EE	0
19	23092021	10,34021 - 85,31567	552	15,5	T	NP MP	1
20	23092021	10,34110 - 85,31584			T	NP MP	0

Campagne Evolution Temporelle_IDEt

date	EC [uS/cm]	Temp [°C]	Pr [cm]	Meteo	Heure	ec	Moment de la journée
15092021	444	27,9	0	ensoleille	854	0,444	matin
15092021	320	27,2	0	pluie	1805	0,32	soir
16092021	345	26,9	0	ensoleille	828	0,345	matin
16092021	310	29,6	0	ensoleille	1745	0,31	soir
17092021	296	27,7	0	ensoleille	825	0,296	matin
17092021	403	28,7	0	ensoleille	1835	0,403	soir
18092021	455	29,1	0	ensoleille	848	0,455	matin
18092021	466	28,3	0	ensoleille	1807	0,466	soir
19092021	535	25,5	0	ensoleille	848	0,535	matin
19092021	525	29,4	0	pluie	1800	0,525	soir
20092021	550	28,7	0	ensoleille	800	0,55	matin
20092021	560	29	0	ensoleille	1745	0,56	soir
21092021	575	28,7	0	ensoleille	840	0,575	matin
21092021	584	28,9	0	pluie	1758	0,584	soir
22092021	591	28,8	0	ensoleille	908	0,591	matin
22092021	688	29,2	0	ensoleille	1748	0,688	soir
24092021	594	27,4	0	pluie	750	0,594	matin
24092021	683	28,3	0	pluie	1732	0,683	soir

Annexe D : Packages RStudio®

Package 'tidyverse'. Version 1.3.1. Author Hadley Wickham [aut, cre], RStudio [cph, fnd]. Description The 'tidyverse' is a set of packages that work in harmony because they share common data representations and 'API' design. This package is designed to make it easy to install and load multiple 'tidyverse' packages in a single step. Learn more about the 'tidyverse' at <<https://www.tidyverse.org>>.

Package 'readr'. Version 2.1.1. Description The goal of 'readr' is to provide a fast and friendly way to read rectangular data (like 'csv', 'tsv', and 'fwf'). It is designed to flexibly parse many types of data found in the wild, while still cleanly failing when data unexpectedly changes.

Package 'ggplot2'. Version 3.3.5. Hadley Wickham [aut]. Description A system for 'declaratively' creating graphics, based on ``The Grammar of Graphics''. You provide the data, tell 'ggplot2' how to map variables to aesthetics, what graphical primitives to use, and it takes care of the details.
<https://ggplot2.tidyverse.org/>

Package 'patchwork'. Version 1.1.1. Author Thomas Lin Pedersen [cre, aut]. Description The 'ggplot2' package provides a strong API for sequentially building up a plot, but does not concern itself with composition of multiple plots. 'patchwork' is a package that expands the API to allow for arbitrarily complex composition of plots by, among others, providing mathematical operators for combining multiple plots. Other packages that try to address this need (but with a different approach) are 'gridExtra' and 'cowplot'. <https://patchwork.data-imaginist.com>.

Package 'rstatix'. Version 0.7.0. Author Alboukadel Kassambara [aut, cre]. Description Provides a simple and intuitive pipefriendly framework, coherent with the 'tidyverse' design philosophy, for performing basic statistical tests, including t-test, Wilcoxon test, ANOVA, KruskalWallis and correlation analyses. The output of each test is automatically transformed into a tidy data frame to facilitate visualization. Additional functions are available for reshaping, reordering, manipulating and visualizing correlation matrix. Functions are also included to facilitate the analysis of factorial experiments, including purely 'within-Ss' designs (repeated measures), purely 'between-Ss' designs, and mixed 'within-and-between-Ss' designs. It's also possible to compute several effect size metrics, including

``eta squared'' for ANOVA, ``Cohen's d'' for t-test and 'Cramer V' for the association between categorical variables. The package contains helper functions for identifying univariate and multivariate outliers, assessing normality and homogeneity of variances. <https://rpkgs.datanovia.com/rstatix/>

Package 'ggpubr'. Version 0.4.0. Author Alboukadel Kassambara [aut, cre]. Description The 'ggplot2' package is excellent and flexible for elegant data visualization in R. However the default generated plots requires some formatting before we can send them for publication. Furthermore, to customize a 'ggplot', the syntax is opaque and this raises the level of difficulty for researchers with no advanced R programming skills. 'ggpubr' provides some easy-to-use functions for creating and customizing 'ggplot2'- based publication ready plots. <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>

Package 'viridis'. Version 0.6.2. Author Simon Garnier [aut, cre], Noam Ross [ctb, cph], Bob Rudis [ctb, cph], Marco Sciaini [ctb, cph], Antônio Pedro Camargo [ctb, cph], Cédric Scherer [ctb, cph]. Description Color maps designed to improve graph readability for readers with common forms of color blindness and/or color vision deficiency. The color maps are also perceptually-uniform, both in regular form and also when converted to black-and-white for printing. This package also contains 'ggplot2' bindings for discrete and continuous color and fill scales. A lean version of the package called 'viridisLite' that does not include the 'ggplot2' bindings can be found at <https://sjmgarnier.github.io/viridis/>

Package 'gghalves'. Version 0.1.1. Author Frederik Tiedemann [aut, cre]. Description A 'ggplot2' extension for easy plotting of half-half geom combinations. Think half boxplot and half jitterplot, or half violinplot and half dotplot. <https://github.com/erocoar/gghalves>

Annexe E : Mesure de l'électroconductivité du sol mesuré en laboratoire

Lagune	Campagne	num	EC (uS/cm)
Chamorro	IDCS	1	171,2
Chamorro	IDCS	2	322
Chamorro	IDCS	3	41,7
Chamorro	IDCS	4	57,9
Chamorro	IDCS	5	85,8
Palo Verde	IDCS	6	168,7
Palo Verde	IDCS	7	352
Palo Verde	IDCS	8	452
Palo Verde	IDCS	9	606
Poza Verde	IDCS	10	56,1
Poza Verde	IDCS	11	69,2
Poza Verde	IDCS	12	132,3
Poza Verde	IDCS	13	89
Poza Verde	IDCS	14	142,7
Poza Verde	IDCS	15	51
Poza Verde	IDCS	16	64,4
Poza Verde	IDCS	17	37
Poza Verde	IDCS	18	123,8
Poza Verde	IDCS	19	44,6
Poza Verde	IDCS	20	98,5
Poza Verde	IDCS	21	68,5
Poza Verde	IDCS	22	40,5
Poza Verde	IDCS	23	36,1
Poza Verde	IDCS	24	35,3
Poza Verde	IDCS	25	45,7
Nicaragua	IDCS	26	866
Nicaragua	IDCS	27	203
Nicaragua	IDCS	28	1454
Nicaragua	IDCS	29	3,11
Nicaragua	IDCS	30	
Nicaragua	IDCS	31	1108
La Bocana	IDCS	32	106
La Bocana	IDCS	33	151,6
La Bocana	IDCS	34	70,9
La Bocana	IDCS	35	109,9
La Bocana	IDCS	36	74,8
Palo Verde	IDCS	37	572
Palo Verde	IDCS	38	128,4
Palo Verde	IDCS	39	371
Palo Verde	IDCS	40	560
Varillal	IDCS	41	359
Varillal	IDCS	42	107,3
Varillal	IDCS	43	83,6
Varillal	IDCS	44	76,1

Varillal	IDCS	45	120,1
Varillal	IDCS	46	104,4
Varillal	IDCS	47	77
Chamorro	IDCS	48	82,6
Chamorro	IDCS	49	73,4
Chamorro	IDCS	50	46,3
Chamorro	IDCS	51	37,9
Chamorro	IDCS	52	53,3
Chamorro	IDCS	53	45,6
Chamorro	IDCS	54	65,2
Chamorro	IDCS	55	60
Chamorro	IDCS	56	57,6
Chamorro	IDCS	57	68,2
Chamorro	IDCS	58	97
Chamorro	IDCS	59	59,1
Chamorro	IDCS	60	52,5
Chamorro	IDCS	61	57,5
Chamorro	IDCS	62	96,1
Chamorro	IDCS	63	66,5
Chamorro	IDCS	64	160,6
Poza Verde	IDCS	65	38,5
Poza Verde	IDCS	66	29,7
Poza Verde	IDCS	67	42,8
Poza Verde	IDCS	68	43,3
Poza Verde	IDCS	69	43,3
Poza Verde	IDCS	70	55,6
Palo Verde	IDCS	71	229
Palo Verde	IDCS	72	260
Palo Verde	IDCS	73	187,9
Palo Verde	IDCS	74	203
Palo Verde	IDCS	75	169,1
Nicaragua	IDCS	76	109,7
Nicaragua	IDCS	77	284
Nicaragua	IDCS	78	96,6
Nicaragua	IDCS	79	130,1
Nicaragua	IDCS	80	174
Palo Verde	IDEt	1	226
Palo Verde	IDT	1	1973
Palo Verde	IDT	2	1963
Palo Verde	IDT	3	1884
Palo Verde	IDT	4	1783
Palo Verde	IDT	5	1634
Palo Verde	IDT	6	1654
Palo Verde	IDT	7	1445
Palo Verde	IDT	8	1407
Palo Verde	IDT	9	1469
Palo Verde	IDT	10	1321
Palo Verde	IDT	11	1099

Palo Verde	IDT	12	983
Palo Verde	IDT	13	543
Palo Verde	IDT	14	392
Palo Verde	IDT	15	321
Palo Verde	IDT	16	2,65
Palo Verde	IDT	17	810
Palo Verde	IDT	18	1214
Palo Verde	IDT	19	1628
Palo Verde	IDT	20	1842

Etude de la dynamique de salinité des sols et des eaux dans la zone humide du parc national Palo Verde en Costa Rica et lien avec la propagation de *Typha domingensis*

Nadège Coussement

Résumé :

Le parc National de Palo Verde situé dans le bassin versant Tempisque-Bebedero à Guanacaste au Costa Rica, subit depuis plusieurs décennies des perturbations hydrologiques. Ces perturbations peuvent être expliquées par la construction de centres électrohydrologiques et d'un réseau d'irrigation en amont du parc. Ces infrastructures sont à l'origine de la dégradation de l'écosystème et d'une perte en biodiversité. Il est fort probable qu'elles impactent également la salinité du parc. L'augmentation de salinité des eaux et des sols au sein du parc et la prolifération d'une plante invasive, *Typha domingensis*, sont plausiblement corrélées. En conséquence des recherches ont été menées afin de comprendre les perturbations hydrologiques de la zone humide et ses conséquences en vue de mettre en place une gestion adéquate du site.

Ce mémoire a pour objectif d'apporter une meilleure compréhension de la dynamique de salinité, d'établir des hypothèses quant à son origine et de mettre en vis-à-vis les valeurs de la salinité avec la présence de *Typha*. Pour ce faire, trois sous-objectifs ont été fixés. Premièrement, nous analyserons les séries temporelles du niveau des eaux de surface et souterraines pour comprendre la dynamique et l'origine des eaux pour chaque lagune. Ensuite nous analyserons les séries temporelles de l'électroconductivité et sa variation spatiale pour émettre des hypothèses sur l'origine de la salinité. Enfin, nous observerons la présence ou l'absence de *Typha* aux différents points de mesures accédés lors des différentes campagnes de terrain et mettrons ces observations en parallèle avec nos mesures de salinité.

Nous utiliserons le langage de programmation R et l'interface graphique RStudio pour le traitement des données. Nous construirons des séries temporelles et différents boxplots afin de comparer les niveaux d'eau et de salinité entre les lagunes. Sur nos séries temporelles nous emploierons l'analyse de fourrier afin de faire ressortir les phénomènes périodiques. Les mesures réalisées sur le terrain ont servi à alimenter la base donnée mais aussi à augmenter sa couverture spatiale. En effet avant nos campagnes de terrain l'ensemble des mesures d'électroconductivité avait été réalisé en 4 points uniques, correspondant à des stations de mesures, nos campagnes ont permis de la mesurer à 100 nouveaux emplacements répartis dans le parc.

Les résultats suggèrent que les six lagunes du parc présentent un comportement hydrologique et salin distinct bien que certaines lagunes présentent des similitudes. Il est probable que la dynamique de salinité soit influencée par la localisation et la topographie des lagunes. Les sites proches du golfe et de la rivière Tempisque ont présentent généralement des valeurs de salinité plus importantes. Les inondations récurrentes, en provenance des débordements de la berge de la rivière Tempisque alimentent les lagunes en sel. Enfin, il est probable que *Typha domingensis* se développe davantage dans les zones plus salines au détriment des autres espèces végétales du parc.