



Mars 2023

Bathymétrie & Bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin

Rapport de projet de fin d'études

Carla LAGARDERE & Romane REY

ALEXANDRE PRYET
VINCENT BERTRIN ET SEBASTIEN BOUTRY

Table des matières

Abstract	5
Résumé.....	6
Partie I : Contexte et Problématique	7
1. Introduction et problématique	7
2. Présentation du site d'étude	8
3. Contexte général du site.....	10
3.1. Contexte géologie	10
3.2. Contexte hydrologique et hydrogéologique	11
3.3. Contexte climatique	13
4. Enjeux associés au lac	14
4.1. Espèces végétales.....	14
4.2. Stockage de carbone	15
4.3. Usages	16
Partie II : Bathymétrie du lac de Carcans-Hourtin	17
1. Introduction et enjeux	17
2. Données disponibles.....	17
2.1. Données par l'échosondeur	18
2.2. Données LIDAR topographique	19
2.3. Données DGPS.....	21
3. Méthodes d'interpolation.....	23
3.1. Principe de l'interpolation.....	23
3.2. La méthode par inverse distance	24
3.3. La méthode SPLINE	25
4. MNT de la bathymétrie du lac	26
5. Evaluation du modèle (quantification de l'erreur).....	27
5.1. Évaluation visuelle de l'erreur.....	28
5.2. Évaluation par statistiques.....	30
6. Perspectives d'amélioration de la qualité du MNT	32
6.1. Améliorer la qualité des données pour l'interpolation	32
6.2. Améliorer la qualité de l'interprétation	35
6.3. Améliorer la qualité de l'évaluation de l'erreur	36
7. Discussion et conclusion	36
Partie III : Bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin	37
1. Introduction et Définitions	37
2. Problématique et Objectifs	38
3. Quantification de l'évaporation.....	39
3.1. Méthodes.....	39
3.2. Résultats et interprétation	50
3.3. Conclusion et Perspectives.....	55
4. Bilan hydrique du lac sur la période historique	56
4.1. Méthode.....	57
4.2. Résultats.....	59
4.3. Conclusion	63
5. Projections dans un contexte de changement climatique	64
5.1. Projection climatique	64
5.2. Bilan hydrique prospectif	65
5.3. Discussion et interprétation	70
5.4. Limites et Perspectives.....	71
Partie IV : Conclusion	72
Annexes.....	75
Bibliographie	73

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation du lac de Carcans-Hourtin (google earth)	8
Figure 2 : Carte schématique de profondeur des lacs et occupation des sols (D. BUQUET, 2019).....	9
Figure 3 : Carte géologique de surface des lacs médocains (BGRM)	10
Figure 4 : Log vérifié au sud-est du lac d'Hourtin (BRGM)	11
Figure 5 : Carte piézométrique de la nappe du Plio-Quaternaire (SIGES Aquitaine, 2013)	12
Figure 6 : Histogramme des précipitations et de l'évapotranspiration à Carcans en 2018 (SIAEBVELG, 2021) ...	13
Figure 7 : Isoetes boryana (CAILLON, CBNSA), Lobelia dortmanna & Littorella uniflora (MESLAGE, CBNSA)	14
Figure 8 : Les différents types de relevés sur le lac de carcans-hourtin	18
Figure 9 : Schéma du calcul de la bathymétrie à partir des données echosonde	18
Figure 10 : Données issues de l'échosondeur	19
Figure 11 : Fonctionnement des relevés lidar (SMBVA).....	20
Figure 12 : Principe du LIDAR (omer7a)	20
Figure 13 : Gauche : Données LIDAR brutes / Droite : DONNEES LIDAR POST-TRAITEMENT	21
Figure 14 : FONCTIONNEMENT DU DGPS (GUIDE GESTION DES RISQUES D'EROSION ET SUBMERSION MARINE, ALLEMAND & AL)	22
Figure 15 : Localisation du site des Barouins	22
Figure 16 : Correction des données DGPS.....	22
Figure 17 : Données DGPS.....	23
Figure 18: PRINCIPE D'INTERPOLATION SCHEMATIQUE	23
Figure 19: MNT DU LAC DE CARCANS HOURTIN INTERPOLE PAR LA METHODE (1) IDW ET (2) SPLINE	26
Figure 20: Représentation visuelle de la différence bathymétrique MNT – DGPS pour les interpolations IDW et SPLINE respectivement	29
Figure 21: repartition des differences observees en fonction de la bathymetrie [m ngf]	30
Figure 22: les valeurs bathymetriques interpoles en fonction des valeurs mesurees [m ngf] (1) interpolation idw ; (2) interpolation spline	31
Figure 23: Comparaison LIDAR topographique et bathymétrique [seaescape.fr]	34
Figure 24: Ensemble des flux en interaction avec le lac de Carcans-Hourtin	37
Figure 25: Schema global du general lake model (hipsey et al., 2019)	41
Figure 26: Courbe caractéristique du lac de Carcans-Hourtin en surface (gauche) et en volume (droite).....	43
Figure 27: Illustration de la stratification thermique des lacs en fonction de la saison (vernier science education)	44
Figure 28 : profils de temperature issus du glm.....	51
Figure 29: Profils de température du lac sur l'année 2013 (INRAE).....	51
Figure 30: Évaporation estimée	52
Figure 31: Graphe présentant les valeurs du GLM en fonction des valeurs de Hamon, avec la courbe de tendance reliant ces deux variables.....	54
Figure 32: Histogramme des sommes des évaporations suivant la méthode	54
Figure 33: Chroniques mensuelles des évaporations suivant les différentes méthodes	55
Figure 34: Niveau du lac calculé et simulé, avant calage, sur la période historique	58
Figure 35 : Niveau du lac simule et mesure apres calage sur la période historique	60
Figure 36 : Chronique des flux entrants au lac (Précipitations, arrivées par les crastes et par la nappe)	61
Figure 37 : Zoom sur la chronique du flux arrivant par la nappe	61
Figure 38 : Chronique des flux sortants	62
Figure 39 : Partitionnement volumétrique des flux d'eau entrants et sortants	63
Figure 40: Projection de la variation de température moyenne mondiale suivant différents scénarios (GIEC, 1er groupe de travail 2013).	64
Figure 41: Cartes des écarts de température à l'horizon fin de siècle selon les paramètres statistiques de distribution.....	65
Figure 42: Résidus des valeurs d'évaporation entre les estimations basées sur les températures de la BD DRIAS et celles de la BD Méridienac sur la période historique.....	66

Figure 43: Évolution de l'évaporation simulée sur la période prospective.....	67
Figure 44: Chronique des niveaux piézométriques simulés.....	67
Figure 45: Débits annuels des entrées et sorties d'eau du lac. L'axe y est en volume (m3).	69
Figure 46: Chronique du niveau du lac.....	69
Figure 47 : Chroniques annuelles des hauteurs d'eau des variables d'entrée et de sortie du lac.....	70

Table des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques du lac	9
Tableau 2 : Statut patrimonial des taxons (NT = QUASI-MENACE; EN = EN DANGER) D'APRES CBN SA, 2018	15
Tableau 3: paramètres du modèle	42
Tableau 4: Données sur la morphométrie du lac	42
Tableau 5: Paramètres utilisés pour le paramétrage du transfert de chaleur par le substrat	46
Tableau 6: Paramètres de météo rentrés dans le GLM	48
Tableau 7: Coefficients liant le débit des crastes à celui de la Matouse.....	48
Tableau 8: Paramètres statistiques effectués sur les résultats de l'évaporation	52
Tableau 9: Résultats des évaporations annuelles	53
Tableau 10 : Contraintes appliquées aux paramètres.....	59
Tableau 11 : Valeurs de paramètres retenues après calage	60
Tableau 12: Comparaison des évaporations entre deux bases de données de température différentes	66

Remerciements

A l'issue de ce projet de fin d'étude fort enrichissant, nous souhaitons adresser nos remerciements à nos professeurs ayant proposé cette étude et nous l'ayant rendu comme une aventure passionnante (à raison !), Alexandre PRYET et Crisitina RIBAUDO.

Evidemment, un grand merci également à Vincent BERTRIN, Sébastien BOURTY, ainsi que Estelle JARDOT pour leurs précieux conseils lors des points de suivi, toujours avec beaucoup de bienveillance.

Merci à tous les copains de l'école pour leur soutien lors de nos émotions fluctuantes et également aux copains extra-école pour leur partage de compétences informatiques et linguistiques.

Pour finir, bien sûr, un chaleureux merci à Alexandre PRYET pour son accompagnement, son partage et pour nous avoir poussé tout au long de ce projet afin de mener au mieux et au bout ce projet.

Abstract

The study of bathymetry and water balance of the Carcans-Hourtin lake is part of the Vigie-Lacs project. The latter aims to bring a better knowledge of aquatic flora in lakes near the Atlantic coast in a global change context. The main objectives of this work are to determine the bathymetric profile as well as the level fluctuations of the lake in order to reveal low depth stripe that is and will be exposed to atmosphere. These vulnerable areas are the starting point for protection, conservation and anticipation measures of lake ecosystems.

Lake bathymetry is characterized through a digital terrain model (DEM) built from interpolation of echosounder and LIDAR database. The DEM quality evaluation is validated from a field dataset obtained with DGPS in the Barouins sector of the lake. The difference between the DEM and DGPS data allow to conclude that SPLINE interpolation provides consistent results with a RMSE of 23cm. Improvements can be done for a better DEM quality, like a finer bathymetric sampling of the lake.

The DEM is used to realize the water balance of the lake. Inflows are described by precipitations, rivers and groundwater. Outflows are made of evaporation and overflow by the Etangs canal. Evaporation has been estimated thanks to a correction of the Hamon method by the General Lake model results which account for the lake thermal profile. Water balance has been studied first on a historical period in order to obtain a good history matching between simulated and observed lake level data. Future projections of this latter has been then simulated between 2006 and 2100, based on the RCP8.5 GIEC scenario. This projection evidences a strong influence of precipitations and evaporation on the lake level. However, this model is a first attempt to understanding of lake level behaviour and evolution, and many improvement have to be made, whether on the measures and quantification of the variables and on the modelling process itself.

Résumé

L'étude de la bathymétrie et du bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin s'inscrit dans le cadre du projet Vigie-Lacs, visant à une meilleure connaissance de la végétation aquatique des lacs du littoral aquitain dans un contexte de changements globaux. L'enjeu est de déterminer le profil bathymétrique du lac ainsi que les fluctuations de son niveau d'eau afin de relever les zones de la frange de faible profondeur sujettes à se retrouver à l'air libre durant des temporalités importantes. Ces zones caractérisées comme vulnérables seront alors le point de départ de mesures de protections et d'anticipations.

La bathymétrie du lac est retranscrite via un modèle numérique de terrain (MNT). Celui-ci est créé à partir de l'interpolation de données échosondeurs et LIDAR dont les campagnes de relevées ont été réalisées respectivement en 2014 et 2011. L'évaluation de la qualité du MNT est réalisée à partir d'un jeu de données de validation constitué de relevés manuels au DGPS dans le secteur des Barouins. Le calcul de différence entre la surface interpolée du MNT et les données DGPS permettent de conclure que l'interpolation par SPLINE fournit des résultats concluants avec une RMSE de 23 centimètres. Les valeurs de différences s'étendent jusqu'à 50 centimètres dans la frange de faible profondeur. Des pistes pour améliorer la qualité du MNT, comme un meilleur échantillonnage bathymétrique du lac sont ainsi à envisager.

Ce modèle bathymétrique est utilisé pour la réalisation du bilan hydrique du lac. Les flux d'eau entrants sont constitués par les précipitations, les apports provenant des rivières et de la nappe du Plio-Quaternaire. L'évaporation et le débordement par le canal des étangs sont les flux sortants du lac. L'évaporation a été déterminée par l'équation de Hamon puis corrigée à l'aide du General Lake Model permettant de déterminer le profil thermique vertical du lac. Le bilan hydrique a été réalisé tout d'abord sur une période historique afin de caler les paramètres du modèle. Ceux-ci sont ensuite conservés lors de la réalisation du bilan hydrique sur la période projective, basée sur le scénario RCP 8.5 du GIEC. Sur l'ensemble de la période projective jusqu'à 2100 est ainsi disponible une chronique du niveau du lac, qui indique une forte dépendance des précipitations et de l'évaporation. Cependant, ce modèle est une première tentative de compréhension du comportement et de l'évolution du niveau des lacs et de nombreuses améliorations doivent être apportées, que ce soit au niveau des mesures et de la quantification des variables ou au niveau du processus de modélisation lui-même.

Partie I : Contexte et Problématique

1. Introduction et problématique

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le projet de recherche Vigie-Lacs qui consiste à suivre l'évolution de l'écologie aquatique sur le long terme dans les lacs et étangs aquitains, dans une démarche de préservation de la biodiversité associée. En effet, de nombreuses espèces typiques des écosystèmes littoraux lacustres sont menacées à la fois par les activités anthropiques, notamment le tourisme, et le changement climatique. La gestion des lacs et la compréhension de l'évolution de ceux-ci en termes de niveau d'eau sont donc essentielles pour anticiper des conditions climatiques plus extrêmes, permettre une harmonie entre l'Homme et les espèces végétales et animales menacées et proposer des plans d'action pour la préservation de ces écosystèmes, tout en étudiant les adaptations de ceux-ci aux différents stress.

C'est dans cette optique que le projet Vigie-Lacs a vu le jour, suite à la démarche de l'Agence de l'eau Adour-Garonne, pour proposer une « gouvernance de gestion de l'eau et des milieux aquatiques » des plans d'eau de la façade aquitaine française. C'est un projet complémentaire à des actions menées actuellement au niveau national comme le Plan d'Action National et au niveau régional comme Neo Terra dont les finalités résident dans la conservation des « biotopes lacustres et communautés végétales associées » d'après l'Agence régionale de la biodiversité (ARB) de Nouvelle Aquitaine (2022). Le projet Vigie-Lacs a été lancé au printemps 2022, il est co-financé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Région Nouvelle-Aquitaine, la DREAL Nouvelle-Aquitaine et l'INRAE/Bordeaux INP et est prévu sur une durée de cinq ans. Cinq volets de travail sont prévus sur ce projet (ARB Nouvelle-Aquitaine, 2023):

- Volet 1 : Suivre sur le long terme les dynamiques des variables environnementales pertinentes et des peuplements de végétaux aquatiques (température et oxygène dissous dans l'eau, communautés de macrophytes, biomasses des espèces exotiques envahissantes)
- Volet 2 : Conserver les espèces patrimoniales et les biotopes aquatiques, et évaluer l'efficacité des opérations de restauration
- Volet 3 : Anticiper les effets des changements globaux sur la biodiversité végétale, les biotopes aquatiques et le fonctionnement biogéochimique des lacs
- Volet 4 : Valider et bancariser les données acquises durant le projet
- Volet 5 : Communiquer et transférer les connaissances au plus grand nombre (porté par l'ARB NA)

Parmi ces objectifs, l'identification des zones les plus sensibles aux baisses de niveau d'eau afin d'anticiper les actions de conservation et de protection ainsi que la quantification des émissions de carbone des zones émergées du lac en font partie, et servent de fil directeur à ce projet de fin d'études. La compréhension de la bathymétrie du lac, l'étude des variations du niveau du lac actuelles et passées ainsi que la simulation de projections futures de ce niveau sont essentiels pour mettre à bien ce projet Vigie-Lacs afin de déterminer les zones les plus sujettes et vulnérables aux variations du niveau du lac. Ces trois objectifs sont justement le sujet de ce projet de fin d'études, effectué sur le lac de Carcans-Hourtin, qui présente des avancées sur ces thématiques avec une cartographie bathymétrique, un bilan hydrique et des projections futures du niveau du lac de Carcans-Hourtin.

2. Présentation du site d'étude

Localisé dans le sud-ouest de la France, le lac de Carcans-Hourtin, accompagné du lac de Lacanau, forment les lacs médocains. Ils se situent en région Aquitaine, dans le nord du département girondin, au sein d'un territoire nommé le Médoc (**Figure 1** **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

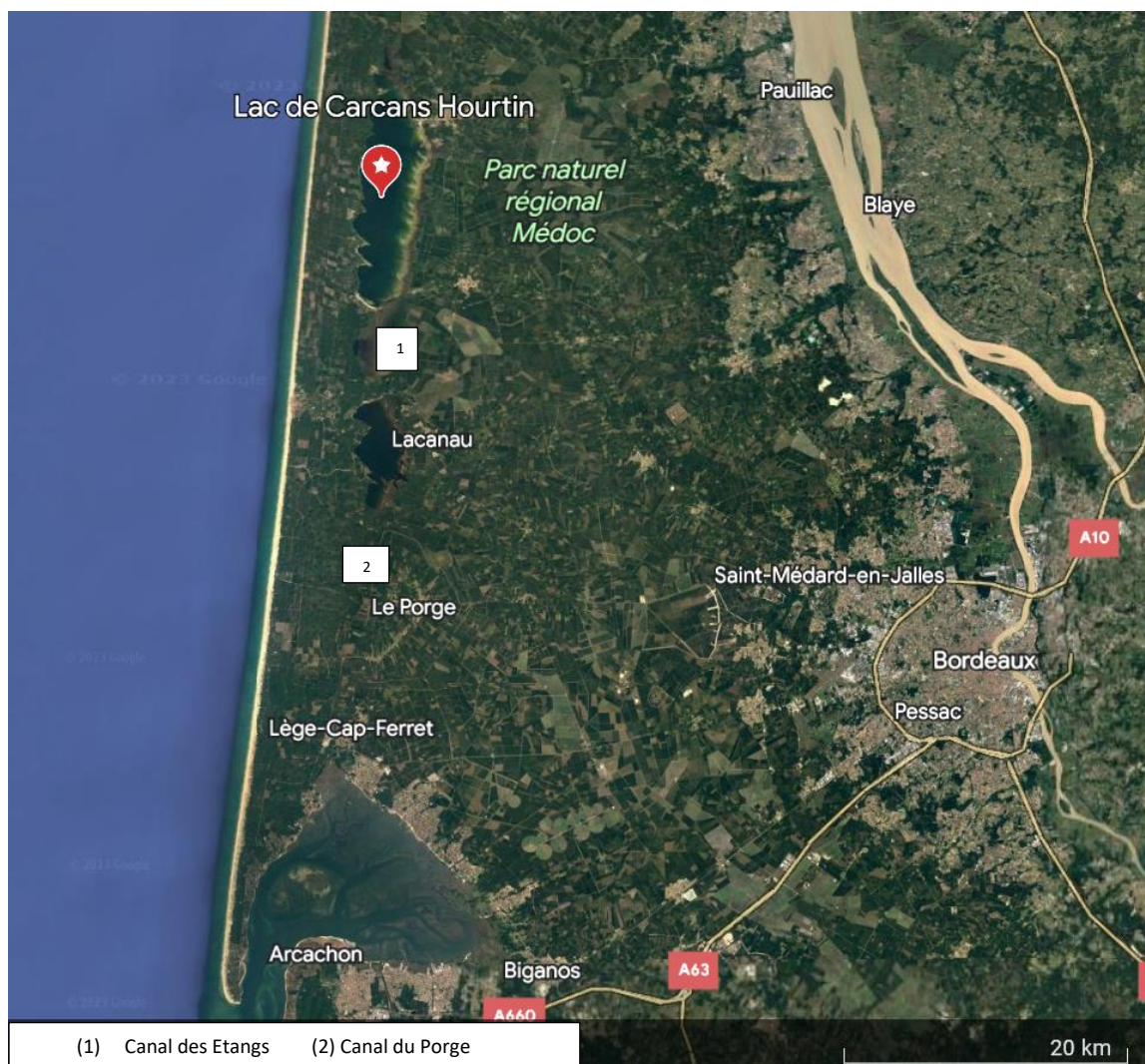


FIGURE 1 : LOCALISATION DU LAC DE CARCANS-HOURTIN (GOOGLE EARTH)

Le lac d'Hourtin est interconnecté au lac de Lacanau, situé plus au sud, par le canal des étangs, sur une distance de 7,5km de long. Les eaux des deux lacs s'écoulent ensuite dans le canal du Porge sur 18,5km pour enfin alimenter le Bassin d'Arcachon.

Le lac soumis à cette étude dispose d'une superficie d'environ 60 km² et s'étend du nord au sud, parallèlement au rivage océanique, sur 18 km de longueur. Son volume moyen est proche des 210 millions de m³ et son eau présente un taux de renouvellement annuel de 0,56 selon le SIAEBLVELG. Les caractéristiques liées à sa localisation sont les suivantes (Tableau 1) :

Latitude	N 44°58'
Longitude	W 01°07'
Altitude [m NGF]	13,2 – 14,6
Profondeur moyenne [m]	3,15

TABEAU 1 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU LAC

Les deux lacs médocains sont organisés selon la même bathymétrie, organisée selon un axe est-ouest (Figure 2) :

- Une augmentation très douce et progressive de la profondeur à l'est, suivant la pente du plateau landais, d'environ 1,5 m par kilomètre et orientée vers l'océan.
- La profondeur maximale se trouve à l'ouest au pied de dune, marquant une topographie très abrupte avec des écroulements de sables dunaires possibles.

Les lacs sont entourés de forêts et de prairies ainsi que de zones humides situées au nord, au sud et à l'embouchure des crastes.

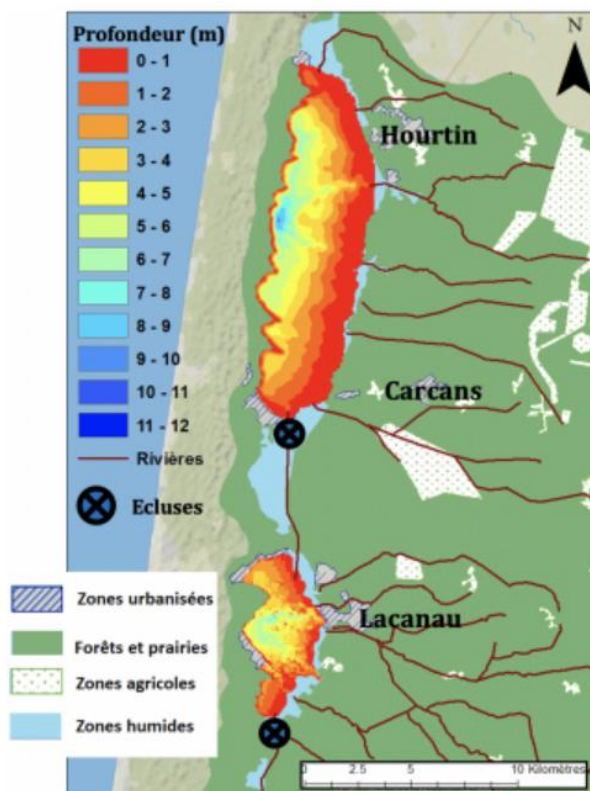


FIGURE 2 : CARTE SCHEMATIQUE DE PROFONDEUR DES LACS ET OCCUPATION DES SOLS (D. BUQUET, 2019)

L'origine de ces plans d'eau date d'il y a plus de 20 000 ans. L'assemblage des divers cours d'eau de la rive est du lac étaient dévoués à se rassembler en estuaire, toutefois, le cordon dunaire datant de l'Holocène forme un barrage de sable. Les eaux se retrouvent alors accumulées pour former un lac délimité par le plateau landais à l'est et les dunes côtières à l'ouest (Taster et al. 2008). Ce cordon dunaire est actuellement présent le long du littoral aquitain entre l'estuaire de la Gironde et de l'Adour.

Les fonctions écosystémiques du lac de Carcans-Hourtin sont multiples. Ses usages s'étendent de la pêche, la chasse aux alentours ainsi que des activités de loisirs comme les activités nautiques et le tourisme. La gestion de cet espace naturel s'apparente ainsi nécessaire. Les niveaux d'eau sont régulés par l'écluse de Montaut, située en aval du lac, à l'embouchure du canal des étangs. Sa côte de surverse est fixée à 14,25. Ainsi, l'écluse est généralement ouverte lors des fortes pluies afin d'éviter l'inondation des zones d'intérêts économiques alentours. L'enjeu est également de maintenir un niveau d'eau suffisant pour permettre l'alimentation des zones humides et le déroulement des activités estivales. L'écluse est alors globalement fermée en saison sèche.

3. Contexte général du site

3.1. Contexte géologie

La zone d'étude des lacs médocains est constituée de formations géologiques dont la plage de dépôt s'étend du Pliocène (formation de Belin), au Pléistocène (formations récentes) (Figure 3Figure 3). Un log stratigraphique est disponible en annexe présentant la description lithologique des faciès légendés sur la carte (Annexe 1).

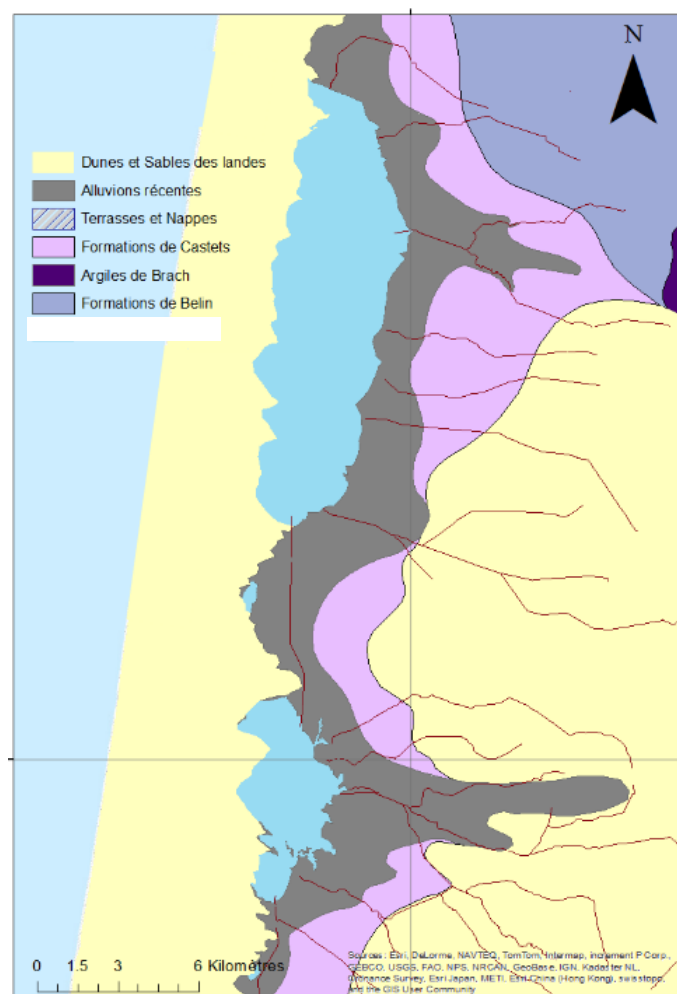


FIGURE 3 : CARTE GEOLOGIQUE DE SURFACE DES LACS MEDOCAINS (BGRM)

Les rives des lacs sont faites de formations résiduelles récentes faites de sables et limons déposées par les rivières en alimentant le lac et ainsi que par la dynamique éolienne.

Un ouvrage localisé au sud-est du lac d'Hourtin permet de comprendre la succession géologique du sous-sol. Le log vérifié par le BRGM se trouve au droit du lieu-dit « le Poutch » et présente une importante épaisseur de sables du quaternaire (Figure 4Figure 4).

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
13.00			Sable fin beige.	Pléistocène	2.00
21.00			Sable fin à moyen beige à gris beige clair, légèrement argileux et micacé.		-6.00
32.00			Sable quartzeux fin à moyen gris micacé.		-17.00
38.00			Graviers quartzeux (3-4mm) ocre et blanc, et glauconie.		-23.00
42.00			Grès glauconieux à ciment calcaire.	Miocène moyen	-27.00
			Grès gris à ciment calcaire et argile finement sableuse glauconieuse gris vert,		
56.00			Grès gris à ciment calcaire, glauconieux à ciment calcaire, parfois légèrement argileux, fossilifère (foraminifères, échinodermes, lamellibranches). Un peu d'argile grise.		-41.00
64.00			Grès glauconieux à ciment calcaire, à nombreux foraminifères (Operculina). Passages de marne gris vert.	Miocène inférieur	-49.00

FIGURE 4 : LOG VERIFIE AU SUD-EST DU LAC D'HOURTIN (BRGM)

Ainsi, le substrat du lac d'Hourtin est majoritairement sableux avec une lithologie fine et de fins bancs argileux.

3.2. Contexte hydrologique et hydrogéologique

Le lac de Carcans-Hourtin est alimenté par un ensemble de chenaux, situés dans le prolongement des rivières du bassin versant, nommés crastes et berles. Les berles sont des petites rivières existantes naturellement mais retravaillées par l'Homme afin d'accentuer leurs capacités de drainage. Concernant les crastes, il s'agit de rivières artificielles creusées pour drainer également le massif landais. Un réseau de sept principaux crastes s'étend sur la côte Est du Nord au Sud. Il s'agit de La Matouse, Cavailla, Courture, Garroueyre, Pipeyrous, Queytime et La Grande Lambrusse. (Buquet, 2017). Ces crastes sont en échanges directs avec les zones humides alentours. Autour du lac, le ruissellement superficiel est très rare dû à la nature sableuse et perméable du substrat favorisant l'infiltration.

Concernant l'hydrogéologie de la zone d'étude, la nappe d'eau superficielle est contenue dans les dépôts superficiels du Plio-Quaternaire. Il s'agit d'un aquifère libre sableux dont la granulométrie est variable selon les secteurs. Cette nappe est alimentée par infiltration directe des précipitations et est en étroite relation avec les crastes évoqués précédemment. En effet, ceux-ci drainent la nappe.

En profondeur, la nappe superficielle du Plio-Quaternaire se retrouve parfois en continuité hydraulique avec la nappe inférieure partiellement captive du Miocène. C'est notamment le cas au sud est du lac comme visible sur le log présenté dans le contexte géologique (Figure 4). Dans ces secteurs, la nappe est alors nommée nappe du Mio-Plioquaternaire.

Une carte piézométrique régionale du triangle landais (Figure 5) permet de comprendre la dynamique globale des écoulements.

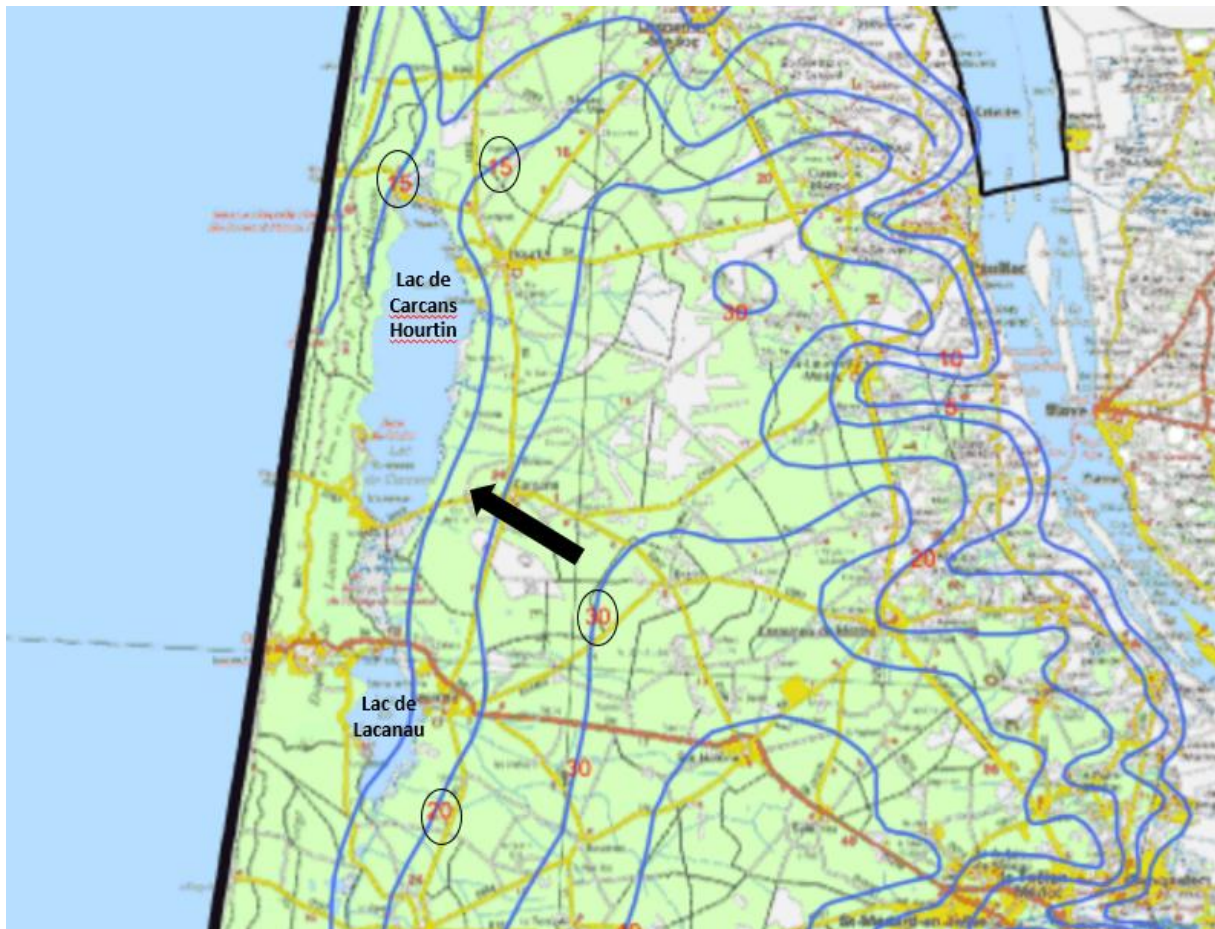


FIGURE 5 : CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DU PLIO-QUATERNAIRE (SIGES AQUITAINE, 2013)

Les écoulements sont ainsi dirigés du sud est vers le littoral. Le niveau de la nappe autour du lac se trouve à une altitude de 15 m NGF, c'est-à-dire supérieur au niveau du lac autour des 14 m NGF. La nappe alimente donc le lac sur l'ensemble de sa surface de contact.

Ainsi, le fonctionnement hydrologie et hydrogéologique des interactions lac – nappe – crastes a été synthétisé en quatre phases par F. Quenault (2019) :

- En hiver, le niveau nappe est élevé, elle devient affleurante en période de précipitations intenses. Le réseau hydrographique draine la nappe et le lac est majoritairement rechargé par ces apports de surface.
- Au printemps, la végétation se développe et puise l'eau nécessaire à sa transpiration dans la nappe superficielle. Son niveau diminue ainsi jusqu'à parfois se retrouver sous le fond de la majorité des crastes. Leur débit diminue et le lac est moins alimenté.
- En été, la plupart des cours d'eau sont à sec car le niveau de la nappe est en plus bas. Le lac est très faiblement rechargé.

- Enfin, en automne, la végétation s'amenuise peu à peu et puisent moins d'eau de la nappe. Cette dernière est rechargée par les précipitations et se retrouve à nouveau capable d'alimenter les cours d'eau. En conséquence, le niveau du lac augmente et le débit du canal des étangs également.

3.3. Contexte climatique

Le secteur du Médoc se trouve actuellement sous un climat tempéré océanique, avec des hivers doux et humides et des étés chauds. Les vents dominants sont orientés d'ouest à nord-ouest. D'après le SIAEBVELG (2021), les températures moyennes sont de 5,6°C de novembre à avril et de 15,7°C de mai-octobre, et la moyenne annuelle des précipitations est de 940mm sur les quinze dernières années. Ces dernières sont d'ailleurs très variables étant donné le contexte océanique. L'évapotranspiration dans le bassin versant du Médoc est très élevée en période estivale et, tout comme les précipitations, influence beaucoup les variations des niveaux des eaux de surface (Figure 6).

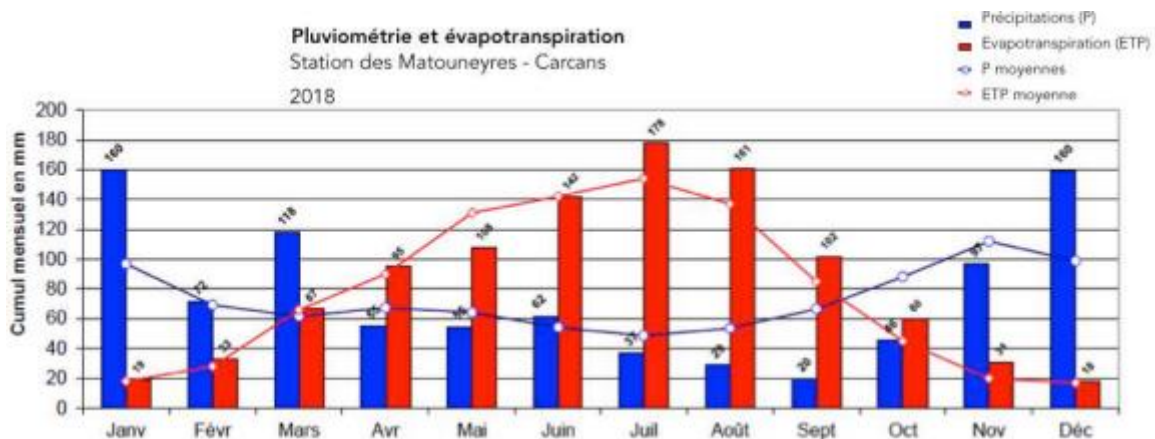


FIGURE 6 : HISTOGRAMME DES PRECIPITATIONS ET DE L'EVAPOTRANSPIRATION A CARCANS EN 2018 (SIAEBVELG, 2021)

Une période de sécheresse a été répertoriée de 2002 à 2006, et par la suite plusieurs tempêtes et événements extrêmes (sécheresses et pluies fortes) ont eu lieu. Il en vient ainsi la problématique de changement climatique global. Ce dernier induit des événements extrêmes comme des sécheresses de plus en plus récurrentes, mais également des précipitations de plus en plus intenses, l'intensité de ces événements va varier en fonction de la localisation. Les tendances climatiques vont donc fortement évoluer d'une région à l'autre. De ce fait, plusieurs suivis de la faune, flore et des écosystèmes en général sont faits par l'Association Cistude Nature (2019) pour observer pas à pas l'évolution des espèces. A noter que l'Association Cistude Nature, d'après une modélisation prédictive appuyée sur des observations de suivis, indique que les prédictions mettent en évidence une régression des conditions climatiques favorables à la flore typique de certaines zones humides, pouvant être expliquée principalement par des sécheresses plus longues, une humidité diminuée et une hausse des températures. Ces prédictions sont à prendre comme un indice mais pas une affirmation. Cependant, avec la hausse des températures prédites et l'intensification d'événements extrêmes, l'existence des zones humides serait sujette à de grandes incertitudes, et le niveau des lacs pourrait évoluer à la baisse, c'est pourquoi il est important de s'intéresser au changement climatique et à ses possibles conséquences afin d'anticiper la manière dont les enjeux associés au lac seraient affectés.

4. Enjeux associés au lac

4.1. Espèces végétales

Un enjeu majeur associé à l'évolution du niveau du lac de Carcans-Hourtin réside dans les conséquences potentielles sur les espèces végétales dont l'habitat correspond à la frange de faible profondeur. Au sein d'un lac, les plantes aquatiques présentent des spécificités liées à la nature du substrat, à la qualité des eaux et l'épaisseur de la tranche d'eau. Elles se répartissent selon leur affinité pour chacun des critères précédents. Or, « les écosystèmes lacustres, à la transition entre les écosystèmes terrestres et aquatiques, se caractérisent par leur forte valeur écologique (STRAYER & FINDLAY, 2012 ; BERTRIN 2018) ». La frange de faible profondeur est ainsi le siège de la végétation amphibie présentant des aspects d'intérêts majeurs.

En effet, cette végétation a un aspect patrimonial important, notamment pour les espèces se trouvant dans les listes rouges ou autre réglementation de protection. Un Plan National d'Action pour la période de 2021 à 2030 a notamment été mis en place en faveur des végétations de bords d'étangs arrière-littoraux des Landes et de Gironde. Il « vise à maintenir les populations d'espèces protégées, rares ou menacées ainsi que les végétations qui les abritent, dans un bon état de conservation ».

Trois Isoétides sont principalement visées par ce plan : l'Isoète de Bory, la Lobélie de Dortmann et la Littorelle à une fleur (Figure 7). Les Isoétides sont une communauté de macrophytes aquatiques. Il s'agit d'espèces ingénieurs capables de contrôler de nombreux cycles biogéochimiques grâce à leur perte radiale d'oxygène élevée (Bertrin, Boutry, Jamoneau, Jan, Moreira, Ribaud, 2022).

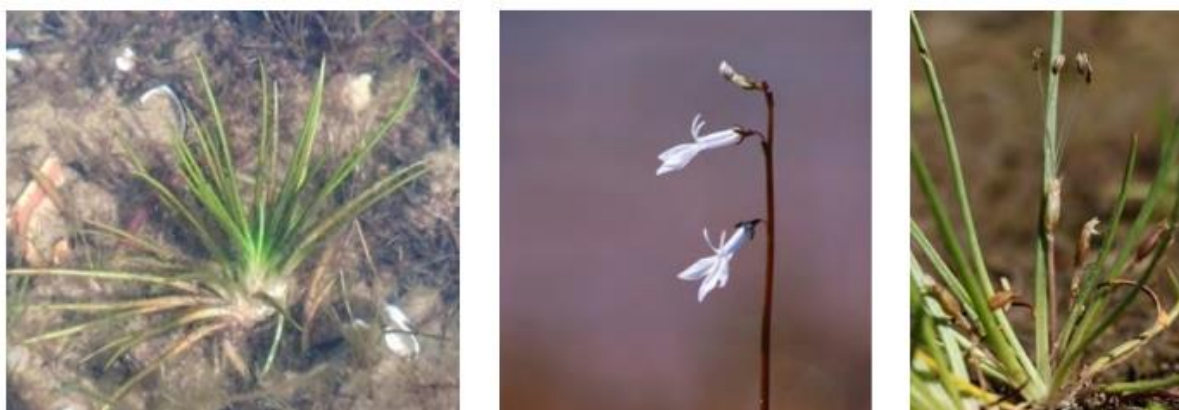


FIGURE 7 : ISOETES BORYANA (CAILLON, CBNSA), LOBELIA DORTMANNA & LITTORELLA UNIFLORA (MESLAGE, CBNSA)

Ces trois espèces colonisent les secteurs moyennement profonds et peuvent supporter de brèves périodes d'exondations si le substrat reste humide. L'isoète de Bory est immergée sous une tranche d'eau de 0,3 à 1 mètre, tandis que les deux autres sont amphibies. Au sein de grands lacs médocains, l'Isoètes de Bory est toutefois présumée absente (PNA, 2021).

Le statut patrimonial des espèces, dans les listes rouges ou autre réglementation pour leur conservation est résumé dans la Tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous, à différentes échelles :

	Niveau mondial	Niveau régional
Lobelia Dortmanna	Protégée par arrêté interministériel 20/01/1982 Liste rouge de la flore vasculaire de métropole (NT)	Liste Rouge de la flore vasculaire d'Aquitaine (EN)
Littorella Uniflora	Protégée par arrêté interministériel 20/01/1982	Liste rouge de la flore vasculaire d'Aquitaine (NT)

TABLEAU 2 : STATUT PATRIMONIAL DES TAXONS (NT = QUASI-MENACE; EN = EN DANGER) D'APRES CBNSA, 2018

Avec la mise en œuvre de ce PNA, d'autres espèces végétales présentant des enjeux de conservation ou réglementaire particulier pourront bénéficier des actions de conservation menées. Un récapitulatif de ces espèces est disponible en Annexe 2.

Ces espèces étant déjà menacées dans les lacs médocains, la variabilité des niveaux d'eau pourrait davantage contribuer localement à la régression de cette végétation amphibie. Pour l'accomplissement du cycle biologique des communautés Isoétides, des variations saisonnières et temporaires des niveaux d'eau non extrêmes sont requises (Bertrin, 2018). Des niveaux d'eau inadaptés ont des effets délétères pour les espèces concernées.

En plus de leur aspect patrimonial, ces végétations ont également un aspect fonctionnel majeur. Elles sont un refuge pour les macro-invertébrés, participent à l'oxygénation du sédiment, à la production primaire et sont également nécessaire pour la consolidation de la berge.

Les zones peu profondes et à pente douces sont les premières exposées à l'air. Une baisse du niveau du lac, même petite, correspondra à une grande surface exposée ou siège ces espèces amphibies dont le double intérêt est majeur. L'identification des zones les plus sensibles aux variations du niveau du lac et la quantification de celui-ci est ainsi nécessaire pour pouvoir anticiper et optimiser les actions de conservations et de protection de ces espèces végétales littorales de faibles profondeurs.

4.2. Stockage de carbone

Un autre enjeu important associé à l'évolution du niveau du lac complète celui de l'écologie aquatique. Les lacs représentent de grands volumes d'eau sur des surfaces relativement importantes, permettant le stockage de carbone et pouvant transporter ce carbone jusqu'à l'océan dans le cas de lacs exoréiques. Cependant, ces réservoirs continentaux de surface sont également facteurs d'émissions de gaz à effets de serre vers l'atmosphère (Phyoe et Wang, 2019). Les lacs agissent comme un piège à sédiments et à matière organique engendrant leur accumulation sur le fond et berges. Ce substrat sédimentaire et organique est davantage exposé lors des périodes de sécheresse, quand le niveau du lac est bas. Keller et al. (2021) ont justement étudié le budget carbone de nombreux barrages. Ils ont observé qu'en prenant en compte les variations du niveau de la surface de l'eau, et donc des surfaces exposées à l'air libre des baisses de ce niveau, les émissions de carbone par ces réservoirs étaient supérieures au captage de carbone par ce puits. Pour contraster ce propos, ils ont utilisé la même approche sans prendre en compte ces zones exposées, et le ratio émissions de

carbone/captage de carbone de ces barrages est autour de 1, donc autant de sorties que d'entrées de carbone. Ici le captage de carbone est compris comme étant l'enfouissement de la matière organique. A noter que l'étude ici présente s'intéresse à un lac et non à un barrage, donc ces affirmations doivent être prises avec précautions, étant donné qu'un barrage est beaucoup plus soumis à des variations importantes du niveau qu'un lac, et ce pour des raisons d'usage de l'eau. Il est tout de même net que les berges étant exposées à l'air libre suivant les variations du niveau du lac accélèrent la décomposition de la matière organique anciennement stockée, libérant des gaz à effet de serre. C'est également ce qu'indique l'étude de Martinsen et al. (2019), qui ont quantifié les flux de CO₂ de plusieurs étangs et ont montré que les flux de CO₂ des surfaces exposées sont largement supérieurs à ceux des surfaces d'eau. Ce phénomène de décomposition de la MO et d'émissions de carbone dépend bien entendu de la durée d'exposition et de la surface affectée.

Ces informations sont importantes non seulement pour mieux comprendre le cycle du carbone dans ces réservoirs d'eau de surface, mais également pour mieux appréhender le futur du carbone enfoui dans le fond de ces lacs/étangs. L'exposition de surfaces de plus en plus importantes sur les berges du lac dans le futur, liée à une possible baisse du niveau des lacs associée au changement climatique, pourrait perturber grandement le ratio émissions/captage de carbone dans le lac de Carcans-Hourtin.

4.3. Usages

Additionnellement au fait que l'évolution du niveau du lac ait un impact non négligeable sur l'écologie aquatique et sur le budget carbone lié au lac, les usages anthropiques sont également sujets à des conséquences qui doivent être prises en compte. Actuellement, le lac de Carcans-Hourtin, tout comme les autres lacs médocains, assurent de nombreuses activités écosystémiques, dont celles liées à l'activité anthropique (SIAEBVELG, 2021) :

- Le tourisme : depuis les années 1960, les lacs médocains font l'objet d'un tourisme balnéaire important et donc d'un apport économique pour les communes non négligeables.
- L'agriculture et la sylviculture : les terres autour des lacs sont majoritairement dédiées aux activités agro-sylvicoles qui dépendent des ressources en eau de la nappe superficielle, nappe qui alimente directement le lac
- La pêche et la chasse aux canards : ces activités de loisirs nécessitent une bonne qualité et quantité des eaux et des infrastructures dédiées.

La réorganisation du lac et des berges quant au matériel et aux infrastructures nécessaires pour le tourisme tels que les campings, les bouées de baignade, ou encore pour la pêche et la chasse tels que les pontons de navigation ou les tonnes pour la chasse aux canards serait à prévoir si le niveau du lac venait à baisser. En effet, un retrait du trait de côte engendrerait une nécessité de les déplacer. Viendrait alors en conséquence des coûts et une gestion supplémentaire, donc il est important de les anticiper.

L'agriculture et la sylviculture drainent une grande quantité d'eau de la nappe, cependant il n'y a actuellement pas d'effet notable sur le niveau de la nappe (SIAEBVELG), donc l'alimentation du lac par la nappe ne devrait pas être affecté considérablement.

Partie II : Bathymétrie du lac de Carcans-Hourtin

1. Introduction et enjeux

La bathymétrie est l'étude des profondeurs d'un océan ou d'un lac. Le terme est l'équivalent de la topographie en domaine terrestre.

Une mesure bathymétrique est réalisée à l'aide de sondeurs capables de relever la profondeur d'un plan d'eau. Il s'agit de données nécessaires afin de suivre le niveau d'eau du lac ainsi que le profil d'élévation du fond du lac. Les caractéristiques du fond lacustre présentent un intérêt majeur car elles jouent un rôle dans la répartition des espèces végétales dont les habitats sont uniques et dépendent de la tranche d'eau disponible. En général, les mesures bathymétriques sont utilisées pour construire des cartes de l'altitude du fond sédimentaire du lac et constituent donc un véritable outil de suivi de l'évolution du lac et des écosystèmes associés.

Ainsi, au sein du lac d'Hourtin, l'enjeu est tout d'abord d'obtenir la bathymétrie du lac. Celle-ci se veut précise en bordure de la côte est en raison des enjeux qui sont associés à cette frange de faible profondeur. Pour cela, un modèle numérique de terrain (MNT) de la bathymétrie de la zone est créé à partir de différentes sources de données qu'il convient de présenter. L'erreur sur l'interpolation conduisant à la création du MNT se voit ensuite évaluée afin de visualiser la justesse du modèle et les limites à prendre en considération. Enfin, il est intéressant de discuter quant aux perspectives et améliorations à apporter afin d'obtenir un MNT davantage efficient.

L'analyse spatiale est utilisée pour manipuler l'information spatiale issue des différents jeux de données. L'objectif est d'extraire une nouvelle information à partir de la signification des données d'entrée. L'analyse spatiale est réalisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) sous l'interface QGIS.

Ce modèle numérique de terrain de la bathymétrie du lac d'Hourtin sera par la suite utilisé dans la Partie 3 comme donnée d'entrée pour la réalisation du bilan hydrique du lac.

2. Données disponibles

Au sein d'un lac, la bathymétrie peut être mesurée à partir de différentes méthodes de relevés. Selon l'épaisseur de la tranche d'eau et la côte atteinte par le niveau du lac, l'usage de certains outils est plus optimal que d'autres. Les secteurs associés à chaque méthode de relevé sont représentés sur le schéma de la Figure 8 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous.

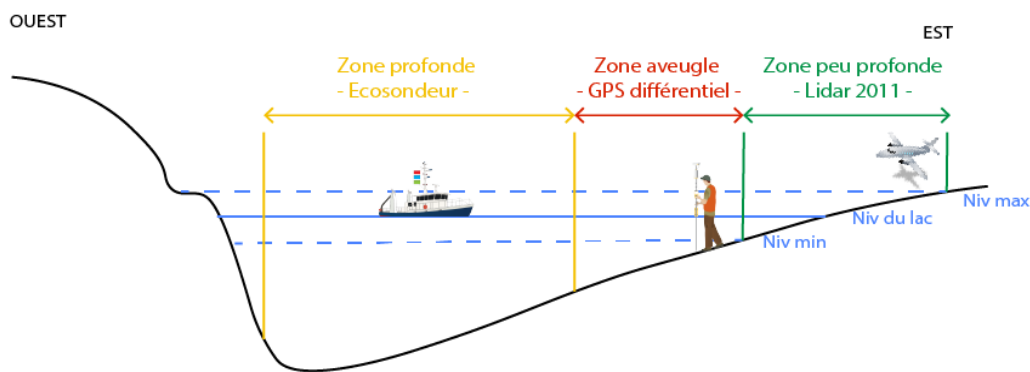


FIGURE 8 : LES DIFFERENTS TYPES DE RELEVES SUR LE LAC DE CARCANS-HOURTIN

2.1. Données par l'échosondeur

2.1.1. Principe d'obtention des données

Les données échosondeur sont relevées par un bateau parcourant le lac. L'échosondeur est capable de déterminer la profondeur à partir des phénomènes de réflexion d'ondes acoustiques. Un sondeur transmet une pulsion électrique à la sonde immergée qui la transforme en onde d'ultrasons. Celle-ci est envoyée vers le fond selon une fréquence prédéfinie, généralement autour de 200 kHz pour un sondage en eau douce. L'impulsion sonore se propage dans la tranche d'eau, se réfléchit lorsqu'elle rencontre un obstacle et revient vers le récepteur. La mesure du temps de trajet permet ainsi d'accéder à la mesure de profondeur. (CEMAGREF)

L'échosondeur présente une limite de détection du fond du lac d'une profondeur minimale de 1 mètre. En effet, c'est l'épaisseur minimale de tranche d'eau nécessaire au capteur pour qu'il puisse acquérir des relevés. En deçà de cette épaisseur de tranche d'eau, les valeurs ne sont pas fiables. Ainsi, les données par l'échosondeur ne sont pas disponibles au niveau de la frange de faible profondeur mais uniquement dans la partie centrale du lac.

2.1.2. Visualisation des données

Les données échosondeur utilisées pour la création du MNT proviennent d'une campagne par bateau réalisée le 20/03/2014.

L'échosondeur ne fournit non pas l'altitude du fond du lac mais la profondeur de celui-ci. A partir du niveau du lac observé le jour du relevé, il faut donc calculer la côte bathymétrique du lac (Figure 9Figure 9).

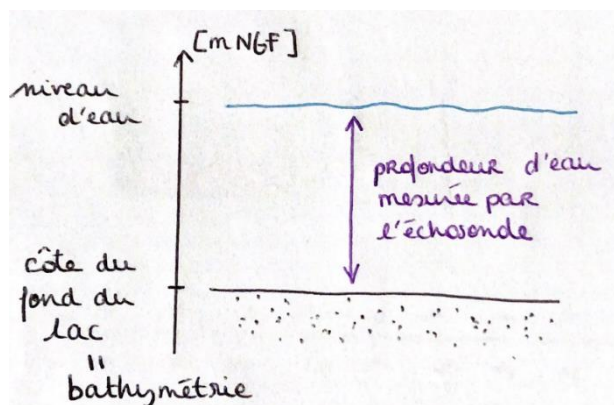


FIGURE 9 : SCHEMA DU CALCUL DE LA BATHYMETRIE A PARTIR DES DONNEES ECHOSONDE

$$\text{Bathymétrie [m NGF]} = \text{niveau du lac [m NGF]} - \text{profondeur d'eau}$$

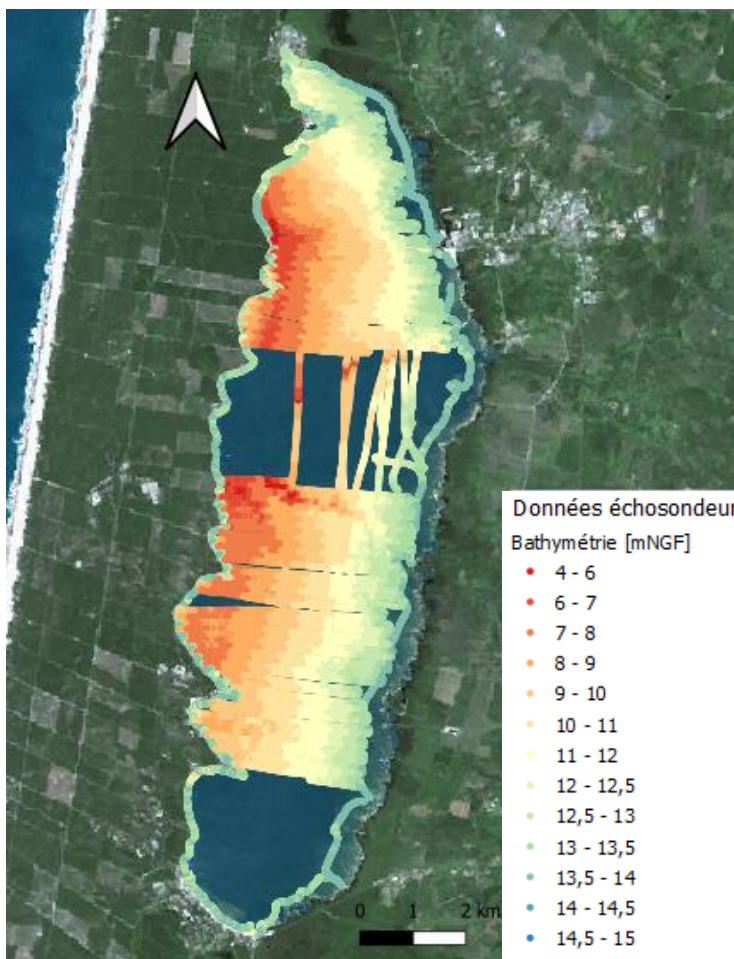


FIGURE 10 : DONNEES ISSUES DE L'ECHOSONDEUR

Les données issues des relevés par l'échosondeur ne sont pas homogènes sur l'ensemble du lac (Figure 10), avec des secteurs très bien imagés et d'autres dénués de relevés. Dans ces secteurs sans mesure de terrain, l'interpolation peut s'avérer complexe et éloignée de la réalité. La surface résultante dépendra grandement de la méthode d'interpolation utilisée étant donné l'absence de valeurs connues disponibles pour contraindre les calculs.

2.2. Données LIDAR topographique

2.2.1. Principe d'obtention des relevés

Les données LIDAR s'obtiennent à partir de relevés par avion, le LIDAR mesure la surface du sol et ne pénètre pas l'eau. Le LIDAR, acronyme de '*light detection and ranging*', est un système qui fonctionne sur le principe d'une émission/réception d'impulsions lumineuses. Les LIDARS topographiques fonctionnent avec des impulsions de faible puissance et des longueurs d'onde situées dans l'infrarouge pour mesurer leur distance à la cible comme schématisé dans les Figure 11Figure 12 (Allouis, 2007).

Les données LIDAR mesurées au-dessus d'une surface d'eau ne témoignent donc pas du fond bathymétrique mais du niveau d'eau du lac. Ainsi, les mesures sont faites idéalement lorsque le niveau d'eau est au plus bas afin d'imager la plus grande étendue de frange du fond du lac possible.

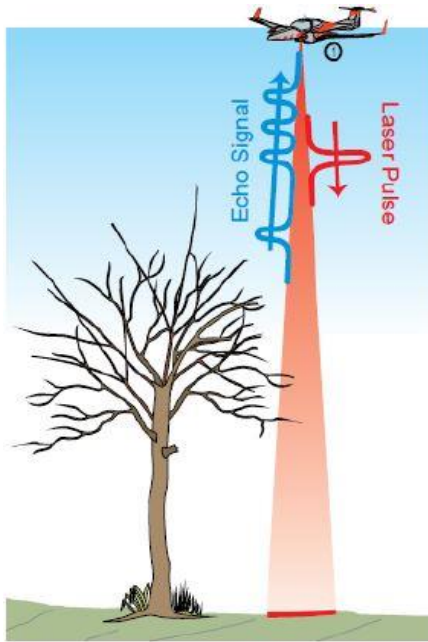


FIGURE 11 : FONCTIONNEMENT DES RELEVÉS LIDAR (SMBVA)

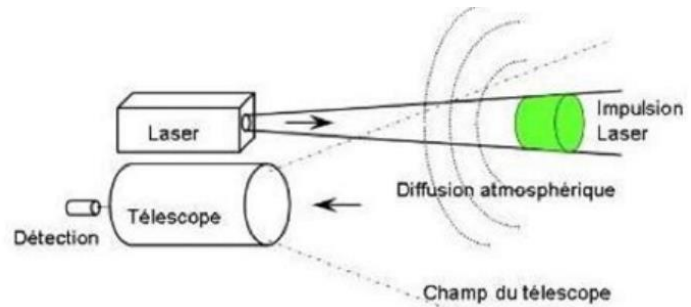


FIGURE 12 : PRINCIPE DU LIDAR (OMER7A)

2.2.2. Visualisation des données

Les données utilisées pour la création du MNT proviennent d'une campagne de LIDAR financée par le SIAEBVELG. Elles sont datées du 2 et 3 décembre 2011, jour auquel le niveau du lac était de 13,695 m NGF.

A noter qu'une nouvelle campagne a été réalisée en 2021 mais le niveau du lac était plus élevé et les relevés n'ont pas été concentrés sur la zone de bordure du lac mais davantage sur les parcelles extérieures, ce qui constitue un intérêt moindre pour cette étude.

La classe de précision des données lidar est de l'ordre de 10 centimètres (SIABVELG, 2011).

Initialement disponibles avec une densité de 3,8 points au m², les données LIDAR ont été rééchantillonnées en conservant une donnée tous les 10 mètres afin de travailler avec un fichier moins lourd qui puisse être traité par les outils QGIS et que la proportion des données reste cohérente avec la quantité des autres sources de données.

Des relevés LIDAR étaient disponibles au milieu du lac, correspondant donc à la surface du lac et non à la bathymétrie, ces données ont donc été filtrées. Enfin, ont été conservées uniquement les données correspondant au contour du lac afin que la topographie environnante n'impacte pas le calcul des valeurs bathymétriques lors du processus d'interpolation (Figure 13).

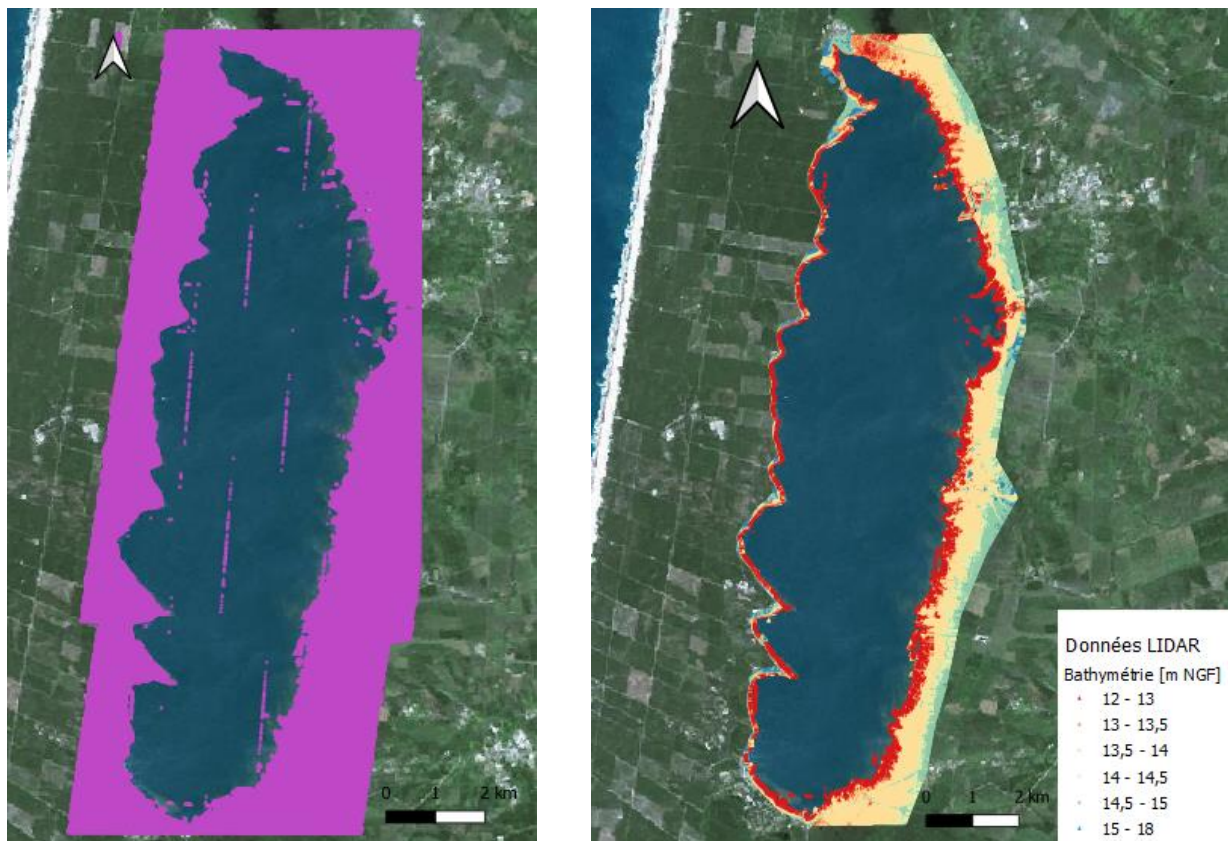


FIGURE 13 : GAUCHE : DONNEES LIDAR BRUTES / DROITE : DONNEES LIDAR POST-TRAITEMENT

2.3. Données DGPS

2.3.1. Principe de relevés manuels

Comme représenté sur le schéma de la Figure 14, au vu des conditions d'utilisation de chacune des méthodes, la frange de faible profondeur se trouve dénuée de données. En effet, le LIDAR n'est efficace que jusqu'au niveau minimal du lac, tandis que l'échosondeur fonctionne uniquement lorsque la profondeur d'eau est supérieure à 1m. Cette zone sans relevé est dite **zone aveugle** et devra être interpolée à partir des données disponibles de part et d'autre.

Pour pallier ce déficit de connaissance dans le secteur, le GPS (*Global Positioning System*) différentiel (DGPS) est utilisé. Cette technique permet de connaître en tout temps et point du globe une position géographique très précise.

Les relevés s'effectuent à partir de deux capteurs GPS, une base fixe, le pivot et une base mobile, qui est déplaçable, dont on va déposer la pointe sur les surfaces à mesurer. Grâce à la triangulation de la position du récepteur à terre par plusieurs satellites simultanément, la précision de l'ordre **centimétrique** peut être atteinte. Plus il y a de satellites connectés au DGPS, plus la mesure sera précise car les ondes radios corrigent la valeur. En effet, la station de base corrige sa position par rapport aux satellites en temps réel et transmet ces informations à la station mobile.

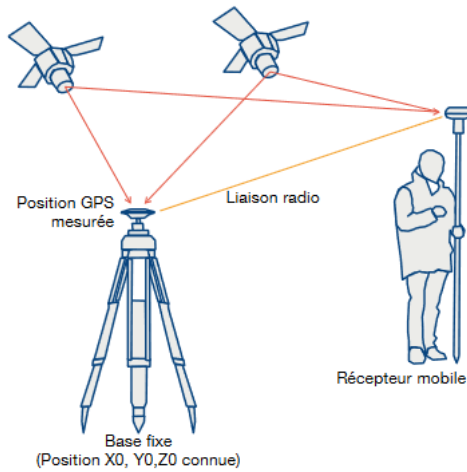


FIGURE 14 : FONCTIONNEMENT DU DGPS (GUIDE GESTION DES RISQUES D'ÉROSION ET SUBMERSION MARINE, ALLEMAND & AL)

2.3.2. Visualisation des données

La campagne de terrain a été réalisée par relevés manuels le 14/11/2022 dans le secteur des Barouins, dans la partie centrale de la frange est du lac (Figure 15).

Les données brutes sont corrigées avec les référentiels QUYC et LCAN. De plus, sur le terrain, lors de l'enregistrement des données des 2 transects au sud, la perche n'était pas relevée de façon optimale, ainsi une correction a dû être appliquée à ces données comme visible sur le schéma suivant (Figure 16).

Les données sont constituées de 5 profils linéaires d'environ 500 mètres, avec des relevés tous les 2 à 3 mètres (Figure 17).



FIGURE 15 : LOCALISATION DU SITE DES BAROUINS

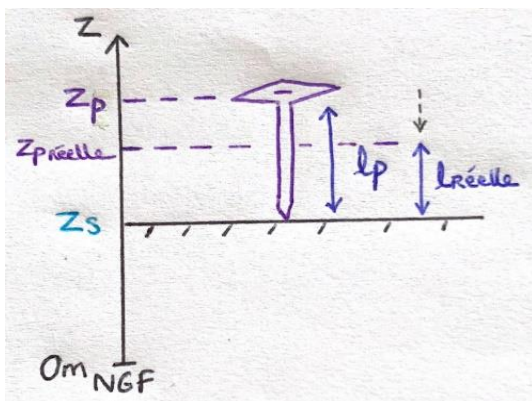


FIGURE 16 : CORRECTION DES DONNEES DGPS

$$z(sol) = z(p) - l(p) + (lp - l(réelle))$$

Avec lp la longueur de la perche théorique, $lp(réelle)$ la longueur réelle de la perche sur le terrain.

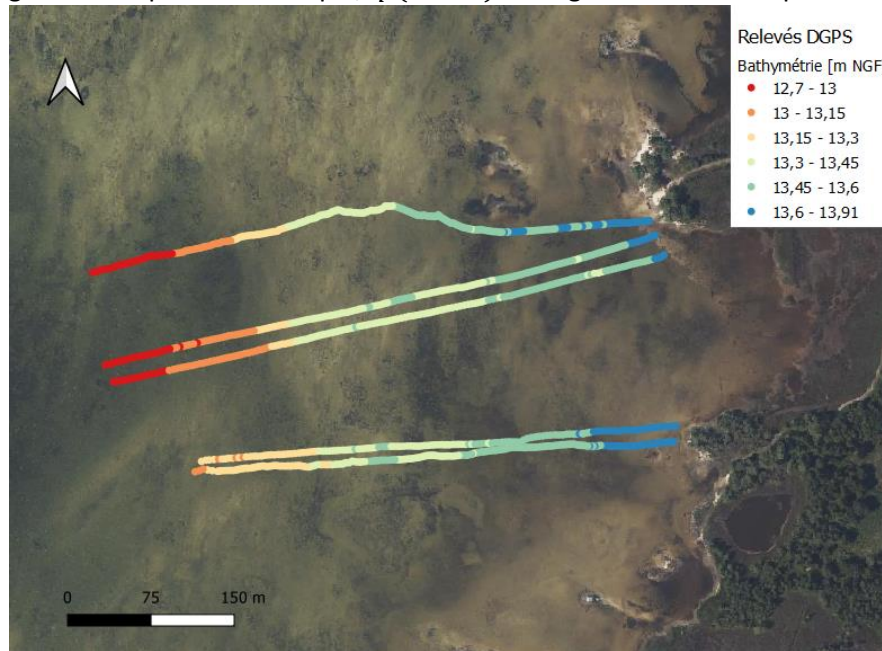


FIGURE 17 : DONNEES DGPS

Ces données DGPS, d'une précision centimétrique, ne vont pas être utilisés pour la création du MNT mais vont servir de référence lors de l'évaluation de la qualité du MNT créé à partir des données LIDAR et ECHOSONDE.

3. Méthodes d'interpolation

3.1. Principe de l'interpolation

A partir des sources de données LIDAR et ECHOSONDE, l'enjeu est d'obtenir le modèle numérique de terrain de la bathymétrie du lac s'approchant au plus près de la réalité, avec une attention toute particulière dans le secteur de la zone aveugle. Pour cela, les deux sources de données sont rassemblées et les valeurs de bathymétrie connues ponctuellement doivent être interpolées afin de disposer de valeurs bathymétriques en chaque point de l'espace.

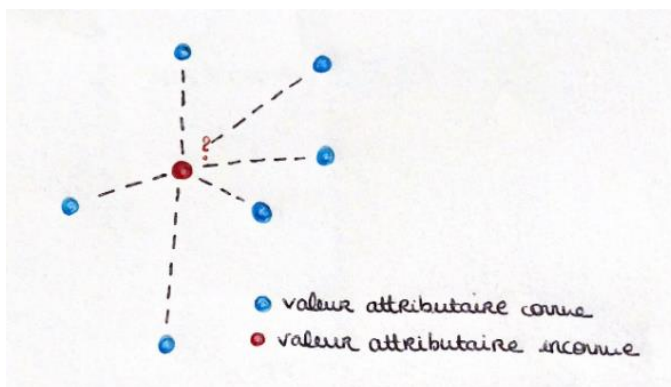


FIGURE 18: PRINCIPE D'INTERPOLATION SCHEMATIQUE

De façon générale, le principe d'interpolation spatiale est un processus mathématique consistant à assigner une valeur à tout point d'un espace à partir d'un ensemble de points dispersés dont la valeur est connue (Figure 18).

Il existe deux grandes familles de techniques d'interpolation spatiale : les approches déterministes et les approches géostatistiques. Pour la création du MNT du lac de Carcans-Hourtin, deux approches déterministes sont utilisées, la méthode par inverse distance et la méthode SPLINE. Elles sont caractérisées par des modèles mathématiques à plusieurs paramètres et prennent en compte la position géométrique des données et la distance en les points (mémoire, O.Hmouche, A. Maatoug, 2022).

3.2. La méthode par inverse distance

3.2.1. Principe

La pondération par inverse distance (PID ou IDW '*inverse distance weighting*') est une méthode qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage, pondérée par l'inverse de la distance au point calculé. Elle est ainsi basée sur l'hypothèse que chaque point d'entrée exerce une influence locale qui diminue avec la distance. En d'autres termes, les valeurs proches contribuent davantage aux valeurs interpolées que les valeurs lointaines. Ainsi cette interpolation pose l'idée que les points proches les uns des autres sont plus semblables que ceux qui sont éloignés.

La méthode détermine les valeurs de cellule via la combinaison pondérée linéaire d'un ensemble de points d'échantillonnages alentours (biblio ArcGIS Pro). La technique calcule une valeur pour chaque point en examinant les points de données environnants qui se trouvent dans un rayon de recherche défini par l'utilisateur, puis la valeur est calculée en faisant la moyenne de la somme pondérée de tous les points.

En conséquence de la pondération utilisée, la surface résultant de l'interpolation ne dépasse ni la valeur maximale, ni minimale et ne passe pas exactement par les points d'origine. De plus, « la fonction doit être utilisée lorsque l'ensemble de points est suffisamment dense pour capturer l'étendue de la variation locale de la surface » (mémoire K. RAHAB, 2021). Les points denses à espaces réguliers sont bien interpolés, ainsi cette méthode est judicieuse pour l'interpolation des données LIDAR dont le maillage est homogène. Cependant, la qualité du résultat d'interpolation diminue si la distribution des points de données échantillonnées est irrégulière. Elle semble donc moins appropriée pour l'interpolation des données ECHOSONDE réparties très hétérogènement.

3.2.2. Paramétrage

La méthode IDW est retranscrite sous QGIS avec l'outil GRASS '*v.surf.idw*'.

Le principe se base sur deux paramètres :

- Le nombre de points d'interpolation : contrôle le nombre de points utilisés pour calculer un point dont la valeur est inconnue. Plus il est élevé, plus le rayon de prise en considération, autour de la valeur recherchée, est élevé. Ainsi, un nombre important de points sont fonction de la valeur calculée, créant ainsi une surface lisse et homogène. A l'inverse, si le nombre est trop faible, des pics isolés peuvent apparaître au dépend de reliefs continus.
➔ 12 par défaut
- La puissance d'influence : ce paramètre permet de contrôler la signification des points connus sur les valeurs interpolées en fonction de leur distance par rapport au point en sortie [biblio ArGIS]. Lorsque le coefficient augmente, la valeur du point inconnu s'approche de la valeur du point d'observation le plus proche, en d'autres termes une puissance élevée engendre une

concentration du poids d'influence sur les points les plus proches. A l'inverse, les points auront moins d'influence sur la procédure de calcul s'ils sont loin du point inconnu. Si la valeur de puissance est considérée faible, le processus accorde plus d'influence aux points environnants les plus éloignés, ce qui génère une surface davantage lissée.

➔ 2 par défaut

Les paramètres de l'outil ont été ajustés par tests successifs, afin d'obtenir la meilleure représentation visuelle possible des données, puis les résultats sont comparés avec les relevés DGPS afin d'approcher au plus les valeurs des relevés de terrain. Ainsi, les paramètres retenus sont les suivants :

Nombre de points d'interpolation = 50

Puissance de l'interpolation = 2

Résolution de la surface résultante = 10m

3.3. La méthode SPLINE

3.3.1. Principe technique

En mathématiques appliquées et en analyse numérique, une spline est une fonction définie par une multitude de polynômes.

L'interpolation via l'outil SPLINE utilise une fonction mathématique afin de minimiser la courbure de la surface et produit une surface lisse qui correspond exactement aux points d'entrée. Elle consiste à ajuster une courbe autour de points et à attribuer à la cellule raster la valeur de la courbe.

Les valeurs sont estimées à l'aide de fonction polynomiale, bilinéaire ou bicubique en accord avec chaque section de l'espace, créant une surface interpolée douce. Elle ajuste la fonction mathématique à un nombre spécifié de points d'entrée les plus proches, tout en passant par les points d'échantillonnage. Afin d'être au plus proche des valeurs, cette interpolation ajuste des polynômes de bas degré à des petits sous-ensembles de valeurs, plutôt que d'ajuster un polynôme unique de haut degré à l'ensemble des valeurs.

La surface créée passe exactement par les valeurs aux points d'entrée. Il s'agit ainsi de l'une des méthodes les plus exactes n'admettant pas d'approximation ni de lissage des valeurs connues. Ainsi, elle préserve les tendances dans les données de l'échantillon et s'adapte rapidement aux changements rapides de gradient ou de pente (thèse O.Hmouche, A. Maatoug, 2022). Elle est particulièrement adaptée pour les surfaces qui varient doucement et crée un effet de surface lisse.

3.3.2. Paramétrage

Sur le logiciel QGIS, dans la bibliothèque GRASS, l'algorithme '*v.surf.bspline*' retranscrit la méthode d'interpolation par spline. Il effectue une interpolation spline bicubique ou bilinéaire avec la régularisation de Tykhonov.

Les paramètres en entrée sont les suivants :

- L'algorithme d'interpolation : bilinear par défaut
- La longueur de chaque pas de spline : En règle générale, la longueur du pas de spline doit être supérieure à la distance moyenne entre les points d'observation (documentation GRASS). Après test successifs, la valeur retenue en est-ouest et nord-sud est 30.

4. MNT de la bathymétrie du lac

A l'issue de l'interpolation de l'ensemble des données LIDAR et échosondeur par les méthodes IDW et SPLINE, les modèles numériques de terrain obtenus respectivement sont présentés ci-dessous (Figure 19).

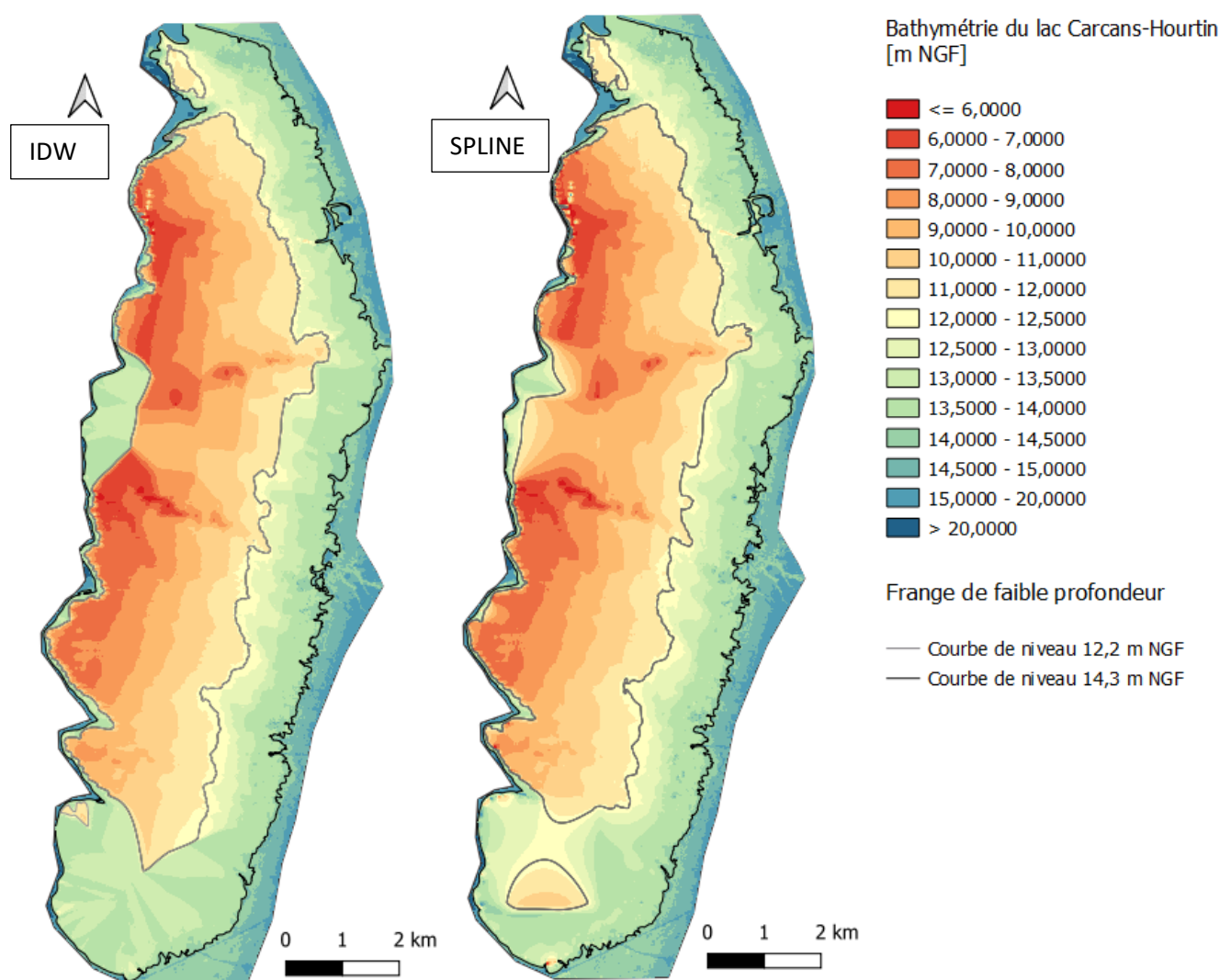


FIGURE 19: MNT DU LAC DE CARCANS HOURTIN INTERPOLE PAR LA METHODE (1) IDW ET (2) SPLINE

La bathymétrie est représentée par classes de couleurs, avec des intervalles de valeurs plus étroits pour le secteur se trouvant entre 12 et 15 m NGF.

Le MNT créé par IDW est fait d'une bathymétrie s'étendant de 5,3 à 31 m NGF, tandis qu'elles le sont de 4 à 39 m NGF pour celui obtenu par la méthode SPLINE. En effet, comme expliqué au préalable dans le principe technique des méthodes d'interpolation, la méthode IDW lisse les valeurs et ne crée pas de points avec des valeurs au-delà des valeurs limites des données d'entrée.

Sur les deux modèles, il est observable une asymétrie dans la bathymétrie d'est en ouest. A l'ouest, la topographie est davantage escarpée avec une diminution abrupte de plus de 5 m d'altitude. A l'est cependant, la frange de faible profondeur avec une pente très douce est bien observable. Cette frange

est délimitée par les courbes de niveau de 12,2 m NGF, correspondant au niveau minimum du lac déjà observé moins 1 mètre, à 14,3 m NGF, s'apparentant à la côte de surverse étant de 14,25 m NGF (à partir de laquelle il y débordement vers les canaux.

$$\begin{aligned} \text{Niveau minimum du lac attendu} &= \text{niveau minimum observé} - 1 \text{ mètre} \\ \text{Niveau maximum du lac} &= \text{côte de surverse} \end{aligned}$$

La zone comprise entre le niveau minimum attendu et le niveau maximum demande une attention toute particulière car il s'agit de la zone d'amplitude de variabilité du niveau du lac attendue, étant donné les contraintes climatiques auxquelles il se trouve soumis. Cette zone représente une part importante car elle est constituée par une surface proche de celle de la moitié du lac, avec une largeur d'environ 1km.

Globalement, les deux méthodes d'interpolation fournissent des résultats similaires avec des agencements de la bathymétrie du lac très proches. Les différences observées résident dans le secteur sud ainsi que dans le secteur central côte ouest. Ces localisations correspondent étroitement aux zones où les données d'entrées sont manquantes. En effet, le sud n'est imagé que par très peu de valeurs de bathymétrie et le centre l'est par des données imagées selon un maillage très irrégulier.

- L'interpolation par IDW fournit des formes géométriques aux tendances triangulaires au sud et rectangulaire au centre, sûrement éloignées de la réalité. Il n'y a pas suffisamment de données disponibles pour estimer les valeurs inconnues par pondération linéaire. Ce calcul est ainsi au-delà des limites de la méthode d'interpolation et fournit des résultats qu'il convient d'écarter.
- Concernant l'interpolation par la méthode SPLINE, les résultats sont davantage lissés avec des formes plus arrondies et pentes plus douces. La méthode semble mieux pallier ce manque de données disponibles en ajustant une topographie jugée davantage réaliste. L'algorithme associé n'est toutefois également pas optimal face à une hétérogénéité telle des données. Similairement que pour l'interpolation par IDW, cela constitue l'une des limites du processus d'interpolation.

Pour la suite de l'étude, le modèle interpolé par SPLINE est donc favorisé d'un point de vue visuel car ses estimations sont considérées plus probables. Il convient toutefois de réaliser une quantification de l'erreur sur chacun des deux modèles afin de les évaluer également d'un point de vue statistique.

5. Evaluation du modèle (quantification de l'erreur)

Le MNT qui a été créé constitue un modèle de prédiction. Afin que celui-ci soit considéré pour la suite de l'étude, il doit être validé. L'objectif est d'évaluer si le modèle génère de bonnes estimations des valeurs de la variable étudiée. Le jeu de données pour créer le modèle est constitué des données LIDAR et d'échosondeur, tandis que le jeu de données de validation correspond aux relevés manuels DGPS. Ce dernier permet de d'évaluer si le modèle résultant est fiable, pertinent et proche de la réalité. Les deux jeux de données doivent être indépendants afin de ne pas biaiser le résultat.

Afin d'évaluer l'erreur sur le modèle il est intéressant de procéder à un calcul de différence entre les valeurs calculées par interpolation, présentes sur le MNT et les valeurs mesurées manuellement par DGPS. Sur l'interface QGIS, l'outil 'v.sample' de la bibliothèque GRASS est particulièrement utile pour

valider une interpolation dont la sortie est un raster. En effet, son principe est le suivant : l'outil échantillonne une carte raster, ici le MNT du lac, à l'emplacement des points vectoriels, soit au niveau des données ponctuelles DGPS. Par la méthode des plus proches voisins, implémentée par défaut, l'outil crée une couche vecteur disposant des coordonnées des points d'échantillonnage, de la valeur bathymétrique du raster, de la valeur du relevé DGPS ainsi que de la différence entre les deux.

Pour une évaluation complète des résultats, il convient de procéder par une analyse à la fois visuelle et statistique.

5.1. Évaluation visuelle de l'erreur

Tout d'abord, la valeur de différence calculée est présentée sur les figures ci-dessous. Quelque soit la méthode d'interpolation utilisée pour la création du MNT, la différence 'raster – DGPS' s'étend, en valeur absolue, de 0 à 50 centimètres (Figure 20).

De la même manière, pour chacune des interpolations, il est notable que davantage de différences sont observées pour des profondeurs d'eau plus importantes qu'au niveau de la frange de très faible profondeur. En effet, en bordure est, le LIDAR constitue un meilleur échantillonnage, plus continu et homogène, ce qui permet une meilleure qualité d'interpolation. Dans ce secteur, la différence observée s'étend de 0 à 25 centimètres. À l'inverse, en s'intéressant au secteur ouest, la qualité de l'interpolation diminue, allant de 25 jusqu'à 55 centimètres de différence. Cela peut s'expliquer par deux raisons :

- Tout d'abord, les données bathymétriques disponibles sont moins conséquentes quantitativement et réparties irrégulièrement, ce qui complique le processus d'interpolation.
- De plus, comme explicité précédemment, l'échosondeur est optimal pour une profondeur d'eau supérieure à 1 mètre. Ainsi, dans cette zone de bordure, la qualité des relevés est possiblement altérée. Les données échosondeur dans le secteur sont alors probablement accompagnées d'incertitudes importantes sur la mesure.

Différence MNT - DGPS [cm]

- -25 ; -10
- -10 ; 10
- 10 ; 25
- 25 ; 35
- 35 ; 55

Données bathmétriques [m NGF]

LIDAR

- 12,8 - 13
- 13 - 13,2
- 13,2 - 13,4
- 13,4 - 13,6
- 13,6 - 13,8
- 13,8 - 14
- 14 - 14,2
- 14,2 - 14,4
- 14,4 - 14,6
- 14,6 - 14,8

ECHOSONDE

- ◆ 12,8 - 13
- ◆ 13 - 13,2
- ◆ 13,2 - 13,4
- ◆ 13,4 - 13,6
- ◆ 13,6 - 13,8
- ◆ 13,8 - 14
- ◆ 14 - 14,2
- ◆ 14,2 - 14,4
- ◆ 14,4 - 14,6
- ◆ 14,6 - 14,8

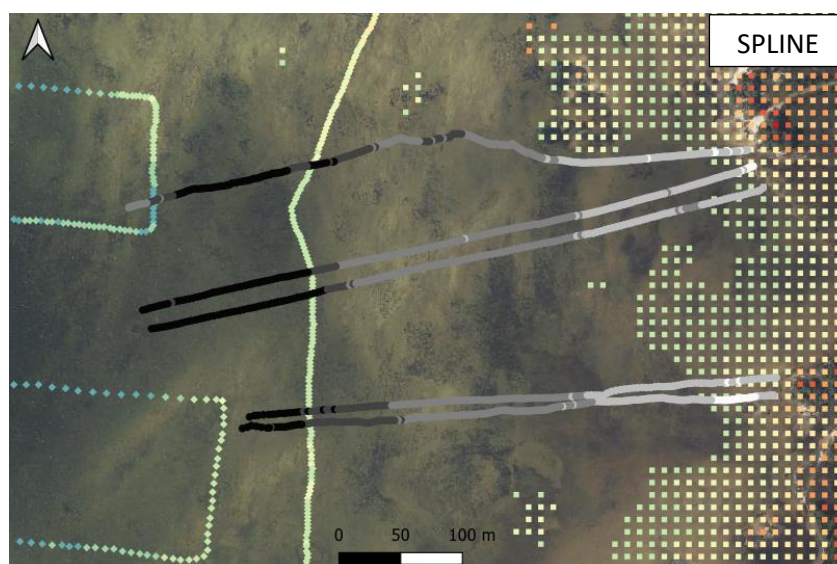
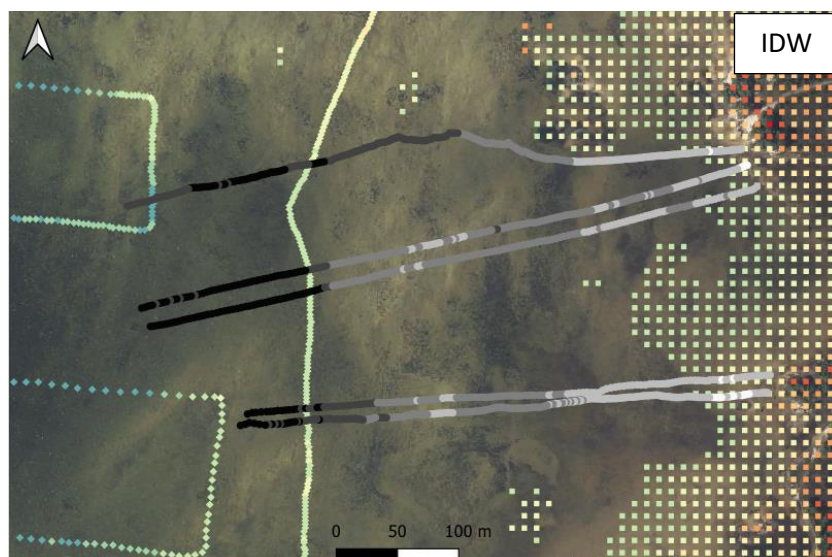


FIGURE 20: REPRESENTATION VISUELLE DE LA DIFFERENCE BATHYMETRIQUE MNT – DGPS POUR LES INTERPOLATIONS IDW ET SPLINE RESPECTIVEMENT

5.2. Évaluation par statistiques

La distribution des données peut également être visualisée sous forme d'un graphique dit boîte à moustache (Figure 21). C'est une représentation statistique visuelle permettant de résumer simplement la répartition de la variable d'intérêt, à partir notamment des valeurs extrêmes, de la médiane et des quartiles.

La répartition des erreurs décrites visuellement est bien confirmée lors de la mise en forme des différences absolues, réparties en intervalles bathymétriques. Pour des altitudes bathymétriques allant de 13,4 à 14 m NGF, localisées dans le secteur est, la médiane et moyenne des échantillons se trouvent aux alentours de 10 centimètres. A l'inverse, dans le secteur plus profond à l'ouest, aux altitudes comprises entre 18,2 et 13,2 mètres NGF, la médiane et moyenne des différences frôle les 40 centimètres. De plus, pour l'interpolation SPLINE, des valeurs aberrantes sont présentes pour la classe bathymétrique de 12,8 à 13 m NGF. Ainsi, ces informations traduisent bien le caractère plus incertain des valeurs bathymétriques en zone plus profonde, dû à une moins bonne qualité des données.

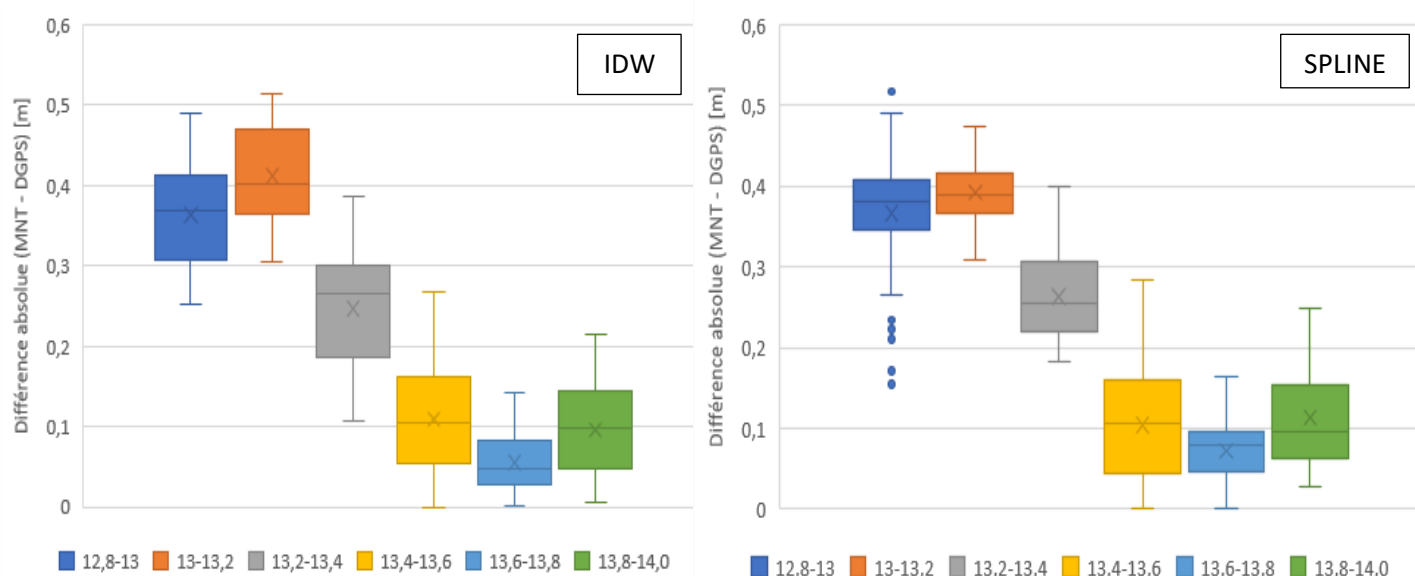


FIGURE 21: REPARTITION DES DIFFERENCES OBSERVEES EN FONCTION DE LA BATHYMETRIE [M NGF]

La représentation graphique de la valeur calculée par l'interpolation en fonction de la valeur mesurée, accompagnée du biais et de la RMSE est nécessaire afin de conclure sur l'acceptabilité de l'erreur résidant dans le modèle interpolé.

Le graphique (Figure 22) montre, similairement pour chacune des interpolations, que pour des bathymétries inférieures à 13,5 mètres NGF, les valeurs interpolées sont largement surestimées vis-à-vis des valeurs mesurées. A l'inverse à partir de 13,6 m NGF, les valeurs s'alignent selon la courbe l'axe

x=y, ce qui signifie une correspondance entre les valeurs élevées. Les valeurs calculées sont très légèrement sous-estimées.

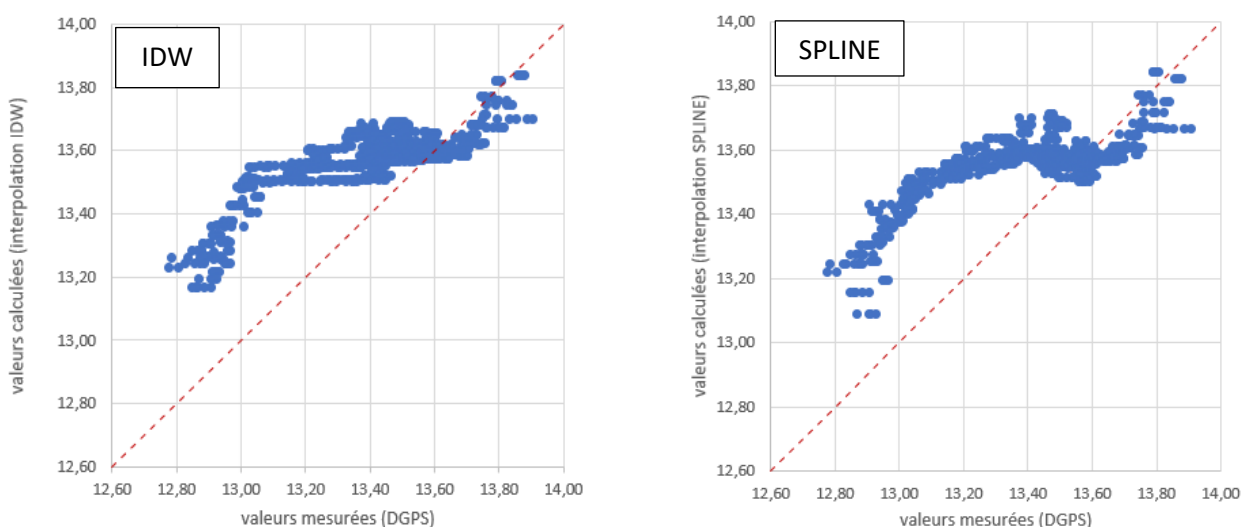


FIGURE 22: LES VALEURS BATHYMETRIQUES INTERPOLEES EN FONCTION DES VALEURS MESUREES [M NGF]
(1) INTERPOLATION IDW ; (2) INTERPOLATION SPLINE

Les indicateurs intéressants pour valider un modèle de prédiction sont calculés de la façon suivante :

- Le biais : « permet d'évaluer si les prédictions sont précises ou non et si le modèle a tendance à sur ou sous-estimer les valeurs de la variable d'intérêt » (apexit). Il est témoin de la fidélité du modèle.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (1)$$

Avec y_i la valeur pour la i ème observation du jeu de donnée de validation, $\hat{y}_i$ la valeur prédite pour la i ème observation

Le biais indique les écarts mais ne fournit pas d'information sur l'amplitude des écarts car les valeurs positives et négatives peuvent se compenser dans le calcul de la moyenne. Ainsi, il convient de calculer l'erreur quadratique moyenne apportant des précisions sur cette amplitude.

- L'erreur quadratique moyenne, ou RMSE : « fournit des indications par rapport à la dispersion ou la variabilité de la qualité de la prédiction » (apexit). Elle caractérise la taille des écarts entre les valeurs observées mesurées et calculées. Plus la RMSE est proche de 0, meilleure est la qualité du modèle évalué.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

	Biais (m)	RMSE (m)
Interpolation IDW	0,1726	0,2324
Interpolation SPLINE	0,1245	0,2307

Le biais résultant, plus important pour dans le modèle IDW que pour le modèle SPLINE, indique bien une surestimation des valeurs du modèle, ce qui confirme les observations issues du graphique de la figure 22.

Chacun des modèles est accompagné d'une RMSE d'une valeur de 23 centimètres. Or cette amplitude d'écarts fait écho à la microtopographie présente sur le fond du lac. En effet les micro-dunes sableuses issues des mouvements d'eau sont de cet ordre de grandeur. Si celles-ci ne sont pas imagées par des relevées, leur présence n'est pas prédictible par l'interpolation. De plus, la résolution du MNT de sortie étant de 10 mètres, un effet de lissage est appliqué vis-à-vis des microtopographies qui peuvent alors être masquées.

Ainsi, pour conclure quant à l'erreur observée et les incertitudes sur le produit de l'interpolation, les différences constatées entre les MNT et les relevés manuels DGPS semblent cohérentes. En effet, le fond du lac est d'une lithologie sableuse, favorisant l'instabilité du substrat et sa disposition changeante. Il est important de rappeler que le LIDAR date de 2011 et les données échosondeurs ont été relevées en 2014, tandis que les relevées DGPS servant de comparaison pour la validation sont de 2022. Ainsi, durant cette dizaine d'années d'écart, il est évident que la localisation des bancs de sable et leur étendue a fluctué, faisant ainsi varier la micro-bathymétrie et pouvant expliquer les écarts du modèle à la réalité.

Ces incertitudes sont relevées similairement quel que soit la méthode d'interpolation employée. Il est alors déductible que la qualité du MNT est surtout contrôlée par la qualité et quantité des données d'entrées utilisées pour l'interpolation. C'est ainsi sur cette piste qu'il convient de travailler pour améliorer le modèle de bathymétrie du lac. L'évaluation du modèle a toutefois été réalisée à partir de relevés DGPS effectués sur un unique secteur du lac. Il faudrait réaliser davantage de mesures au niveau d'autres sites afin de s'assurer de la validité de l'interpolation sur l'ensemble du lac.

Pour la suite de l'étude et la réalisation bilan hydrique, le MNT SPLINE est conservé car il est visuellement le plus satisfaisant en termes de continuité. Cela se confirme par la valeur de ses paramètres statistiques légèrement meilleurs.

6. Perspectives d'amélioration de la qualité du MNT

Au vu de l'erreur calculée sur le modèle interpolé au niveau de la frange est du lac dans le secteur des Barouins, de nombreuses incertitudes résident vis-à-vis de la bathymétrie obtenue. Il est ainsi intéressant de se questionner quant aux améliorations à apporter pour optimiser la qualité du MNT, c'est-à-dire sa correspondance avec la topographie réelle traduite par les relevés DGPS.

6.1. Améliorer la qualité des données pour l'interpolation

Afin d'améliorer la qualité du MNT, il est judicieux de travailler sur ce qui constitue la base du modèle, soit les données brutes. L'idée est de constituer un meilleur échantillonnage, notamment au niveau de la frange de faible profondeur qui constitue un intérêt majeur.

6.1.1. Utiliser des données DGPS généralisées

L'une des options est de généraliser les données DGPS sur l'ensemble de la côte est du lac afin d'obtenir un échantillonnage homogène de cette donnée, qui pourra participer à l'interpolation. En effet, des profils de relevés DGPS espacés régulièrement sur toute l'étendue de la frange pourraient compléter la banque de données, aux côtés des données LIDAR et par l'échosonde. La continuité de ces données participerait ainsi à la création d'un MNT se rapprochant au plus près de la réalité, faisant disparaître la zone actuelle dépourvue de données dite zone aveugle.

Toutefois, les données DGPS s'obtiennent par relevés manuels et le lac de Carcans-Hourtin est d'une dimension relativement conséquente. Imager le secteur des Barouins, sur une largeur de moins de 500 mètres, à l'aide de deux DGPS fonctionnant simultanément a été le fruit d'une journée de travail sur le terrain. Ainsi, réaliser l'opération sur une frange de plus de 15 kilomètres apparaît démesurée.

Ainsi, bien qu'optimale qualitativement, cette piste n'apparaît pas judicieuse d'un point de vue opérationnel.

6.1.2. Réaliser un meilleur échantillonnage bathymétrique

La principale limite accompagnant les données bathymétriques est leur échantillonnage très hétérogène. En effet, ce maillage très irrégulier complexifie l'interpolation, notamment dans les zones dénuées de relevés. L'enjeu serait ainsi d'effectuer une nouvelle campagne de mesure par bateau afin d'imager les zones disposant de peu d'information soit la surface au sud d'environ 6 000 000 m² au sud, ainsi qu'au centre proche de la bordure ouest, une surface de l'ordre de 7 000 000 m².

Un outil apparaît judicieux pour favoriser un échantillonnage homogène et régulier sur l'ensemble du lac, il s'agit du drone bathymétrique (escadrone).

La trajectographie des échosondeurs peut être déterminée en un parcours précis grâce au géoréférencement différentiel intégré. Le drone est pilotable à distance depuis la berge ou télécommandé en mode automatique suivant le parcours déterminé en amont. Pour programmer le parcours automatique, des applications associées au drone sont spécialement conçues pour contrôler le cheminement par des points de passage et trajectoires précises. Les opérations sont plus rapides que les relevés traditionnels par bateau et l'outil est facilement maniable par un unique opérateur.

Bien que très judicieux pour un meilleur échantillonnage de la zone profonde, cet outil ne permet pas de pallier le déficit de relevés au niveau de la zone aveugle car la contrainte d'une profondeur d'eau d'environ 1 mètre minimum reste similaire. Il convient ainsi de s'intéresser à une méthode de relevés qui permettrait d'échantillonner la zone aveugle.

6.1.3. Utiliser un LIDAR bathymétrique

Le lidar bathymétrique aérien est un outil initialement développé par les services hydrographiques canadiens, australiens et suédois qui permet d'obtenir précisément la position 3D du fond d'un plan d'eau (XEOS, imagerie aérienne et relevés LIDAR). Il permet de localiser la surface et le fond de l'eau à partir de deux faisceaux laser à partir d'une même impulsion comme illustré sur le schéma ci-dessous (figure x) : un faisceau vert et un faisceau infrarouge.

Alors que l'impulsion dans l'infrarouge (1064 nm) est réfléchiée par la surface de l'eau, la particularité du faisceau vert est qu'il parvient à traverser l'eau grâce à sa longueur de 532 nm, correspondant à la fenêtre de transparence de l'eau. Lors de son trajet, une partie du signal vert se réfléchit à la surface

de l'eau et l'autre y pénètre en se diffusant dans la colonne d'eau jusqu'à se réfléchir sur le fond et faire le trajet inverse jusqu'au récepteur (Allouis, 2007).

Ainsi, les données altimétriques de ce capteur sont triples avec le niveau de la surface de l'eau, l'altimétrie du fond de l'eau ainsi que la profondeur d'eau par différence entre les deux.

Au sein des lacs, ce type de LIDAR (Figure 23) peut être utilisé pour étudier les mouvements et dépôts de sédiments notamment. Le système SHOALS 1000T a par exemple été utilisé aux Etats-Unis pour cartographier les zones peu profondes des lacs Michigan et Tahoe, servant de base de travail pour « la recherche dans l'amélioration de la discrimination des très faibles profondeurs » (Pe'eri et Philpot, 2007).

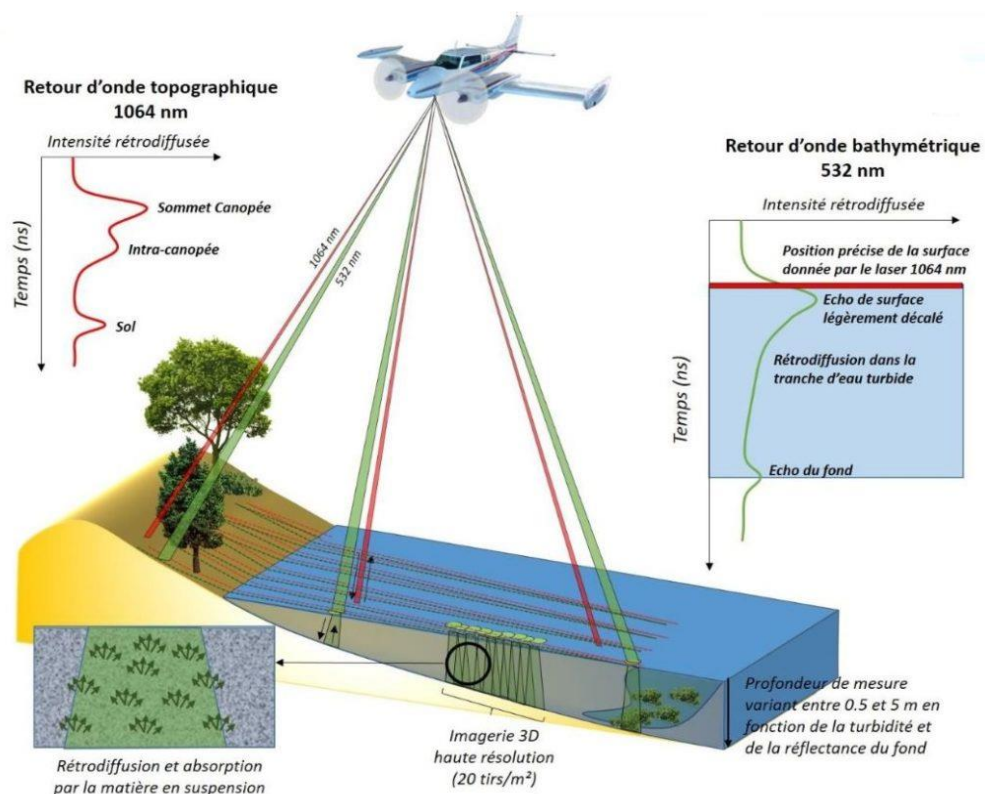


FIGURE 23: COMPARAISON LIDAR TOPOGRAPHIQUE ET BATHYMETRIQUE [SEAESCAPE.FR]

Actuellement, quatre grands systèmes de LIDAR bathymétriques existent (SHOALS 1000T, HAWK EYE II, LADS Mk II, EAARL), dont deux semblent particulièrement intéressants pour imager la frange Est de faible profondeur :

- Le SHOALS 1000T (Scanner Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) a été conçu par la société canadienne Optech. Il a par exemple été utilisé aux Etats-Unis pour cartographier les zones peu profondes des lacs Michigan et Tahoe, servant de base de travail pour « la recherche dans l'amélioration de la discrimination des très faibles profondeurs » (Pe'eri et Philpot, 2007). Sa particularité est qu'il enregistre également le signal Raman (647 nm) qui apporte des informations sur la colonne d'eau.
- Le EAARL (Experimental Advanced Airborne Research Lidar) est quant à lui un système appartenant et développé à la NASA. Sa particularité est d'utiliser une très faible puissance permettant également une meilleure qualité de relevés des zones faiblement profondes.

6.2. Améliorer la qualité de l'interprétation

Afin d'améliorer la qualité du MNT, une autre alternative serait de tester un autre type de méthode d'interpolation. Il s'agit des méthodes géostatistiques qui utilisent l'information relative à la position des points entre eux. Elles sont basées sur des modèles statistiques comprenant l'autocorrélation, c'est-à-dire les relations statistiques entre les points mesurés.

Le krigeage est l'approche géostatistique la plus utilisée à des fins d'interpolation spatiales, c'est la meilleure méthode d'estimation linéaire non biaisée pour des variables inconnues dans des zones non échantillonnées. L'objectif de cette méthode est de comprendre les relations existantes entre les observations séparées par des distances spécifiques dans l'espace. En effet, une des spécificités du krigeage est qu'il ne considère pas seulement la distance entre les observations, comme le font les méthodes déterministes (IDW, SPLINE), mais qu'il traite également la structure spatiale des données en comparant deux à deux les observations séparées par des distances spatiales spécifiques (apexit). L'outil présuppose que « la distance ou la direction liants les points d'échantillonnage reflète une corrélation spatiale pouvant expliquer les variations de surface » (ArcGIS Pro).

La méthode considère que le processus ayant donné naissance aux données peut être décomposé en deux informations :

$$Z(s) = m + e(s) \quad (3)$$

Tendance déterministe traduisant les variations à large échelle

Erreur auto-corrélée reliée dépendant de la position locale des points

Le processus de krigeage est multiple, il comprend :

- L'analyse statistique exploratoire des données
- La modélisation des variogrammes : celui-ci traduit le comportement spatial du phénomène et dépend de la répartition spatiale des données plutôt que des valeurs réelles. Un poids est alors attribué à chaque échantillon.
- La prédiction des valeurs inconnues et la génération de la surface

En plus de produire une surface interpolée, la méthode peut également fournir des informations quant à la certitude et exactitude des prévisions réalisées (Biblio ArcGIS Pro).

Les techniques de krigeage permettent de préserver les valeurs attributaires des échantillons sur la surface interpolée. A noter que cette approche est particulièrement adaptée dans les cas où on sait qu'il existe une corrélation spatiale de distance ou de direction entre les données. Cela est bien notable au sein du lac de Carcans-Hourtin avec une organisation des données bathymétrique selon des transects d'iso-niveau nord-sud.

Cette approche est toutefois plus longue à mettre en place car elle nécessite une étude préliminaire des données et un ajustement de la méthode selon leur organisation spatiale. Les outils disponibles sur l'interface QGIS ne permettent pas de réaliser directement le calcul de la surface interpolée.

Au vu de la corrélation spatiale des données bathymétriques certaines au sein du lac en terme de direction, la création d'une surface interpolée à partir de l'approche par krigeage serait une perspective judicieuse pour la poursuite de cette étude.

6.3. Améliorer la qualité de l'évaluation de l'erreur

Enfin, une perspective supplémentaire est à relever pour la continuité de ce projet, il s'agit de travailler davantage sur l'évaluation de l'erreur par les relevés DGPS. A ce jour, une unique campagne de terrain a été réalisée au niveau du site des Barouins pour effectuer des relevés manuels par DGPS. Ainsi, l'ensemble du MNT représentant une superficie de lac de l'ordre des 10^7 m² n'a été évalué qu'à partir de cinq transects d'environ 500 mètres dans un unique secteur. L'idée serait de multiplier les campagnes de terrain dans différents secteurs de la frange Est du lac afin d'avoir un échantillonnage de comparaison plus riche et plus représentatif de l'ensemble de la zone aveugle du lac. Cela permettrait ainsi de réaliser une meilleure évaluation et quantification de l'erreur sur le modèle.

7. Discussion et conclusion

Suite à l'évaluation de la qualité du MNT, il est évident que de nombreuses incertitudes résultent dans le processus d'interpolation, dues à la qualité des données d'entrées. Les données échosondeurs sont notamment échantillonnées de façon hétérogène et ne sont pas disponibles sur l'ensemble du lac. De plus, elles sont accompagnées d'incertitudes importantes en zone de bordure du lac à cause des limites de fonctionnement de la sonde reliée à la faible profondeur d'eau. S'ajoutent à cela des incertitudes lors du processus d'interpolation par SPLINE. En effet, la répartition des données et l'absence dans certains secteurs constitue une des limites de l'algorithme. De plus, de par la résolution exigée de 10m, les microtopographies ont tendance à être lissées. Ainsi, la précision de l'imagerie de la frange de faible profondeur est limitée. En effet, les micro-dunes dont la localisation et l'ampleur évolue dans le temps ne sont pas retranscrites dans la surface interpolée. Toutes ces limites sont à prendre en considération mais reste cohérentes avec la réalité physique du lac. Le MNT créé par l'interpolation SPLINE est ainsi validé et utilisé pour la suite de l'étude.

Des perspectives d'amélioration de sa qualité existent pour des études futures et sont énoncées dans la partie perspective. D'un point de vue purement opérationnel, l'échantillonnage de la frange de faible profondeur par un lidar bathymétrique capable de mesurer le fond du lac serait très intéressante

Le MNT de la surface du lac de Carcans-Hourtin est disponible pour la réalisation du bilan hydrique qui permettra de simuler la chronique du niveau du lac. L'organisation bathymétrique du lac retranscrite dans le MNT est en effet utile pour calculer la surface et de volume du lac selon les fluctuations du niveau d'eau.

Partie III : Bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin

1. Introduction et Définitions

Un bilan hydrique permet de rendre compte de l'équilibre entre les entrées (précipitations, ruissellement, drainage...), les sorties (évaporation, débordement...) de flux et le stock d'un système, ici le système étudié est le lac d'Hourtin. Ce concept permet ainsi de suivre l'évolution de la réserve en eau ainsi que ce qui rentre et sort du système au cours du temps, que ce soit à échelle saisonnière, annuelle etc. L'un des objectifs de ce travail est justement de réaliser le bilan hydrique du lac d'Hourtin; pour cela il faut déterminer les flux en entrée et sortie du lac dans le temps.

Dans un système théorique classique, les entrées et sorties d'eau sont les flux superficiels et souterrains d'eau, les précipitations et l'évaporation (ou évapotranspiration). Il s'agit donc dans un premier temps de déterminer précisément quelles sont les variables d'entrées et de sorties pour le lac d'Hourtin. D'après la thèse de Buquet (2017) et notre compréhension des variables jouant sur la ressource en eau du lac, le bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin est illustré par la Figure 24 :

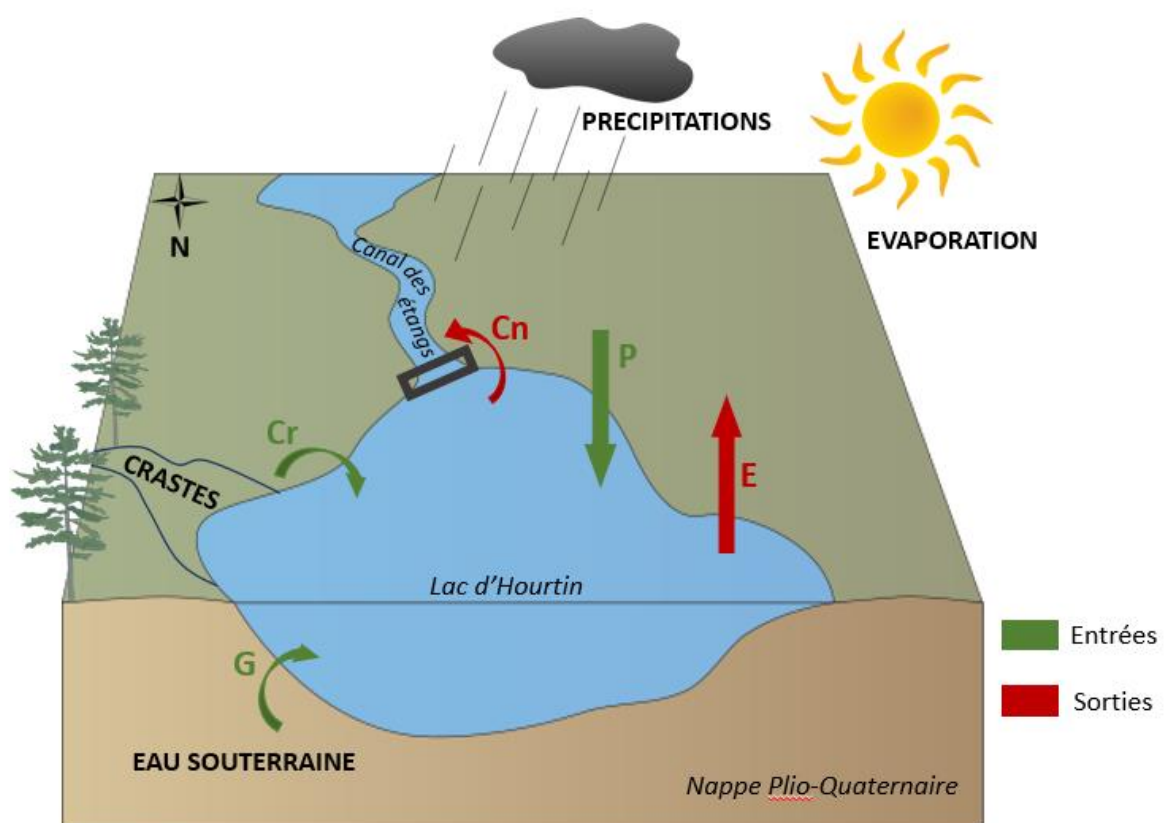


FIGURE 24: ENSEMBLE DES FLUX EN INTERACTION AVEC LE LAC DE CARCANS-HOURTIN

Comme décrit sur la Figure 24 ci-dessus, les entrées d'eau dans le lac se font à travers :

- Précipitations
- Les cours d'eau qui proviennent de l'Est et se jettent dans le lac
- La nappe sableuse du Plio-Quaternaire qui est drainée par le lac

Les ruissellements sont estimés comme étant négligeables étant donné que la surface du sol est une surface sableuse permettant l'infiltration rapide de l'eau incidente : il n'y a donc pas ou peu de ruissellements autour du lac de Carcans-Hourtin. La transpiration végétale est également négligée devant l'évaporation de la surface du lac.

Les sorties d'eau quant à elles sont décrites par :

-les flux sortants par l'écluse Montaut du Canal des Etangs

-l'évaporation sur la surface du lac

La transpiration est négligeable face à l'évaporation au vu de la surface considérable du lac.

Il en vient ainsi l'équation du bilan hydrique global du lac :

$$\Delta S = P_{pt} + Q_{riv} + Q_{nappe} - Q_{ovf} - E \quad (4)$$

Avec ΔS la variation de stock, P_{pt} les précipitations, Q_{riv} le débit d'entrée par les cours d'eau, Q_{nappe} le débit d'entrée par la nappe sableuse plio-quadernaire, Q_{ovf} le débit sortant de débordement dépendant de l'écluse du canal de l'Etang et E l'évaporation à la surface du lac.

Ce bilan hydrique se décrit en volume ou en flux, tant que l'unité reste la même pour chacune des variables. Les entrées d'eau sont connues grâce à des bases de données et/ou des méthodes de calculs connaissant certaines variables. Cependant les sorties d'eau ne sont pas connues et sont très difficilement quantifiables, notamment l'évaporation. L'évaporation dépend de nombreux paramètres météorologiques notamment d'où la complexité de son estimation représentative à travers des méthodes mathématiques, et peu de travaux sur le sujet existent en France alors que c'est une variable importante du bilan hydrique d'un lac. Des méthodes de mesures directes existent, mais n'ont pas encore été réalisées au niveau du lac, sinon autour et en prenant en compte la transpiration de la végétation (évapotranspiration). C'est pour cela que deux méthodes d'estimation de l'évaporation seront utilisées ici, une méthode empirique (Méthode d'Hamon) et une méthode numérique (General Lake Model).

2. Problématique et Objectifs

La réalisation d'un bilan hydrique global d'un lac est complexe. En effet, de nombreux flux doivent être pris en compte, et sont souvent difficiles à estimer, telle que l'évaporation et les sorties par le canal comme décrit précédemment pour le cas du lac de Carcans-Hourtin. Cependant, comprendre l'influence de chacun.e.s des paramètres et des variables est d'un intérêt majeur pour la gestion de la ressource en eau au niveau régional voire national, dans un contexte de réchauffement climatique. Comprendre le fonctionnement passé d'un lac à travers son bilan hydrique, et ce de la manière la plus représentative possible de la réalité, permet ainsi de faire des simulations futures de l'évolution de ce bilan hydrique et donc directement du niveau du lac de manière à anticiper d'éventuels changements importants futurs. En effet, l'évolution du niveau du lac aura des impacts importants sur la ressource en eau, et plus précisément sur la flore aquatique, mettant en avant de possibles vulnérabilités des espèces végétales telles que les macrophytes et bouleversant l'écologie aquatique lacustre dans son ensemble. L'intérêt de ce travail s'applique ainsi non seulement à l'hydrologie mais aussi à l'écologie voire au domaine sociétal. Plusieurs objectifs se succèdent donc dans ce deuxième chapitre pour répondre à cette problématique.

Le premier objectif de ce chapitre sur le bilan hydrique est de **quantifier l'évaporation et les sorties par le canal**. Deux méthodes sont utilisées pour quantifier l'évaporation : une méthode empirique avec l'équation d'Hamon ; et une méthode numérique avec le General Lake Model (GLM), qui permet également de déterminer les flux de sorties par le canal). Un estimateur de l'évaporation sera ensuite construit en reliant les résultats de l'équation d'Hamon et du General Lake Model pour se rapprocher le plus possible de la réalité historique et ainsi développer un modèle corrigé de l'évaporation.

Un second objectif est **de réaliser un bilan hydrique global du lac** et pour comprendre les variables significatives influençant les variations du niveau du lac au cours du temps. L'idée est ici de comparer les niveaux historiques observés du lac (de 1990 à 2005) avec ceux simulés par le GLM. Cette étape permet de faire **un calage d'historique** des niveaux du lac, de manière à s'approcher le plus possible de la réalité à travers la modélisation.

Le dernier objectif est de **faire des projections futures du niveau du lac**, à partir du modèle de bilan hydrique simulé et calé historiquement, et ce en utilisant les projections climatiques réalisées par la DRIAS pour le pire scénario RCP8.5.

3. Quantification de l'évaporation

L'évaporation est la variable la plus complexe à estimer. En effet, peu d'instruments permettent de la mesurer, et si effectivement il en existe, ceux-ci sont ponctuels et peuvent se dérégler dans le temps. De plus, sur la terre ferme, c'est la combinaison évaporation et transpiration qui est mesurée, d'où le terme d'évapotranspiration du fait que la végétation est un facteur important de rejet d'eau gazeuse dans l'atmosphère. Dans le cas du lac d'Hourtin, c'est le contraire : la surface d'eau représentant plusieurs millions de m² est sujette à de grandes quantités d'eau évaporées, tandis que le rôle des plantes y est beaucoup moins important. Ici la transpiration des plantes est donc négligée, assumant que l'évaporation de l'eau dues aux paramètres thermiques à l'interface eau-air représente un volume très important d'eau rejetée dans l'atmosphère sous forme gazeuse.

Une méthode empirique, la méthode de Hamon, et une méthode numérique avec le modèle général de lac (General Lake Model) ont été choisis pour estimer l'évaporation. Le General Lake Model (GLM) permet également d'estimer les sorties d'eau par le canal dans le cas du lac de Carcans-Hourtin, sachant que l'évaporation et les sorties par le canal sont les deux seules sorties du bilan hydrique du lac. D'autres sorties peuvent exister, comme celles par les rivières ou par la nappe, mais elles sont ici négligées (Figure 24).

3.1. Méthodes

3.1.1. Méthode de Hamon non-modifiée

Dans ses recherches, Hamon (1961) décrit un ensemble d'équations permettant d'estimer l'évaporation de l'eau à surface libre avec comme variables nécessaires à fournir : la date en système de jour julien, la latitude (positive pour l'hémisphère nord) et la température moyenne journalière de l'air. La température moyenne de l'air utilisée ici est celle de la base de données de Mérignac étant donné que celle-ci est précise et valide au pas de temps journalier, contrairement à la BD DRIAS qui est décrite pour la méthode du GLM. Les deux autres variables, cad la date en jour julien et la latitude,

permettent de connaître le nombre maximum d'heures de jour à partir d'équations données par Shuttleworth (1993), nécessaire pour utiliser une partie des équations de Hamon non-modifiées. Les étapes de calcul pour estimer l'évaporation sont les suivantes (Hamon, 1961) résumées dans l'Annexe 2 du papier de Harwell (2012) :

(1) Calcul de la déclinaison solaire δ :

$$\delta = 0,4093 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,405\right) \quad (5)$$

Où δ est en radians et J correspond au jour julien.

(2) Calcul de l'angle horaire du soleil couchant ω (en radians) :

$$\omega = \arccos(-\tan \Phi * \tan \delta) \quad (6)$$

Avec Φ la latitude du lac en degrés décimaux et δ la déclinaison solaire en radians.

(3) Calcul du nombre maximum possible d'heures de jour :

$$D = \frac{24}{\pi} \omega \quad (7)$$

(4) Calcul de la pression de vapeur saturante e_s (en kPa) :

$$e_s = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{273,3 + T}\right) \quad (8)$$

Avec T la température moyenne journalière de l'air en °C.

(5) Calcul de la densité de vapeur saturante SVD (en g/m³) à partir de la loi des gaz parfaits :

$$SVD = 2166,4 * \left(\frac{e_s}{T}\right) \quad (9)$$

Avec T la température moyenne journalière de l'air en Kelvin ; la conversion doit être faite en prenant : 1 K = 273,15 °C.

(6) Calcul de l'évaporation du lac E (en pouce/jour):

$$E = 0,55 * \left(\frac{D}{12}\right)^2 * \left(\frac{SVD}{100}\right) \quad (10)$$

Sachant que 1 pouce = 25,4mm.

La méthode d'Hamon non modifiée permet d'estimer uniquement l'évaporation, les flux en sortie par le canal de l'Etang ne sont donc pas calculés ici. Cette estimation de l'évaporation par la méthode de Hamon a été appliquée sur un pas journalier de 1990 à fin 2005.

3.1.2. Le General Lake Model (GLM)

3.1.2.1. *Description du modèle*

Hipsey et al. (2019) ont développé un code 1D en accès libre pour simuler l'hydrodynamisme de réservoirs tels que les lacs. Ce code permet d'obtenir un modèle thermique vertical 1D du lac, prenant en compte des profils de température et les mélanges d'eau suivant les stratifications thermiques en profondeur. Il permet également de simuler un bilan hydrique global du lac en 2D en

prenant en compte tous les paramètres et variables influant sur les entrées et sorties d'eau dans le lac pour se rapprocher au mieux de la réalité du système lacustre, notamment de la dynamique du niveau du lac. (Figure 25)

Le modèle 1D simule sur plusieurs couches d'une série verticale le bilan hydrique et les variations de ce bilan hydrique au cours du temps, en prenant en compte les entrées et sorties horaires ou journalières fournies par l'utilisateur. Lorsque précisé, il prend également en compte les variations thermiques en profondeur étant donné que les température et contrastes associés ont un impact sur l'évaporation de l'eau en surface notamment. Les conditions climatiques en fonction de la localisation et les conditions météorologiques locales sont également prises en compte lorsque renseignées.

Ainsi le modèle intègre la morphologie, les conditions climatiques et l'hydrologie de la zone d'étude et compile les simulations faites sur un ensemble de couches sur une verticale pour simuler un bilan hydrique final et global du lac (ou autre type de réservoir). L'application de ce modèle est claire : il permet une meilleure compréhension de l'hydrodynamisme des lacs et de l'influence des contrastes de température en profondeur et suivant la saison en simulant un niveau du lac journalier ou horaire dans le temps. Des projections futures de ce niveau du lac peuvent ainsi être réalisées grâce à cet outil.

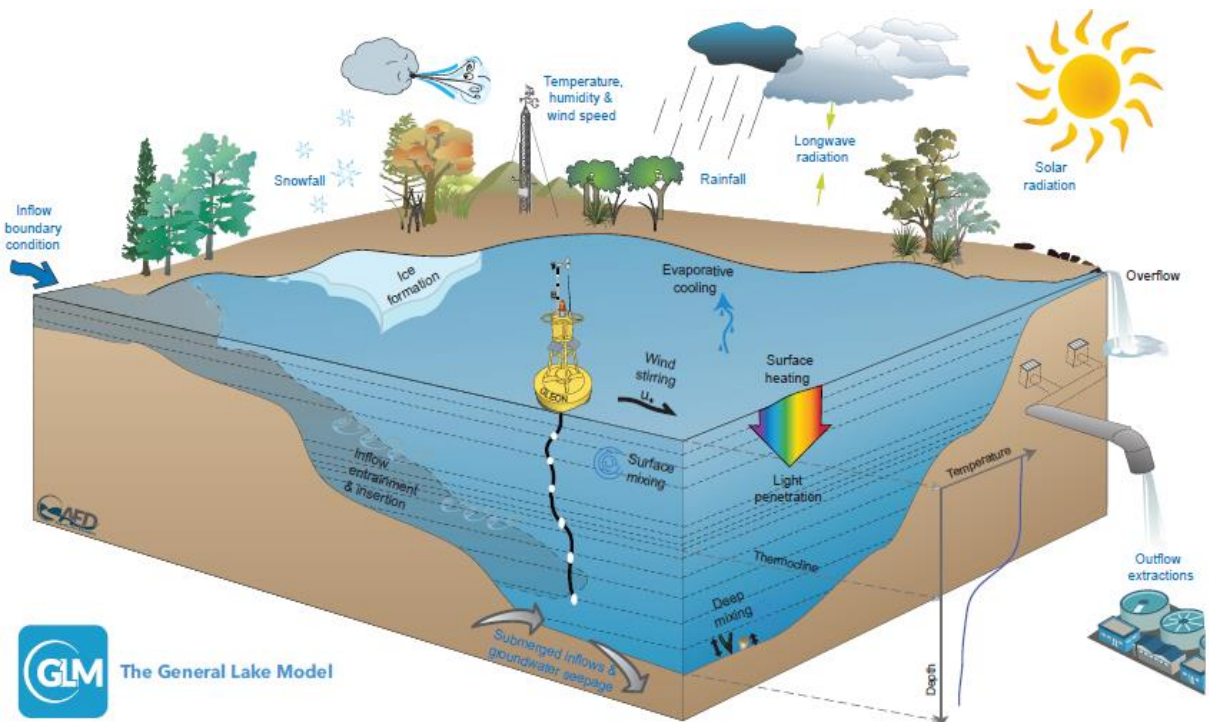


FIGURE 25: SCHEMA GLOBAL DU GENERAL LAKE MODEL (HIPSEY ET AL., 2019)

Le code a également une visée et application environnementale étant donné qu'il peut réaliser un couplage biogéochimique et écologique pour faire des simulations de qualité de l'eau et de la santé des écosystèmes associés. Cette option n'est pas utilisée ici, seule l'estimation de l'évaporation et des flux de débordements et plus globalement le bilan hydrique sont étudiées à travers le GLM dans l'optique de ce projet.

3.1.2.2. Paramétrage du modèle

L'ensemble de ce qui est décrit dans cette sous-partie en ce qui concerne les paramètres et leur définition s'appuie sur le travail de Hipsey et al. (2019), c'est-à-dire de la construction même du GLM, et des explications sont données sur la page officielle du GLM (<https://aed.see.uwa.edu.au/>).

▪ Configuration générale du modèle

L'ensemble du paramétrage et de la configuration du modèle se fait dans un fichier .nml. Plusieurs paramètres et données spécifiques nécessitent d'être indiqués pour construire le modèle en fonction de ce qui est recherché.

Premièrement, une configuration générale ainsi du modèle est faite, tout comme des coefficients de mélange (Tableau 3) Les paramètres de configuration sont, pour la plupart, pris du travail de Pruitt, (2021b). Les coefficients de mélange choisis sont ceux par défaut, c'est-à-dire ceux indiqués par le GLM (Hipsey et al, 2019).

Paramètres de configuration	Valeurs
Nombre maximum de couches	200
Volume minimum d'une couche	0,025 m3
Epaisseur minimum par couche	0,15 m
Epaisseur maximum par couche	0,5 m
Modèle de densité	1
Coefficients de mélange	Valeurs par défaut du GLM
Mélange de surface	1
Renversement convectif	0,0125
Agitation du vent	0,23
Effets de turbulence	0,51
Cisaillement	0,2
Effet Kelvin-Helmholtz	0,3
Turbulence hypolimnétique	0,5
Mélange profond	2 (=Modèle de Weinstock)

TABEAU 3: PARAMETRES DU MODELE

▪ Morphométrie du lac

Ensuite, des détails sur le lac de Carcans-Hourtin sont renseignés, notamment sur la morphométrie (Tableau 4).

Morphométrie	Valeurs
Nom du lac	Carcans-Hourtin
Latitude	45,1
Longitude	-1,1
Altitude du fond du lac	5,35 mNGF
Altitude du niveau de crête	14,25 mNGF
Largeur du lac au niveau de crête	5078.69 m
Longueur du lac au niveau de crête	15236.06 m
Nombre de points utilisés pour la courbe caractéristique	30

TABEAU 4: DONNEES SUR LA MORPHOMETRIE DU LAC

Pour pouvoir faire une simulation une verticale, donc sur la profondeur, le code a besoin de connaître la courbe caractéristique du lac. Pour cela, un code python a été utilisé (Foulon et al., 2022) de manière à connaître la relation entre le niveau du lac, sa surface et son volume. Le code python applique un polynôme 3D reliant ces variables. La courbe caractéristique associée est visible en Figure 26 et les équations reliant hauteur-surface et hauteur-volume sont les suivantes :

$$S = 17727 * h^3 + 175775 * h^2 - 2142941 * h + 2916720 \quad (11)$$

$$V = 202643 * h^3 - 2623211 * h^2 + 9020811 * h - 3907779 \quad (12)$$

Avec h =hauteur du lac (m NGF), S la surface du lac (m^2) et V le volume (m^3).

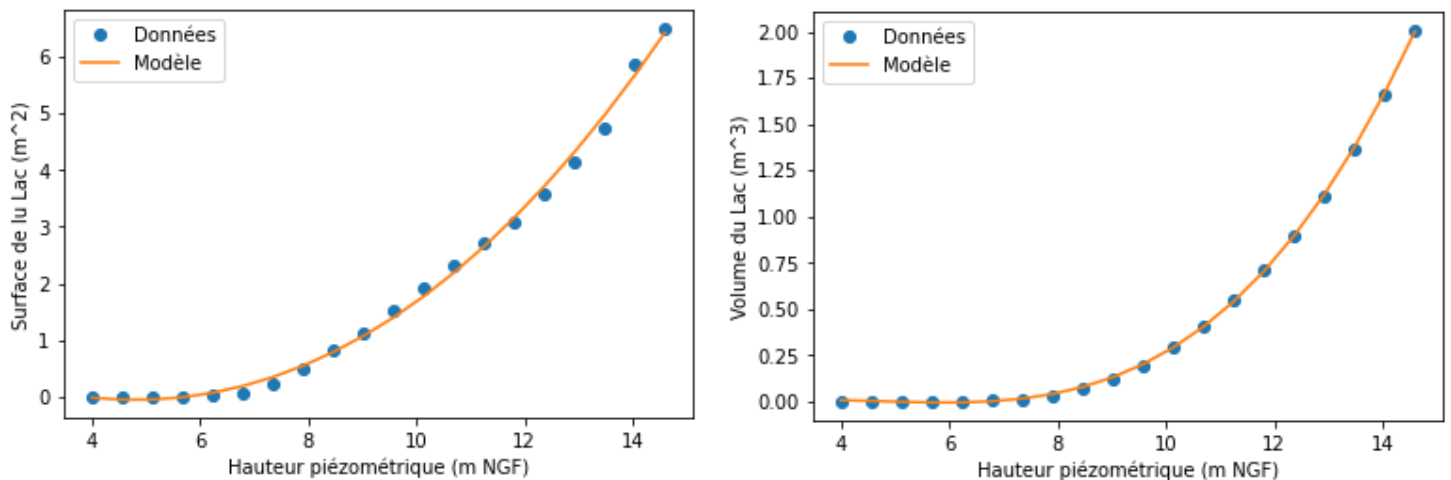


FIGURE 26: COURBE CARACTERISTIQUE DU LAC DE CARCANS-HOURTIN EN SURFACE (GAUCHE) ET EN VOLUME (DROITE)

Ainsi, ces deux calculs ont été faits pour 30 valeurs de hauteur, permettant de rentrer les valeurs de surface associées dans le GLM. De plus, la surface du lac au niveau de crête est désormais connue, en assumant que la largeur du lac représente 1/3 de sa longueur, les valeurs de largeur et longueur au niveau de crête sont obtenues (Tableau 4). Le niveau de crête correspond dans notre cas à la côte de surverse, c'est-à-dire la côte au-delà de laquelle l'eau passe au-dessus de l'écluse. Au-delà de cette côte, le modèle assumera une sortie d'eau, vers le canal dans notre cas.

▪ Durée

La prochaine étape est d'indiquer la durée de simulation, avec la date de début et de fin voulue. Comme précisée précédemment, la simulation se fait du 01/01/1990 au 31/12/2005, donc 5843 jours et un pas de temps horaire (3600s) simulé automatiquement par le GLM.

▪ Format des fichiers de sortie

Les formats et noms des fichiers de sortie s'organisent de la manière suivante :

- Un fichier résumé journalier relatif aux termes du bilan hydrique et de l'énergie à l'échelle du lac en format .csv.
- Un fichier résumé des débits de débordements journaliers à l'échelle du lac en format .csv, spécifiant les variables suivantes : date, débit, salinité.

- Un fichier compilant les simulations du GLM sur chaque couche et pour chaque temps de chacune des variables en format *netcdf*. Ce fichier peut être ouvert avec *MatLab*, *R* ou *Python*.

Il est important de préciser dans cette partie le chemin d'accès où doivent être enregistrés ces fichiers de sortie sur l'ordinateur de travail.

▪ Conditions initiales

Pour initialiser le modèle, un ou plusieurs profils initiaux de température du lac doivent être renseignés. Les données de température ont été obtenues des mesures faites par l'INRAE, qui possède des mesures de la partie épilimnion et hypolimnion du lac depuis 1959 jusqu'à 2016. L'épilimnion et l'hypolimnion correspondent à une stratification du lac en fonction de la température. En effet, à la surface, l'eau est chauffée par les rayons du soleil, et souvent bien mélangée par le vent en surface : c'est l'épilimnion. Dans la partie la plus profonde du lac, l'eau est relativement plus froide donc plus dense et ne se mélange pas ou peu avec les couches plus superficielles : c'est l'hypolimnion. La couche située entre ces deux dernières se nomme le métalimnion, et se caractérise par un important gradient de température connu sous le nom de thermocline (Figure 27). Ces stratifications thermiques sont relativement bien corrélées aux saisons dans les régions tempérées telles que la France : de la fin du printemps à la fin de l'automne, la stratification est nette ; tandis que l'hiver et le début du printemps, la température de l'eau du lac est davantage uniforme car la température de l'air est froide (Stewart, 2014).

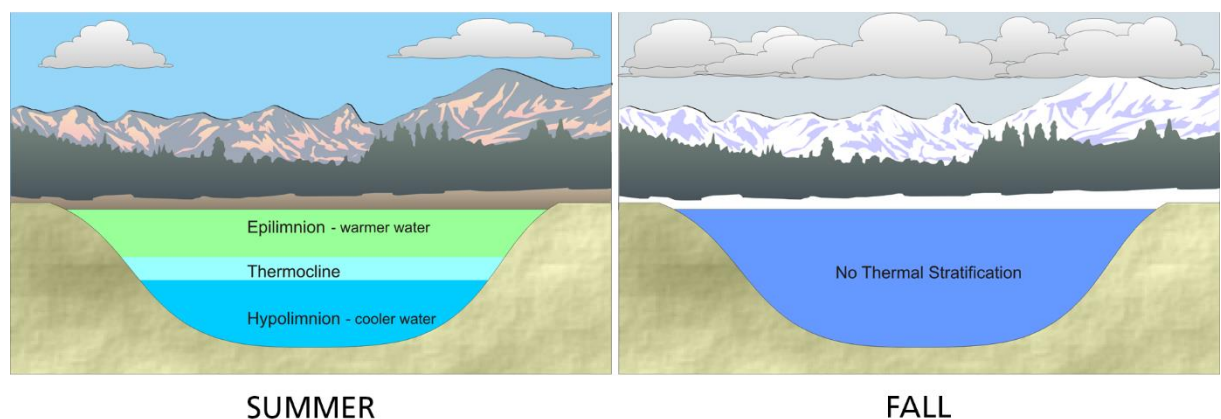


FIGURE 27: ILLUSTRATION DE LA STRATIFICATION THERMALE DES LACS EN FONCTION DE LA SAISON (VERNIER SCIENCE EDUCATION)

Pour ce travail, un seul profil a été renseigné dans le GLM, celui de 01/01/1990. A cette date-là, la température mesurée de l'épilimnion était de 9,13°C, et celle de l'hypolimnion était de 7,33°C. Les profondeurs associées aux mesures n'étant pas connues, une approximation de celle-ci a été faite : 0,5m de profondeur pour l'épilimnion et 7m de profondeur pour l'hypolimnion. Pour les salinités, la salinité du fond du lac a été estimée légèrement plus élevée que celle en surface : le fond du lac étant davantage alimenté par la nappe, il est assumé que celui-ci présente la même salinité que la nappe. La nappe étant généralement plus salée qu'une eau de surface continentale, une valeur de 0,3 mg/l de salinité a été assignée pour la nappe et le fond du lac. Pour l'épilimnion, une valeur de 0 mg/l pour la salinité a été assignée étant donné que la surface est alimentée par les eaux de rivières et des précipitations. Cette différence étant très minime, cela n'affectera pas les résultats.

▪ Light model – Modèle de luminosité

La pénétration de la lumière (des ondes courtes) est un élément important à prendre en compte pour estimer correctement l'évaporation. Le coefficient d'extinction de la lumière est un paramètre qui permet de rendre compte de la clarté de l'eau. Pour permettre au GLM de prendre en compte ce paramètre, il faut l'intégrer dans le GLM après l'avoir calculé.

L'INRAE fournit un suivi de la transparence de l'eau mesuré avec le disque de Secchi uniquement de 2006 à fin 2016. Le calcul du coefficient d'extinction de la lumière k_w à partir de la mesure de la transparence de l'eau Z_{secchi} (m) se fait avec la relation empirique de Poole et Atkins (1929) :

$$k_w = \frac{K}{Z_{secchi}} \quad (13)$$

Avec K une constante égale à 1,7.

Etant donné que ces dates ne correspondent pas à celles rentrées dans le GLM, il a été décidé de ne prendre que la moyenne de l'ensemble de ces valeurs k_w qui est donc rentrée comme une constante dans le GLM (light_mode=0). L'ensemble des équations décrivant les calculs faits par le GLM sont déclinées dans le travail de Hipsey et al. (2019).

▪ Bird Clear Sky Model – Modèle de Bird

Le rayonnement solaire est à la base de la thermodynamique du lac. Le GLM donne la possibilité d'intégrer rayonnement de surface à partir du Bird Clear Sky model (Bird, 1984), qui est un modèle permettant de prédire le rayonnement solaire direct (par ciel dégagé), diffus et total sur une surface horizontale telle la surface du lac. Ce modèle se base sur des comparaisons de transferts radiatifs et plusieurs paramètres sont à fournir. Ces paramètres sont ici calculés automatiquement par le GLM (voir équations dans l'Annexe A de l'article de Hipsey et al. (2019)) à condition de rentrer quelques variables fixées sur la durée d'étude : la pression atmosphérique AP (hPa), la concentration d'ozone Oz (atm.cm), la vapeur d'eau précipitable totale WatVap (atm.cm), la profondeur optique des aérosols à la longueur d'onde de 500 nm et 380nm (sans dimension) et l'albédo. Des valeurs par défaut sont indiquées dans le travail de Hipsey et al (2019) pour ces variables :

$$AP = 1013$$

$$Oz = 0.279$$

$$WatVap = 1.1$$

$$AOD500 = 0.033$$

$$AOD380 = 0.038$$

$$Albedo = 0.2$$

▪ Caractéristiques des sédiments

La température du substrat et les propriétés du sédiment associées jouent un rôle important dans le bilan thermique de la colonne d'eau : si le sol se réchauffe ou se refroidit, la température de l'eau en contact avec celui-ci se verra directement affectée. La simulation de chaque couche d'eau par le GLM doit donc prendre en compte le gradient thermique ainsi que la surface d'eau en contact avec le sol (Hipsey et al., 2019):

$$c_w \rho_i \Delta V_i \frac{dT_i}{dt} = K_{soil} \frac{(T_{zi} - T_i)}{\delta z_{soil}} (A_i - A_{(i-1)}) \quad (14)$$

Avec :

- K_{soil} , la conductivité thermique du sol = 2 (entre 0,25 pour sols organiques et 2,9 pour particules inorganiques d'après Hipsey et al. (2019) et intégré en tant que tel dans le modèle)
- δZ_{soil} , la profondeur de la couche de sédiment au-dessous du fond du lac = 1m
- T , la température du sédiment (°C)
- A , la surface (m²)

La relation choisie par le modèle pour prendre en compte les variations de température du sol (saisonnnières et suivant la profondeur) est la suivante :

$$T_z = T_{zmean} + \delta T_z \cos \left[\frac{2\pi}{365} (d - d_{Tz}) \right] \quad (15)$$

Avec:

- T_z la température du sol
- T_{zmean} la température moyenne annuelle du sol
- δT_z l'amplitude saisonnière des variations de température du sédiment
- d_{Tz} le jour de l'année où la température du sédiment est maximale

Ainsi, les valeurs du Figure 35 ont été rentrées dans le fichier .nml pour approximer le mieux possible la chaleur induite par les sédiments (Tableau 5) :

K_{soil}	2	δT_z	0
δZ_{soil}	1	d_{Tz}	190
T_{zmean}	14		

TABLEAU 5: PARAMETRES UTILISES POUR LE PARAMETRAGE DU TRANSFERT DE CHALEUR PAR LE SUBSTRAT

▪ Neige et glace

Il est possible de renseigner une couverture de neige ou de glace en fonction des conditions environnementales du lieu d'étude. Dans le cas du lac de Carcans-Hourtin, la couverture neigeuse est inexistante (sauf exception suite à des conditions climatiques extrêmes pour la région), tout comme la glace. Le GLM calcule cependant la couverture neigeuse et de glace en fonction de la température et de l'énergie incidente sur le lac.

3.1.2.3. Conditions limites du modèle – Données d'entrées

▪ METEOROLOGIE

Le modèle GLM nécessite des données météorologiques journalières ou horaires afin de prendre en compte le forçage météo et ainsi permettre de faire des simulations les plus représentatives possibles des phénomènes influant sur les variables du bilan hydrique. Les variables météorologiques demandées par le GLM sont les suivantes :

- Rayonnement à ondes courtes (domaine visible) (W/m²)
- Rayonnement à ondes longues (domaine infra-rouge) (W/m²) OU la couverture nuageuse
- Température moyenne de l'air (°C)
- Humidité relative (%)
- Vitesse du vent (m/s)

- Précipitations (m/j)

Dans l'optique de ce PFE, la base de données du DRIAS-2020 a été utilisée (disponible et corrigée sur la période de 1951 à 2005, choisie uniquement sur la période 1990-2005) (DRIAS), basée sur le maillage SAFRAN et dont le modèle associé est le CNRM-CM5_ALADIN63. Le modèle CNRM-ALADIN « est un modèle bi-spectral à aire limitée » dont l'acronyme signifie « Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational » (CNRM). Il est utilisé depuis le début des années 2000 comme « **Modèle Régional de Climat** » par le CNRM. C'est donc un modèle régional qui simule le climat sur une zone déterminée, à résolution journalière, et en ayant une représentation du changement climatique à plus fine échelle que les modèles de climat globaux. Pour faire ces simulations, le modèle se cale sur des données météo historiques corrigées. Ces modèles régionaux sont forcés par d'autres modèles de circulation tel que le CMIP5, sur lesquels s'est basé le GIEC pour son rapport 2013. La correction de biais s'est faite selon la méthode d'ADAMONT France, sur la grille SAFRAN (2016), ce qui a permis de passer de 12km de résolution à 8km. (DRIAS, 2020)

A noter que dans ces variables météorologiques sont comprises les précipitations, celles-ci sont également considérées comme des flux d'entrée dans le modèle qui seront prises en compte par le GLM en tant que telles. Ces variables et valeurs associées, converties aux unités de référence du GLM si nécessaire, sont compilées dans un fichier .csv, dans l'ordre listé ci-dessus. Ce fichier et le chemin associé sont indiqués dans le fichier .nml lu par le GLM pour qu'il soit bien pris en compte lors de la simulation.

Des paramètres et facteurs liés à la météo sont également à renseigner dans le GLM (Tableau 6) :

Options	Valeurs
Rayonnement de longue ondes	LW_IN
Radiations en entrée	1
Albédo	1
Couvert nuageux	1
Vent	1
Rainfall nutrient composition	faux
snowfall	faux
ruissellement sur les berges exposées de la zone du lac	faux
Variables	Facteur d'ajustement
Ondes courtes	1
Ondes longues	1
Température de l'air	1
Précipitation	1
Humidité relative	1
Vitesse de l'air	1
Paramètres	Valeurs
Coefficient de transfert aérodynamique pour le flux de chaleur latente	0,013
Coefficient de transfert aérodynamique pour le flux de chaleur sensible	0,013
Coefficient de transfert aérodynamique de la quantité de mouvement	0,013

TABLEAU 6: PARAMETRES DE METEO RENTRES DANS LE GLM

▪ **FLUX EN ENTREES**

En dehors des précipitations qui sont déjà intégrées dans les données météo, les flux d'entrée par les cours d'eau et par la nappe sont pris en compte par le GLM à travers de deux fichiers .csv, un pour les cours d'eau et un pour la nappe, regroupant toutes les données de flux d'entrée journaliers. Ces fichiers sont construits avec quatre colonnes : la date, les flux (m3/s), la température de l'eau (°C) et la salinité.

➤ *Flux par les cours d'eau*

Les principaux apports d'eau au lac par les rivières adjacentes proviennent des crastes suivants : la Matouse, Caillava, Couture, Garroueyre, Pipeyrous, Queytive ainsi que Le Grand Lambrusse. La Matouse est un cours d'eau situé au nord est du lac s'écoulant sur l'ensemble de l'année. Il est équipé par la DREAL avec des déversoirs afin de mesurer journalièrement sa hauteur d'eau. Le débit est obtenu à partir d'une courbe de tarage réalisée par la DIREN, en supposant le lit du cours d'eau constant dans le temps.

$$\text{Débit Matouse} = f(\text{hauteur d'eau mesurée})$$

Ainsi, une chronique journalière du débit à la Matouse est disponible de 1990 à 2005. Les autres cours d'eau ne sont pas équipés de stations de mesure similaires. Leurs débits sont estimés à partir des débits mesurés à la Matouse. Des études antérieures (DIREN ; BRGM ; Milcent, 1963 ; Gardaix, 2012) fournissent des coefficients liant les débits des différentes rivières entre elles, à partir de mesures simultanées des débits. Afin d'affiner les coefficients liant les débits de chacun des cours d'eau au débit de la Matouse, des mesures ponctuelles de débits au sein des autres cours d'eau sont effectuées dans le cadre de la thèse de D. Buquet (2017). De plus, l'homogénéité des variations de niveaux dans l'ensemble des crastes est vérifiée à partir de capteurs de pression (D. Buquet, 2019).

Les coefficients retenus liants le débit des cours d'eau à celui de la Matouse sont les suivants (Tableau 7) :

Craste	Coefficient α
Cavailla	7,84
Courtue	1,25
Garroueyre	3,84
Pipeyrous	3,49
Queytive	4,49
La Grand Lambrusse	8,95
SOMME	29,86

TABLEAU 7: COEFFICIENTS LIANT LE DEBIT DES CRASTES A CELUI DE LA MATOUSE

Bien que difficiles à estimer, des incertitudes réelles sont liées à l'usage de ces coefficients. Une hypothèse forte est le ratio supposé constant dans le temps entre l'ensemble des cours d'eau.

Les débits des cours d'eau parvenant à la Matouse sur la période de 1990 à 2005 sont ainsi calculés journalièrement à partir des coefficients présentés, en supposant la conservation dans le temps de ces ratios :

$$Q_{craste}(i) = Q_{matouse} * \alpha(i)$$

L'intérêt est d'obtenir le flux total parvenant au lac par les cours d'eau, soit :

$$Q_{craste_{tot}} = \sum_0^j Q_{matouse} * \alpha(i)$$

$$Q_{craste_{tot}} = Q_{matouse} * \sum_0^j \alpha(i) \quad (16)$$

Avec $\sum_0^j \alpha(i) = 30$

➤ Flux par la nappe

La nappe du Plio-Quaternaire est une nappe sableuse, très perméable. Du fait du peu de données disponibles, il est difficile de déterminer le flux nappe-lac. Une estimation globale peut tout de même être faite. D'après le travail de Buquet (2017), les flux de la nappe vers le lac seraient négligeables comparés à ceux des cours d'eau et des précipitations. Dans ce projet, il a été décidé de ne pas négliger ces flux et de les estimer avec la loi de Darcy à partir des données piézométriques disponibles.

L'ADES met à disposition en accès libre les chroniques piézométriques des puits sur l'ensemble du territoire français. Autour du lac d'Hourtin, seul un point d'eau enregistrant journalièrement les niveaux de la nappe plio-quaternaire a été trouvé : le piézomètre BSS001VYWT des Landes de la Minouse, proche de la commune d'Hourtin (au NE du lac). Cependant, les chroniques piézométriques de ce puits sont disponibles à partir de mi 2005 jusqu'à aujourd'hui, donc aucune information fiable du niveau de cette nappe n'est connue sur la période 1990-2005. C'est pourquoi une simulation des niveaux passés de la nappe a été faite à partir des données disponibles. Le niveau piézométrique de la nappe a ainsi été simulé via le logiciel Pastas, un logiciel en accès libre pour analyser et simuler les niveaux piézométriques, à partir des données disponibles de l'ADES.

La loi de Darcy est ensuite utilisée pour déterminer globalement les flux nappe-rivière entre 1990 et 2005 :

$$Q = \frac{K}{e} \cdot A * (h_{nappe} - h_{lac}) = C_e * A * (h_{nappe} - h_{lac}) \quad (17)$$

Avec :

- K : la conductivité hydraulique
- e : l'épaisseur de l'interface entre le fond du lac et le toit théorique de la nappe
- A : la surface d'échange entre la nappe et le fond du lac, approximée grâce à un script Python indiquant la relation hauteur/surface (Foulon et al., 2022)
- C_e : le coefficient d'échange
- h_{lac} : le niveau du lac journalier en m NGF, mesuré par le SIAEBVELG
- h_{nappe} : le niveau piézométrique en mNGF

Etant donné que le niveau piézométrique de la nappe vers Hourtin est bien plus haut que le niveau moyen du lac, le gradient hydraulique de la nappe Plio-Quaternaire est dirigé vers le lac et donc théoriquement la nappe alimente le lac.

Le coefficient d'échange, mettant en jeu la conductivité hydraulique et l'épaisseur du sédiment permettant l'échange est très difficile à connaître et le manque de mesures et modèles sur notre zone d'étude ne permettent pas de fixer un coefficient d'échange représentant le mieux possible la réalité. Des hypothèses doivent donc être faites sur l'épaisseur du sédiment ainsi que la conductivité hydraulique. Le coefficient d'échange choisi ici est de $6e-9$ (pour $e=50m$ et $K=3e-7$), permettant d'avoir des valeurs de débit de nappe autour de $1,1 m^3/s$.

➤ Flux de sortie

Comme précisé sur la Figure 24, les variables de sortie du lac sont les débits de sortie par le canal et l'évaporation. Le débit de sortie par le canal (écluse) est calculé automatiquement par le GLM grâce à l'équation suivante :

$$Q_{weir} = \frac{2}{3} C_{Dweir} \sqrt{2g} W_{weir} (h_s - h_{crest})^{3/2} \quad \text{lorsque } h_s > h_{crest} \quad (18)$$

Avec:

- C_{Dweir} le coefficient d'écoulement en relation avec la hauteur de charge en amont, qui dépend de la forme du seuil (sans unité)

- W_{weir} la largeur de l'écluse (m)

- h_s et h_{crest} le niveau du lac au jour j et le niveau de crête ($14,25$ mNGF) respectivement

Dès lors que le niveau du lac au jour j excède le niveau de crête, un débit de sortie par le seuil, ici l'écluse, est calculé. Ensuite, le GLM calcule pour chaque jour un éventuel débit de débordement via l'équation suivante :

$$Q_{ovfl} = Q_{weir} + (V_s - V_{max}) / \Delta t_d \quad (19)$$

Avec V_s et V_{max} le volume du lac au jour j et le volume maximal respectivement.

Ainsi, aucune variable de sortie n'est renseignée dans le GLM avant la simulation car celui-ci calcule directement les deux variables recherchées qui sont l'évaporation et le débit de sortie par le canal, et ce de manière la plus précise possible en fonction des données d'entrées et des paramètres précédemment décrits.

3.2. Résultats et interprétation

3.2.1. Profils de température

Le GLM étant un outil rendant compte de l'évolution des températures sur une verticale grâce à l'ensemble des forçages énergétiques, thermiques, météorologiques et de mélange, des profils de température ont pu être construits. En effet, le fichier *.netcdf* en sortie du GLM compile toutes les données calculées pour chacune des variables impliquées. De simples profils de température issus de ces données sont visibles en Figure 28. Les profils présentent peu de variations en fonction de la profondeur durant les périodes hivernales, et davantage durant les périodes estivales : le contraste entre la température de l'air et de surface avec la température en profondeur qui reste à une température relativement froide est plus important en été qu'en hiver.

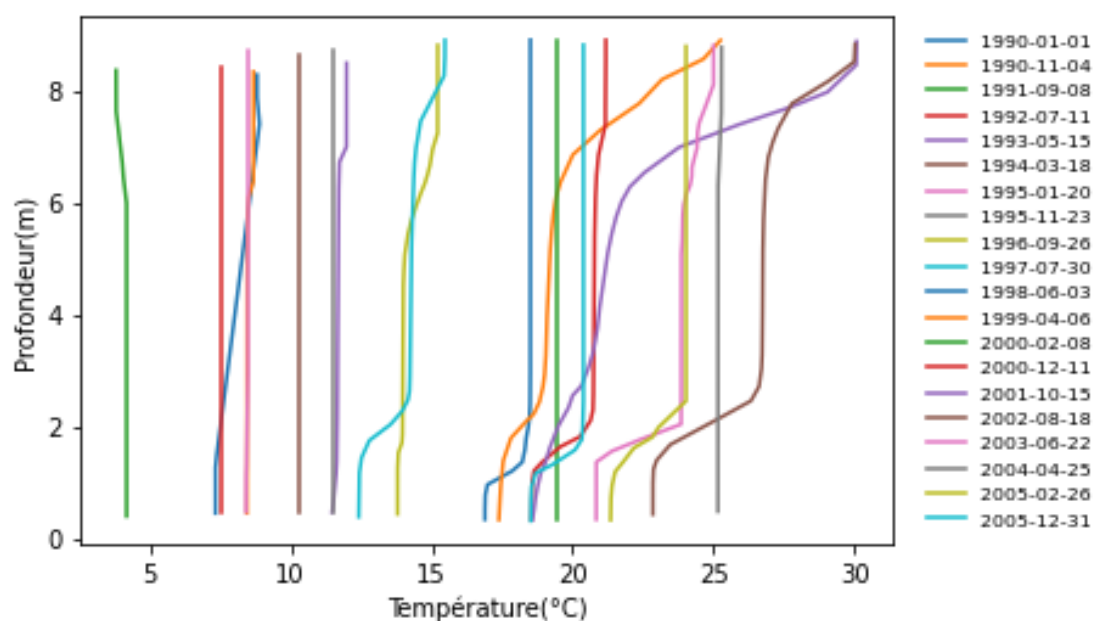


FIGURE 28 : PROFILS DE TEMPERATURE ISSUS DU GLM

L'INRAE dispose également de profils de température directement mesurés sur le terrain comme décrit en Figure 29 uniquement pour l'année 2013. Il est net qu'il y a très peu de variations de température avec la profondeur au sein du lac d'Hourtin d'après ces profils. Cependant, les contrastes saisonniers sont encore une fois mis en avant.

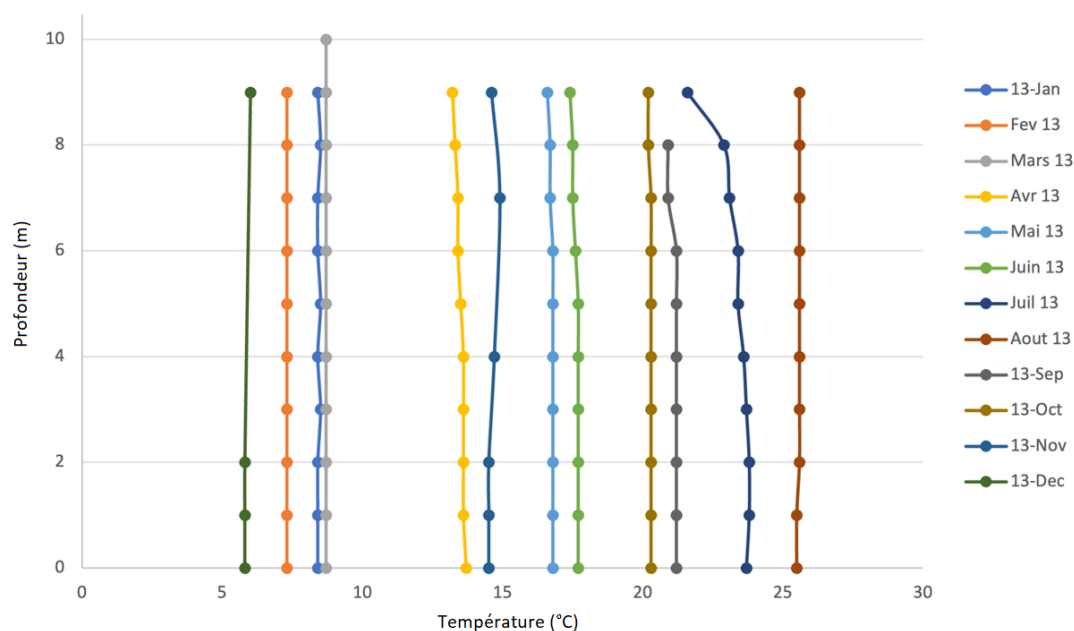


FIGURE 29: PROFILS DE TEMPERATURE DU LAC SUR L'ANNEE 2013 (INRAE)

Pour aider à une meilleure visualisation des profils de température en profondeur et au cours du temps, des graphiques $Temperature = f(date, z)$ pourraient être réalisés afin d'apporter davantage d'informations de ces variations dans le temps.

3.2.2. Résultats bruts de l'évaporation

L'ensemble des résultats de l'évaporation obtenus grâce à la méthode de Hamon et du GLM sont déclinés en Figure 30 au pas de temps mensuel. Les amplitudes de variations sont relativement élevées allant de 0 à 250mm/mois maximum pour la méthode de Hamon et le sont beaucoup moins pour les résultats du GLM.

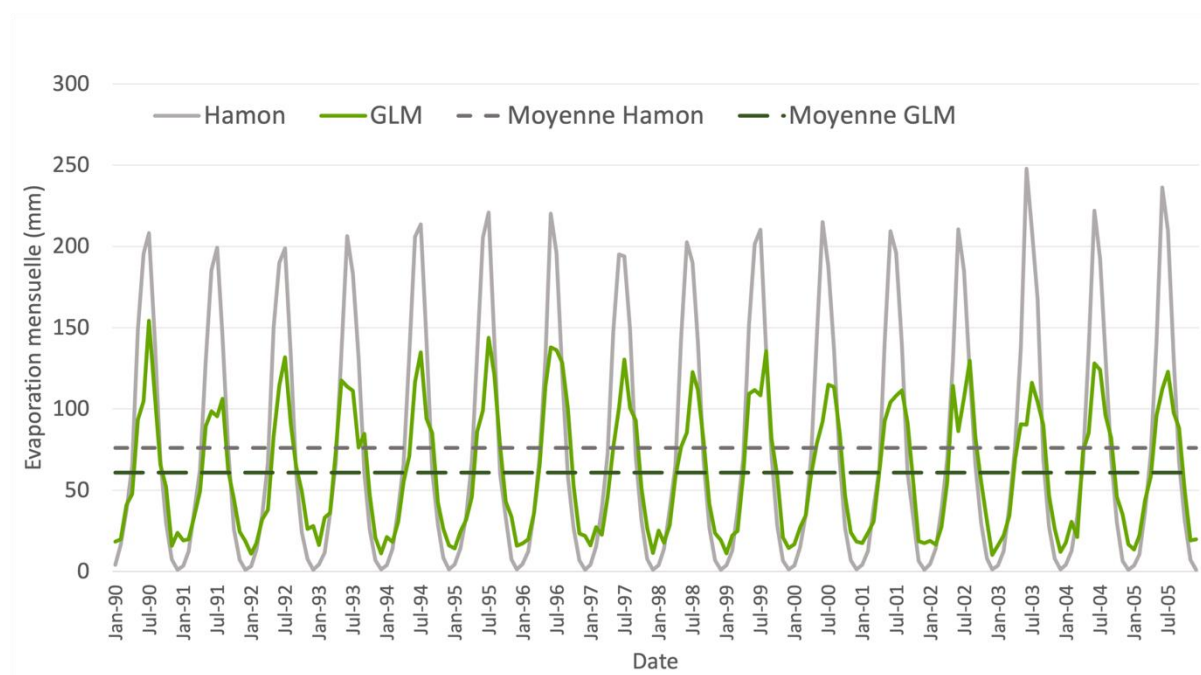


FIGURE 30: ÉVAPORATION ESTIMÉE

Des paramètres statistiques ont été calculés sur l'ensemble des données pour caractériser ces résultats (Tableau 8). La moyenne calculée paraît être relativement élevée pour la méthode de Hamon, il semble être plus pertinent de s'attacher à la médiane qui est de 1,5mm/j, qui est plus représentative que les 2,42mm/j de la moyenne. La distribution des valeurs est moins étendue avec le GLM, avec une valeur maximale et une moyenne de l'évaporation bien inférieures à celles estimées par la méthode de Hamon.

Paramètres	Hamon	GLM
Moyenne	2,42 mm/j	1,94 mm/j
Médiane	1,5 mm/j	1,62 mm/j
Minimum	0,01 mm/j	0,0 mm/j
Maximum	11,48 mm/j	8,23 mm/j

TABLEAU 8: PARAMETRES STATISTIQUES EFFECTUES SUR LES RESULTATS DE L'EVAPORATION

Une somme annuelle de l'évaporation a également été calculée pour rendre compte de l'estimation de l'évaporation sur l'année, de 1990 à 2005 (Tableau 9). Les valeurs d'évaporation sont comprises entre 840 et 972mm/an pour la méthode de Hamon et entre 641 et 827mm/an pour le GLM. Un écart est donc clairement observable entre les résultats de Hamon et ceux du GLM, avec une sous-estimation des valeurs d'évaporation par le GLM par rapport à celles d'Hamon.

Année	Hamon (mm/an)	GLM
1990	896,93	725,45
1991	854,87	641,2
1992	855,44	665,67
1993	841,92	716,69
1994	889,98	692,45
1995	894,09	718,45
1996	860,77	827,0
1997	899,46	672,5
1998	871,87	673,44
1999	898,54	732,67
2000	881,51	688,9
2001	876,70	711,72
2002	851,31	710,64
2003	972,63	688,67
2004	880,09	732,61
2005	920,83	715,08

TABLEAU 9: RESULTATS DES EVAPORATIONS ANNUELLES

D'après les estimations de l'évaporation faites par le Ministère des Pêches et de l'environnement du Canada en 1975, les lacs situés dans la partie sud du Canada présentent des évaporations entre 500 et 900mm/an avec parfois plus de 900mm/an dans certaines zones plus restreintes. Ces estimations correspondent assez bien avec ce qui est décrit par la méthode de Hamon. Pruitt (2021b) a trouvé des valeurs moyennes situées approximativement entre 65 et 76mm d'après ses graphiques, ce qui correspond assez bien aux résultats obtenus ici : 76mm de moyenne mensuelle pour la méthode de Hamon et 60mm de moyenne mensuelle pour le GLM (Figure 30).

3.2.3. Correction des valeurs de Hamon par le GLM

Afin de prendre en compte les deux méthodes pour avoir une estimation de l'évaporation la plus précise possible avec le jeu de données utilisées, une correction de l'évaporation estimée par la méthode de Hamon est faite par les valeurs estimées avec le GLM. Pour aboutir à ces valeurs corrigées, la Figure 31 est construite de manière à observer la répartition des valeurs suivant la méthode de Hamon et le GLM. Une tendance linéaire est observée avec un offset en y. Ainsi, une régression linéaire est proposée pour corrélérer ces deux variables, afin d'obtenir une évaporation corrigée. La relation linéaire est visible sur la Figure 31 et l'équation est la suivante :

$$E_{Hcorr} = 0.459 * E_H + 0.825 \quad (20)$$

L'évaporation corrigée est ainsi calculée à partir de la relation linéaire, avec les coefficients directeurs a et b de cette équation.

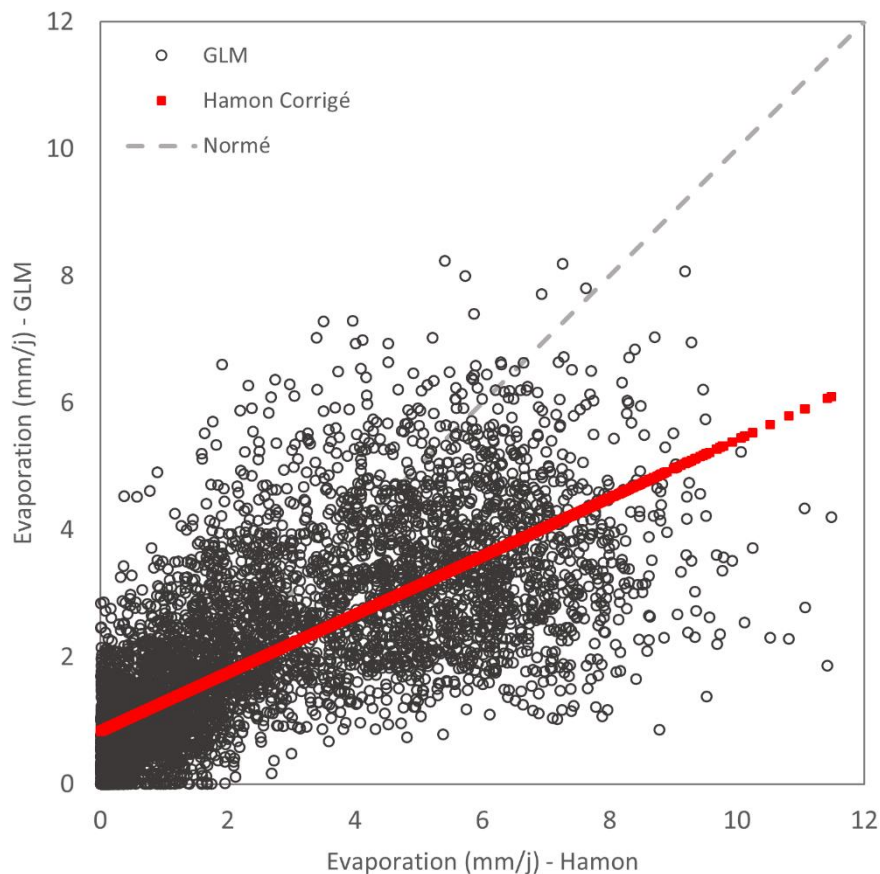


FIGURE 31: GRAPHE PRESENTANT LES VALEURS DU GLM EN FONCTION DES VALEURS DE HAMON, AVEC LA COURBE DE TENDANCE RELIANT CES DEUX VARIABLES

La Figure 32 montre la somme des évaporations pour chacune des méthodes, et il est net que la somme de l'évaporation corrigée est très proche de celle du GLM. Cela est dû aux forts coefficients directeurs de la droite.

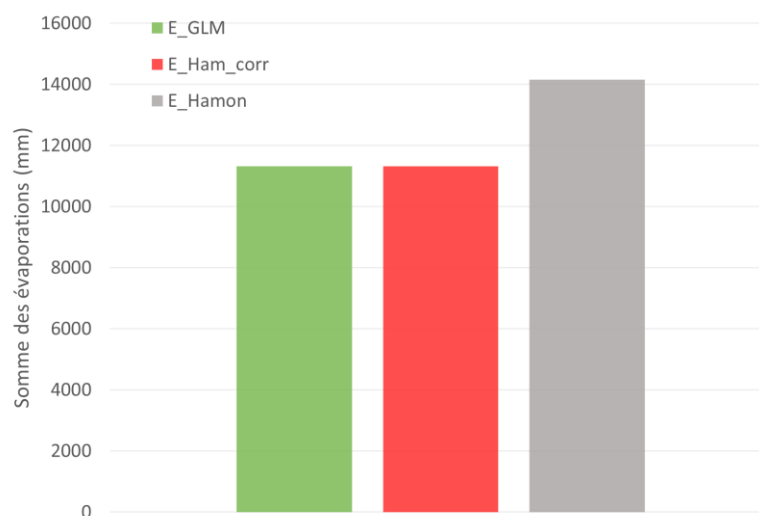


FIGURE 32: HISTOGRAMME DES SOMMES DES EVAPORATIONS SUIVANT LA METHODE

Pour vérifier de la pertinence de cette évaporation corrigée, la Figure 33 a été réalisée afin de mettre en avant les chroniques d'évaporation pour chacun des scénarios. Dans un premier temps, il est clair que la méthode de Hamon surestime l'évaporation au niveau des pics d'été et la sous-estime lors des pics hivernaux en comparaison avec la méthode suivie par le GLM. C'est également ce qu'a observé Pruitt (2021b) lors de son étude sur des lacs étatsuniens. Dans un second temps, l'évaporation corrigée de Hamon indique elle une tendance beaucoup plus lissée que celle du GLM, mais il semblerait qu'elle surestime les pics hivernaux en comparant avec la méthode de Hamon et le GLM.

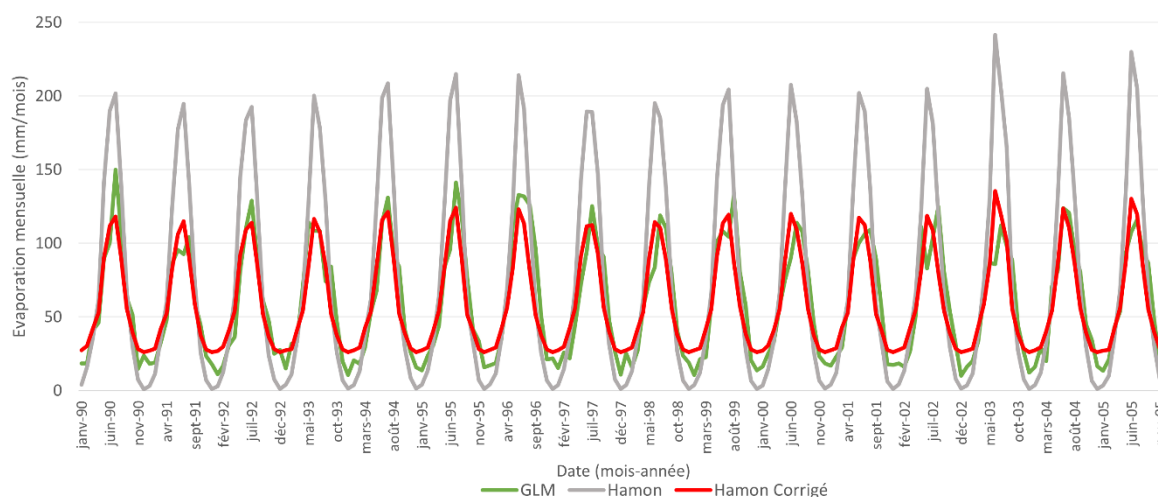


FIGURE 33: CHRONIQUES MENSUELLES DES EVAPORATIONS SUIVANT LES DIFFERENTES METHODES

Les Figure 32 et 33 posent tout de même la question de la pertinence et de la représentativité de la méthode d'Hamon par cette relation linéaire, étant donné qu'il était davantage attendu une valeur intermédiaire entre Hamon et GLM des sommes des évaporations pour la Figure 32, et que la chronique corrigée suit davantage la chronique du GLM que celle de Hamon. Il aurait pu être envisagé d'utiliser le type de correction de Pruitt (2021b) qui a simplement corrigé l'évaporation en appliquant un facteur de correction (en l'occurrence 25%) aux valeurs d'évaporation estimées par la méthode de Hamon.

Additionnellement, d'après Harwell 2012, la méthode de Hamon non-modifiée a tendance à sous-estimer l'évaporation (au pas de temps mensuel) en comparaison avec d'autres méthodes d'estimations de l'évaporation qui ne sont pas étudiées ici, telles que la méthode USWB non-modifiée. En suivant cette observation, cela signifierait que le GLM sous-estimerait davantage cette variable. Cela est certainement dû à une estimation non représentative des variables d'entrées et paramètres intégrés dans le GLM pour ce travail. C'est donc un point important à prendre en considération pour une future amélioration de l'estimation de l'évaporation avec le GLM qui soit plus représentative de la réalité et qui s'ajuste davantage aux valeurs de la méthode de Hamon. Néanmoins, pour la suite de cette étude, les valeurs corrigées obtenues dans cette section serviront de valeurs d'entrée pour réaliser le bilan hydrique. Un facteur de correction de l'évaporation visant à l'amplifier est donc à prévoir.

3.3. Conclusion et Perspectives

Le GLM est un outil nouveau et très intéressant pour comprendre la dynamique et les profils de température des lacs en général, apportant de grandes connaissances sur les variables impliquées, notamment l'évaporation qui est estimée grâce à cet outil en prenant en compte tous les paramètres et variables affectant cette dernière.

La comparaison entre les résultats simulés par le GLM et ceux calculés avec la méthode d'Hamon ont permis d'obtenir une évaporation corrigée de la méthode de Hamon qui est utilisée par la suite pour la réalisation du bilan hydrique. Cependant, l'évaporation corrigée semble être sous-estimée par rapport à la méthode de Hamon et à d'autres méthodes utilisées dans d'autres travaux. Un facteur multiplicateur de cette évaporation serait donc à prévoir pour la suite de ce travail.

Comme perspectives d'amélioration de cette estimation de l'évaporation, plusieurs pistes sont possibles :

- Le débit de la nappe pourrait être simulé via un modèle MODFLOW (tel que celui utilisé par Pruit, 2021b) ce qui permettrait une comparaison avec les débits estimés dans ce projet (uniquement grâce à la loi de Darcy et à une simulation du niveau piézométrique) pour apporter plus de persistance à cette variable et éventuellement proposer une correction
- Une autre proposition pour mieux quantifier ces débits de la nappe serait de modifier le code du GLM directement pour que celui-ci prenne en compte les échanges nappe vers lac, et pas uniquement les échanges lac vers nappe comme sur la version actuelle.
- Deux bases de données différentes de météorologie sont utilisées ici, mais il serait plus correct d'effectuer des tests statistiques et éventuellement ajouter une correction aux données de température et précipitations pour homogénéiser ces variables à la fois sur le GLM et sur l'estimation des variables d'entrée et de sortie, pour avoir une meilleure cohérence des résultats
- Des mesures de l'évaporation directes tout au long de l'année peuvent être faites, pour donner de la consistance aux données d'évaporation en ayant une nouvelle source de données directes

Cette première estimation de l'évaporation est donc nettement perfectible, de grandes améliorations peuvent y être apportées d'où l'intérêt des pistes décrites ci-dessus. Néanmoins, cette première estimation sert de support à la suite de ce travail et un facteur multiplicateur y sera appliqué, permettant de conserver les chroniques d'évaporation dans le temps en les amplifiant.

4. Bilan hydrique du lac sur la période historique

La quantification des flux entrants et sortants dans le système étant désormais estimée, le bilan hydrique du lac peut être fait. La réalisation de ce dernier se fait à partir de l'ensemble des variables précédemment étudiées et permet d'obtenir la chronique du niveau du lac simulé en fonction du temps. Pour connaître la pertinence des niveaux simulés et dans l'optique de se baser sur ces chroniques pour des projections futures, il est nécessaire de comparer ces valeurs simulées aux valeurs mesurées. Le SIAEBVELG dispose de données journalières du niveau du lac, mesurées chaque jour au même endroit (au niveau de l'écluse). Un calage d'historique est ensuite réalisé pour caler au mieux possible la chronique de niveaux du lac obtenue par le bilan hydrique et celle de niveaux mesurés par le SIAEBVELG. Ce calage d'historique consiste à ajuster les paramètres du modèle permettant d'ajuster la chronique simulée. En effet, certains paramètres sont mal connus (par exemple K_v ou e pour le débit

de nappe) et présentent des incertitudes importantes, il est donc possible de les faire varier afin de caler au mieux les données. Ainsi, une fois le calage fait, ces paramètres correctifs sont conservés et réutilisés pour le calcul du niveau du lac sur la période prospective (projections futures).

4.1. Méthode

4.1.1. Equation du bilan hydrique

Une équation de récurrence est utilisée à partir de l'ensemble des flux entrants et sortants pour calculer le niveau du lac journalier simulé et connaître son évolution simulée dans le temps. A rappeler que les flux entrants sont constitués des précipitations, des apports des rivières et des nappes. Les flux sortant correspondent aux sorties par le canal et à l'évaporation. Le bilan des flux s'effectue en volume par jour, puis les flux sont divisés par la surface afin d'être ramené à des lames de hauteurs en mètres.

$$h(j+1) = h(j) + Ppt(j) - Ecorr(j) + \frac{1}{A(j)} * [Vriv(j) + Vnappe(j) - Vovf(j)] \quad (21)$$

Avec h le niveau du lac (m), A la surface du lac au jour j (m²), Ppt les précipitations (m), $Vriv$ le volume parvenant au lac par les crastes (m³), $Vnappe$ le volume provenant de la nappe (m³), $Ecorr$ l'évaporation calculée par Hamon puis corrigée par ajustement avec le GLM (m) et $Vovf$ le volume de débordement au canal (m³).

La surface du lac au jour j se calcule à partir du niveau du lac du jour j en appliquant la formule du polynôme de 3^è degré (Equation 11) obtenu par le script python.

L'ensemble des variables et des flux de ce bilan hydrique doit à présent être décrit.

4.1.2. Données

▪ FLUX EN ENTREES

➤ *Précipitations*

Les données de précipitations utilisées dans cette équation sont celles provenant de la base de données de Météo France station MERIGNAC sur le maillage SAFRAN, et non pas celles provenant de la BD DRIAS. Ce choix a été fait étant donné que la BD DRIAS est représentative sur des périodes hebdomadaires, mensuelles et/ou annuelles, mais elle l'est beaucoup moins au pas de temps journalier. Au contraire, les données de MERIGNAC sont beaucoup plus valides à l'échelle du jour, ce pourquoi il a été décidé d'utiliser une base de données différente de celle utilisée pour les projections mais plus représentative sur la période historique pour espérer un meilleur calage.

➤ *Apports des cours d'eau*

Les flux arrivant par les rivières et cours d'eau sont les mêmes que ceux rentrés dans le GLM pour calculer l'évaporation. Le facteur correctif appliqué à cette variable pour le calage d'historique est initialisé à 1.

➤ *Apports de la nappe*

De même que pour le GLM, le calcul de débit de nappe est fait à partir de l'équation 17 en prenant cette fois la valeur de la surface calculée à partir de l'équation de récurrence du bilan hydrique. Le seul paramètre qui est ajusté pour le calage est le coefficient d'échange C_e , qui dépend des propriétés malconnues du milieu : la conductivité hydraulique et l'épaisseur sédimentaire à l'interface nappe/lac. Le coefficient d'échange est initialisé à la valeur de 10^{-9} .

▪ FLUX DE SORTIE

➤ *Evaporation*

L'évaporation utilisée dans ce bilan hydrique est l'évaporation corrigée (Equation 20) de l'équation d'Hamon par le GLM. Comme proposé précédemment, un facteur correctif de cette variable est appliqué, pour compenser la possible sous-estimation de l'évaporation. Il y a donc un degré de liberté sur l'estimation de l'évaporation corrigée et le facteur de correction est initialisé à 1.

➤ *Sorties au canal*

Pour le calcul des sorties par le canal, les Equations X et Y de Hipsey et al. (2019) sont utilisées. Le paramètre à ajuster ici est le C_{DWeir} étant donné qu'il est inconnu. Ainsi, la modification de ce paramètre joue sur les quantités d'eau sortantes via le canal.

4.1.3. Calage des paramètres

En réalisant le bilan hydrique à partir des données brutes explicitées ci-dessus, le niveau du lac simulé est le suivant (Figure 34) :

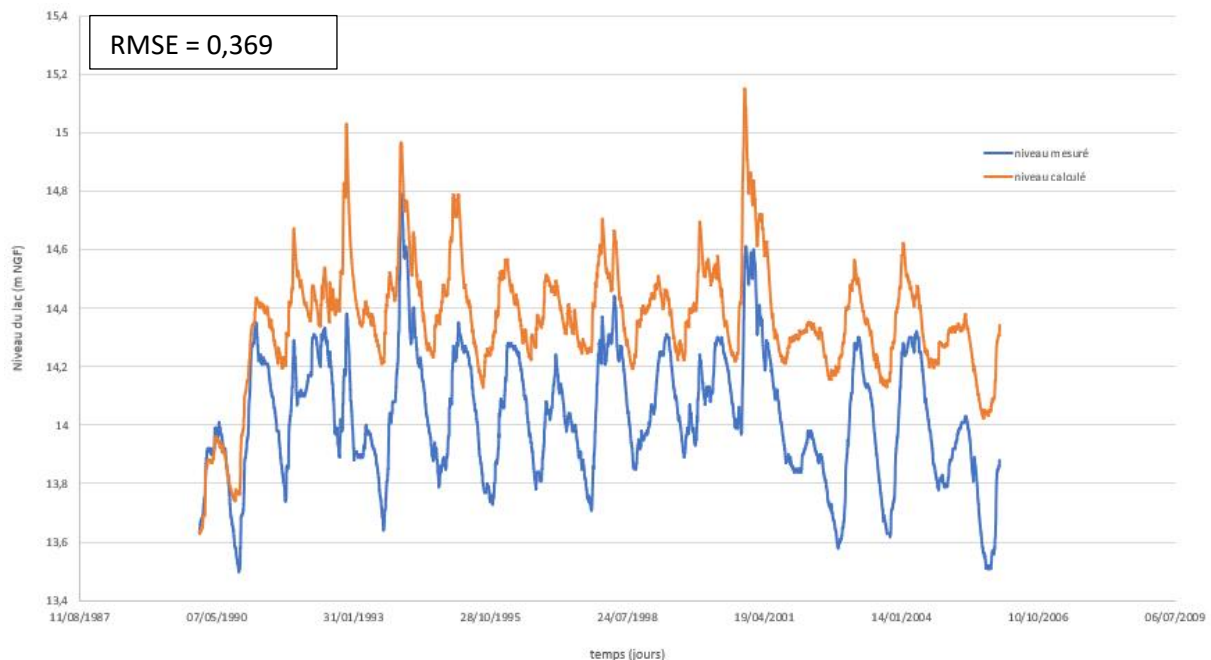


FIGURE 34: NIVEAU DU LAC CALCULE ET SIMULE, AVANT CALAGE, SUR LA PERIODE HISTORIQUE

Il en résulte un niveau calculé suivant bien les fréquences des fluctuations du niveau mesuré. Toutefois le niveau résultant du calcul par bilan hydrique est supérieur d'environ 50 centimètres au niveau

mesuré, avec une RMSE de 37 centimètres. Cela est dû à une surestimation des flux entrants et/ou une sous-estimation des flux sortants du lac. Or, comme expliqué précédemment, les flux d'entrées et de sorties s'appliquant au lac sont entachés d'incertitudes. Il convient ainsi de modifier les valeurs des paramètres incertains et d'appliquer des facteurs correctifs aux équations accompagnées d'incertitudes afin de faire correspondre la chronique du niveau d'eau calculée au niveau réellement observé.

Le calage de ces paramètres est réalisé dans un premier temps manuellement puis ajusté de façon optimale par le solveur de EXCEL. Le solveur permet de trouver une valeur optimale pour une formule dans une unique cellule, nommée la cellule objective, à partir de contraintes appliquées aux cellules dites variables, soit les paramètres. Le solveur affine les valeurs des cellules variables de décision pour satisfaire aux limites appliquées aux cellules contraintes et produire le résultat souhaité dans la cellule objectif (Microsoft-excel). Ici, la cellule objectif est la RMSE, traduisant l'amplitude des écarts entre le niveau mesuré et le niveau simulé par le bilan hydrique. L'objectif défini est une minimisation de la RMSE afin de faire correspondre au mieux les deux chroniques. Les cellules variables correspondent aux paramètres présentés dans le tableau ci-dessous. Enfin, les contraintes appliquées à ces cellules sont définies par les bornes minimales et maximales (Tableau 10).

Paramètres	Initialisation	Valeur min	Valeur max
C (Kv/e)	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Correction Vnap (β)	0	5000	-5000
Correction Vcrastes (λ)	1	0,5	2
Cdweir	1	0	100
hcrest	14,25	14,1	14,3
Correction Evap (σ)	1	0,5	1,6

TABLEAU 10 : CONTRAINTES APPLIQUEES AUX PARAMETRES

Avec $V_{nappe\ corrigé} = V_{napp} + \beta$
 $V_{craste\ corrigé} = V_{craste} * \lambda$
 $Evaporation\ corrigée = Evaporation * \sigma$

Les paramètres d'initialisation correspondent à ceux utilisés pour calculer les données brutes. Il est nécessaire de borner les paramètres par des contraintes traduites par des bornes minimale et maximale pour maintenir une cohérence avec les données initiales. Celles-ci sont fixées au vu du calage attendu, soit une diminution des apports et une augmentation des flux sortants.

Il n'existe toute de fois pas une unique combinaison d'ajustement des paramètres. Lors de l'ajustement, des contraintes ont été appliquées afin de maintenir une cohérence entre la valeur d'initialisation et la valeur retenue. Cela est nécessaire pour que le problème posé ne soit pas « sous-déterminé ».

4.2. Résultats

A l'issue de la résolution par le solveur ainsi que des ajustements manuels, une RMSE de 0,118 est obtenue. La chronique du niveau du lac simulé callé sur le niveau mesuré est visible sur le graphe ci-dessous (Figure 35). Globalement, les fluctuations du niveau sont bien superposées en termes de fréquence ainsi qu'en terme d'amplitude sur l'ensemble de la période historique. Cela signifie que les équations et paramètres utilisés pour la simulation permettent bien de rendre compte des fluctuations réelles du niveau du lac.

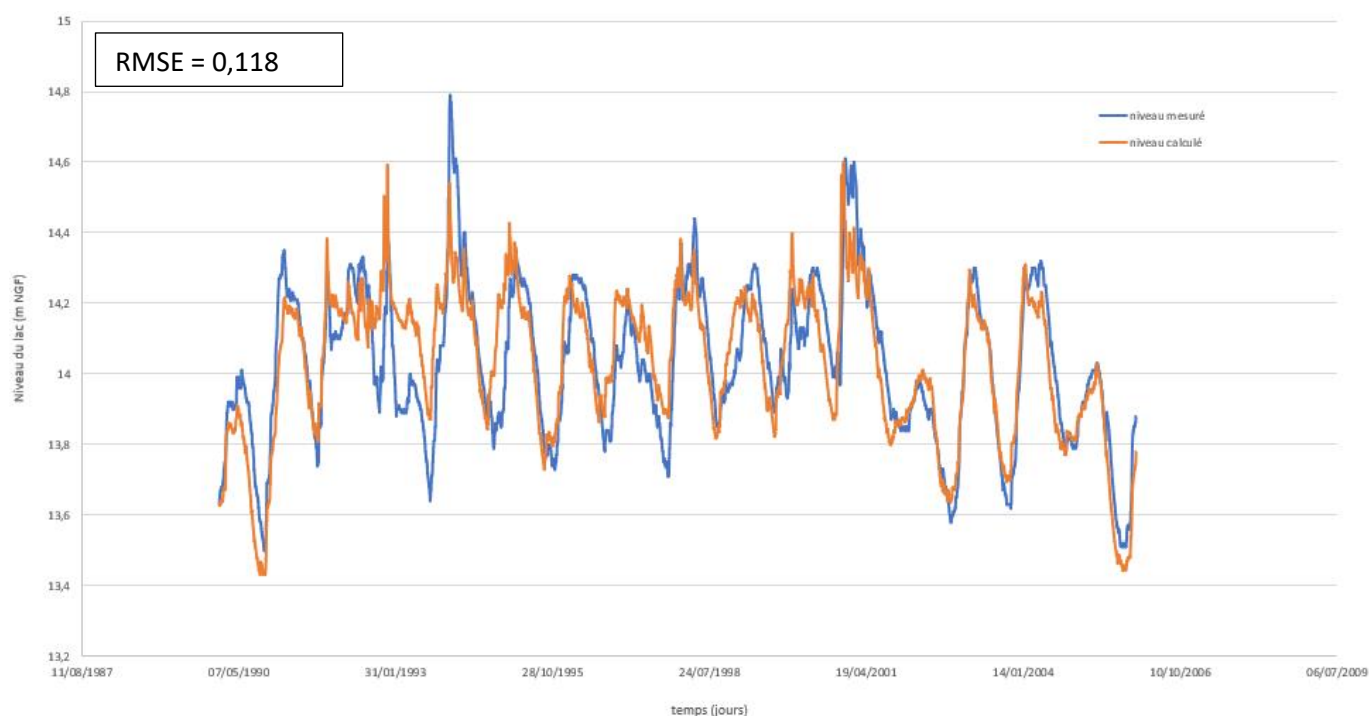


FIGURE 35 : NIVEAU DU LAC SIMULE ET MESURE APRES CALAGE SUR LA PERIODE HISTORIQUE

Les paramètres suivants ont permis de calculer la chronique du niveau du lac. Il est important de noter que ces paramètres ne sont pas physiques et ne représente pas directement la réalité du terrain, mais ils permettent de rendre compte du processus de fluctuation du niveau du lac (Tableau 11).

TABLEAU 11 : VALEURS DE PARAMETRES RETENUES APRES CALAGE

Paramètres	Valeur retenue
C (Kv/e)	$1 \cdot 10^{-9}$
Correction Vnap (β)	-2000
Correction Vcrastes (λ)	1,3
Cdweir	0
hcrest	14,13
Correction Evap (σ)	1,58

Les chroniques de chacun des flux entrants et sortants au lac sont représentés sur les graphiques ci-dessous (Figure 36, Figure 37, Figure 38)

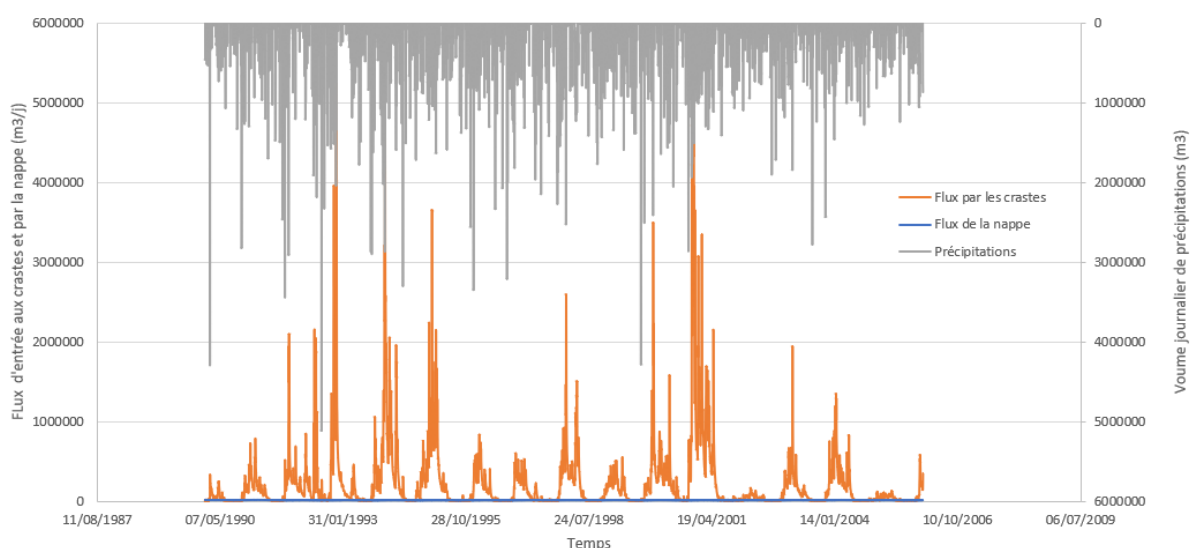


FIGURE 36 : CHRONIQUE DES FLUX ENTRANTS AU LAC (PRECIPITATIONS, ARRIVEES PAR LES CRASTES ET PAR LA NAPPE)

Les arrivées d'eau par les crastes parviennent au lac par pics successifs rythmés par les chroniques de précipitations. Durant les mois estivaux, de juillet à septembre, le débit des cours d'eau peut atteindre des valeurs nulles. Lors des pics de crues, le flux parvenant au lac par l'ensemble des crastes peut augmenter jusqu'à 40.10^5 m³/s. Les flux parvenant par la nappe étant significativement inférieurs, ceux sont les arrivées d'eau par les crastes, corrélées à celles des précipitations qui contrôlent l'amplitude de fluctuation du niveau du lac.

L'échelle du graphique des flux entrants n'étant pas adaptée à l'ordre de valeur des flux arrivant par la nappe, cette chronique est représentée sur un graphique isolé afin de visualiser ses fluctuations.

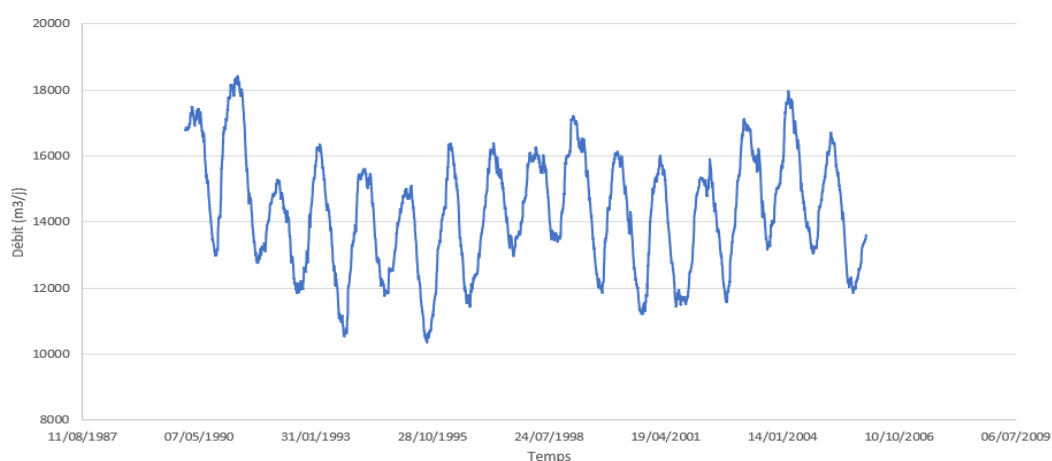


FIGURE 37 : ZOOM SUR LA CHRONIQUE DU FLUX ARRIVANT PAR LA NAPPE

Le flux parvenant par la nappe fluctue au fil du temps en suivant une fréquence relativement constante. Le débit minimal est de l'ordre de 1.10^4 m³/j et le débit maximal est autour de 18.10^4 m³/j. En moyenne, le débit de la nappe vers l'ensemble de la surface du lac est de 14.10^4 m³/j.

Concernant les flux sortant du lac (Figure 38), le taux d'évaporation sur l'ensemble du lac fluctue selon une dynamique très régulière. Durant les mois de novembre à février, les valeurs sont au plus faible avec environ 7.10^4 m³ d'eau évaporé par jour, ce qui correspond à environ 1 mm par jour. Lors de la période estivale et des températures élevées, l'évaporation atteint des taux de 35.10^4 m³ par jour, soit environ 4 mm. A propos de la chronique calculée des flux d'eau sortant du lac par le canal, elle correspond bien au cycle saisonnier d'ouverture de l'écluse. Le flux sortant est nul lorsque le niveau du lac est au plus faible, durant les périodes estivales, matérialisant bien la fermeture de l'écluse. Dans ce modèle, le flux par le canal atteint des débits supérieurs à 40.10^5 m³/j étant directement corrélé avec les périodes de très fortes arrivées d'eau par les crastes.

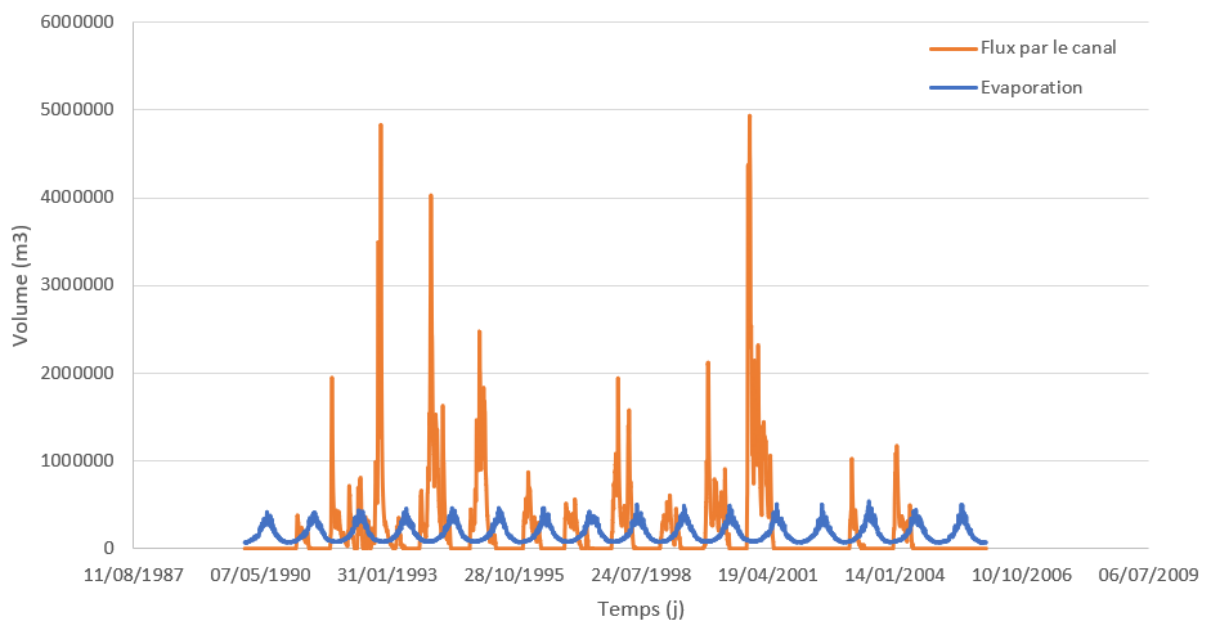


FIGURE 38 : CHRONIQUE DES FLUX SORTANTS

Il est intéressant de visualiser le partitionnement volumétrique des différents flux sur le lac afin de comprendre les principales composantes rythmant les fluctuations du niveau du lac. Un histogramme compilé permet de comparer la part de chacun des apports (Figure 39).

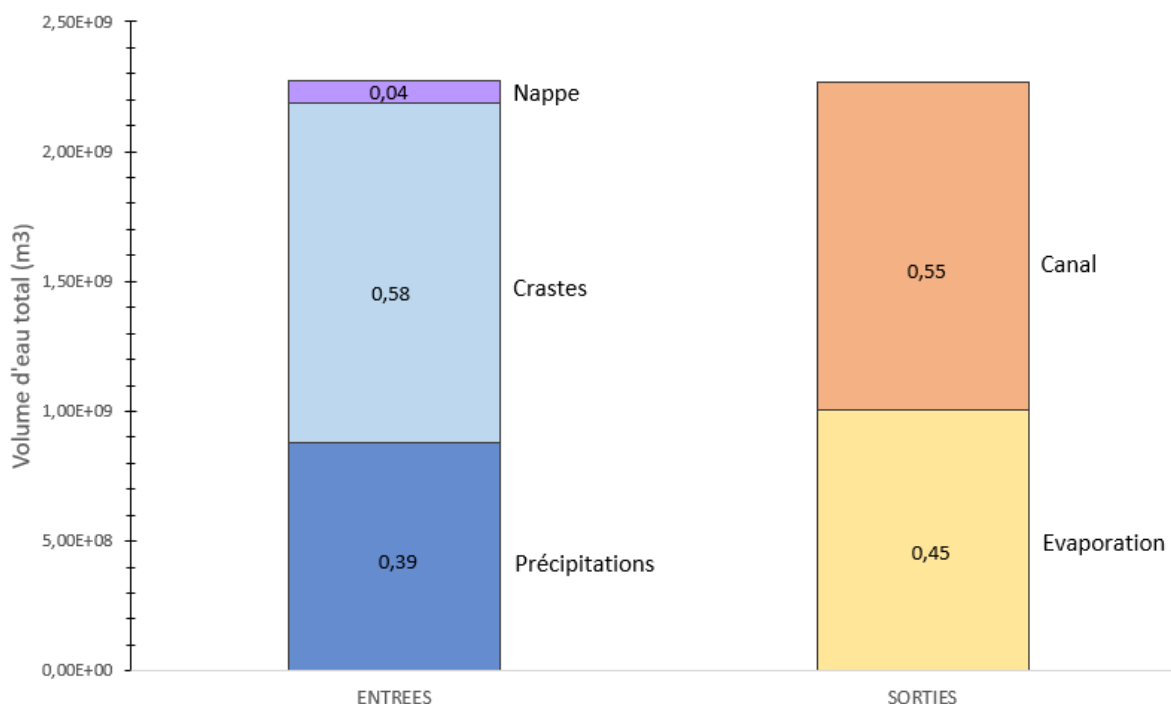


FIGURE 39 : PARTITIONNEMENT VOLUMETRIQUE DES FLUX D'EAU ENTRANTS ET SORTANTS

Les apports d'eau au lac sont majoritairement dûs à la contribution des crastes, apport de surface en interaction avec la nappe et les précipitations. Les précipitations atteignant directement le lac participent pour 39% des apports. Les apports par la nappe sont quant à eux très faibles vis-à-vis du volume total, avec une contribution de 3% des flux entrants. Concernant les flux sortants du lac de Carcans-Hourtin, les sorties par l'évaporation et par le canal ont des contributions volumétriques relativement proches, avec 55% des sorties totales dues au canal et les 45% autres évaporées.

4.3. Conclusion

La réalisation du bilan hydrique sur le lac de Carcans-Hourtin a permis de simuler les fluctuations du niveau du lac durant la période historique. La chronique du niveau observé du lac étant disponible, l'enjeu a été de caler par-dessus la chronique calculée. Ce calage s'est effectué par ajustement de paramètres dont les valeurs étaient mal connues ou difficiles à estimer. Lors de ce processus, l'évaporation estimée par Hamon et corrigée grâce au GLM a une nouvelle fois été corrigée via un facteur correctif. A l'issue d'une optimisation des paramètres, les chroniques historiques calculées sont calées sur celles mesurées avec une RMSE de 11,8 centimètres.

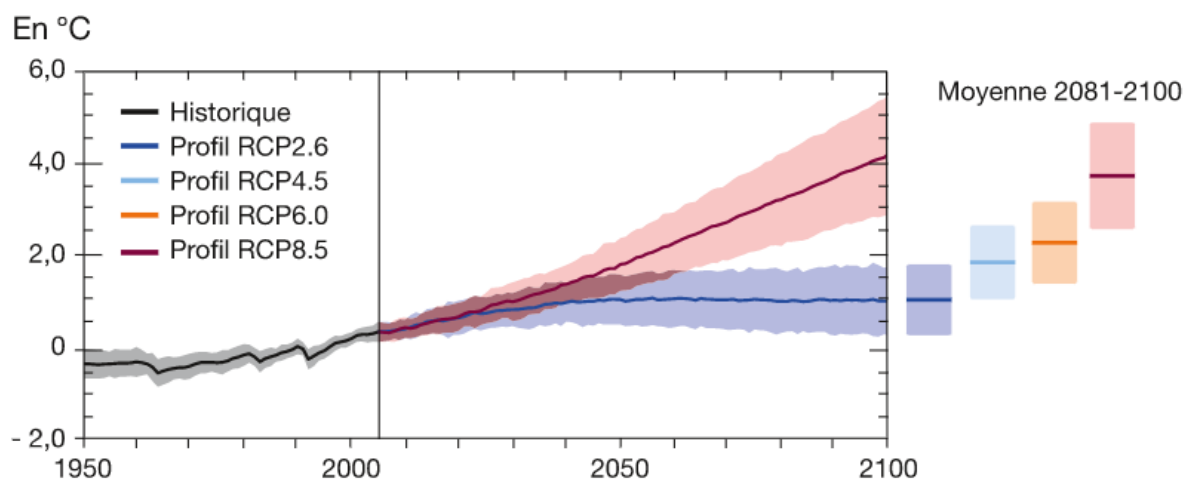
Les paramètres identifiés par ajustement des variables observées au simulées sont dépendants entre eux. Ils constituent la combinaison de paramètres permettant d'obtenir le meilleur calage. A l'issue de la représentation du partitionnement volumétrique des flux en interaction avec le lac, il est notable que les crastes constituent la majeure partie des apports. Les flux par la nappe sont quant à eux négligeables devant les apports totaux. Les sorties sont régulées à taux relativement proches par le canal et l'évaporation.

Les paramètres ayant été calés sur la période historique de 1990 à 2005, ils sont conservés pour la simulation du niveau du lac sur la période prospective.

5. Projections dans un contexte de changement climatique

5.1. Projection climatique

Les simulations climatiques de la BD DRIAS-2020 qui se base sur le modèle CNRM-CM5/ALADIN63 sont faites selon trois scénarios du GIEC : le RCP2.6, le RCP4.5 et le RCP8.5, et ce sur la période projetée de 2006 à 2100. Le pire scénario, le RCP8.5 indique une augmentation des températures moyennes globales de 4°C d'ici 2100 (Figure 40) (GIEC, 2013), en sachant que plus localement l'augmentation peut être plus conséquente. En effet, Souberoux et al. (2020) ont réalisé des projections climatiques pour la France métropole avec les données DRIAS-2020, et il est attendu une augmentation médiane de plus de 4°C, avec des valeurs plus extrêmes dans la partie sud du pays, notamment au sud-est (Figure 41).



Note : variation de la température par rapport à la période 1986-2005.

FIGURE 40: PROJECTION DE LA VARIATION DE TEMPÉRATURE MOYENNE MONDIALE SUIVANT DIFFÉRENTS SCÉNARIOS (GIEC, 1ER GROUPE DE TRAVAIL 2013).

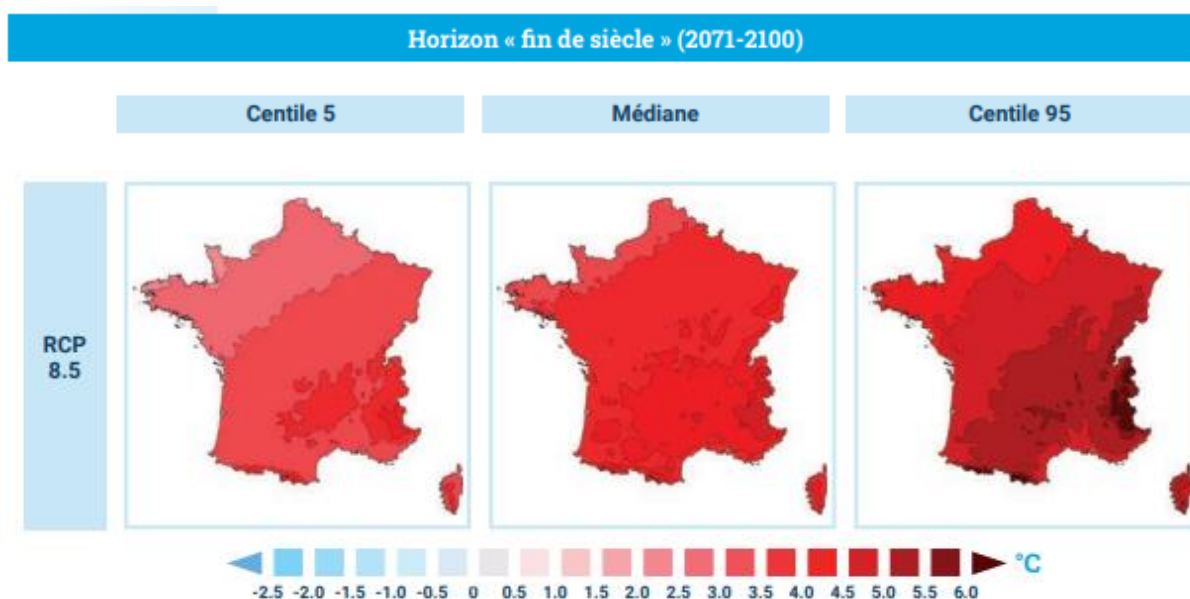


FIGURE 41: CARTES DES ECARTS DE TEMPERATURE A L'HORIZON FIN DE SIECLE SELON LES PARAMETRES STATISTIQUES DE DISTRIBUTION.

Une augmentation aussi élevée des températures sur la métropole entraînera des conséquences inévitables sur la ressource en eau et les apports d'eau aux réservoirs de surface comme les lacs, et amène à penser à une évaporation plus importante et des arrivées d'eau moindre (notamment provenant des rivières), donc un stress hydrique très élevé autant pour les écosystèmes que pour l'activité anthropique. Ainsi une projection du bilan hydrique du lac de Carcans-Hourtin à partir de ce qui a été réalisé précédemment permet d'avoir un aperçu de l'évolution du niveau du lac à l'horizon 2100, et ainsi d'amorcer une anticipation des changements locaux associés. Étant donné qu'il est important de simuler l'évolution du niveau du lac en fonction du pire scénario climatique caractérisé, le scénario RCP8.5 est donc choisi pour réaliser les projections du bilan hydrique sur la période prospective.

5.2. Bilan hydrique prospectif

5.2.1. Estimation de certaines variables

Pour l'estimation de l'évaporation, les données de température utilisées pour la période prospective ne proviennent pas de la même base de données que celles utilisées pour la comparaison avec le GLM. Cela engendre un décalage et des différences sur les valeurs d'évaporation estimées. Une comparaison des évaporations induites des valeurs de températures des BD DRIAS et Mérignac a été faite sur la période historique pour évaluer le décalage engendre (Figure 42). UN RMSE normalisé a été calculé pour les estimations de Hamon et celle de Hamon corrigée pour vérifier l'erreur sur les résidus entre les données drias-2020 et les données de Mérignac (Tableau 12).

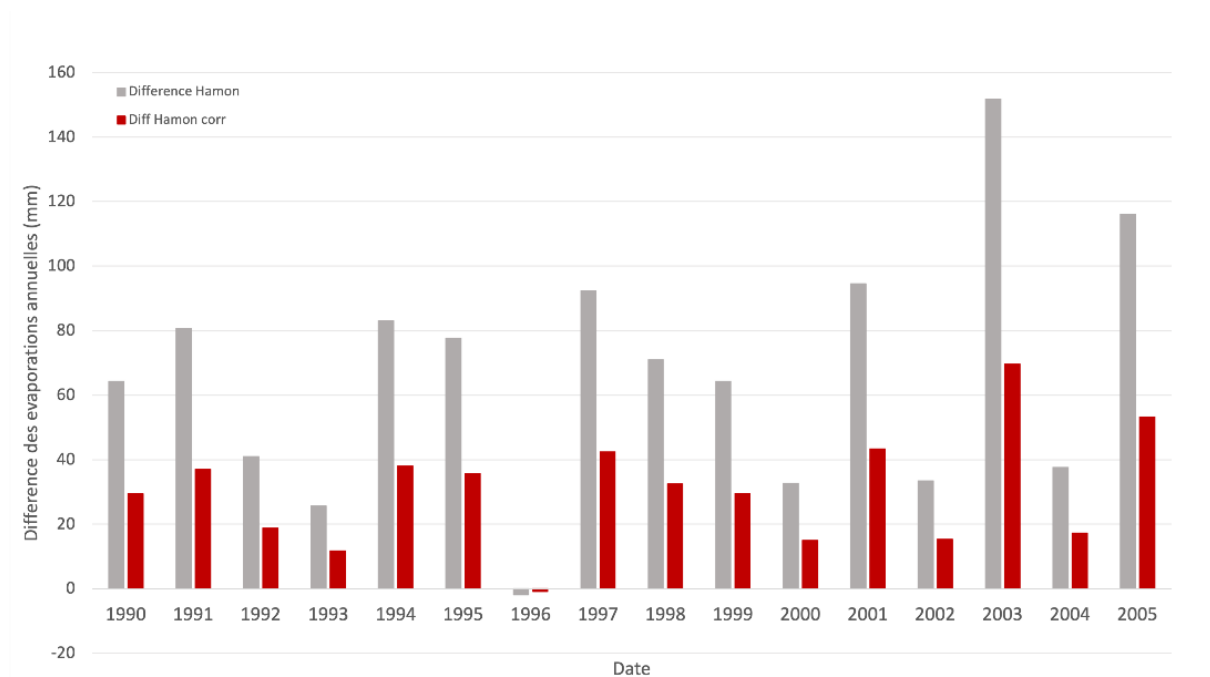


FIGURE 42: RESIDUS DES VALEURS D'EVAPORATION ENTRE LES ESTIMATIONS BASEES SUR LES TEMPERATURES DE LA BD DRIAS ET CELLES DE LA BD MERIGNAC SUR LA PERIODE HISTORIQUE

Estimation	HAMON		HAMON CORRIGE	
BD	DRIAS	MERIGNAC	DRIAS	MERIGNAC
Moyenne totale de l'évaporation (mm) sur 1990-2005	817,66	884,18	676,55	707,07
RMSE normalise	9%		5%	

TABLEAU 12: COMPARAISON DES EVAPORATIONS ENTRE DEUX BASES DE DONNEES DE TEMPERATURE DIFFERENTES

Une estimation de l'évaporation a ensuite pu être faite sur la période prospective de 2006 à 2100 avec (Figure 43) :

- i. Le calcul de l'évaporation selon la méthode de Hamon (cf Partie 3) en utilisant cette fois-ci les données de température projetée du DRIAS-2020
- ii. Le calcul de l'évaporation corrigée de Hamon à partir de l'équation 20

Une tendance claire à la hausse se dessine sur la période prospective, avec une pente plus importante pour les valeurs de Hamon que celles de Hamon corrigé, ce qui est cohérent étant donné que cette dernière diminue les pics.

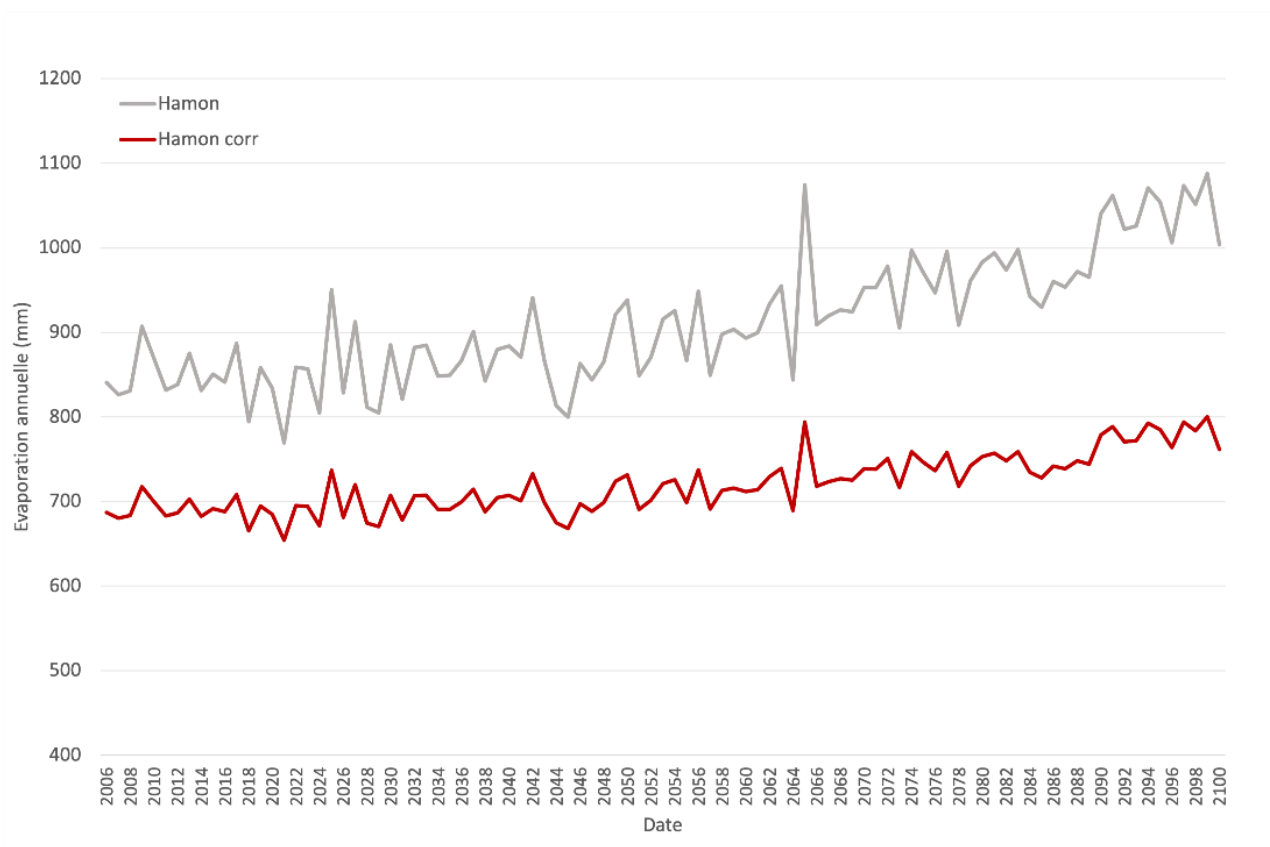


FIGURE 43: ÉVOLUTION DE L'ÉVAPORATION SIMULÉE SUR LA PERIODE PROSPECTIVE

Par la suite, le débit de la nappe a été calculé à partir des niveaux piézométriques simulés par le logiciel PASTAS (Figure 44) de la même manière que pour les niveaux historiques simulés (cf Chapitre 3). Une tendance à la baisse est observée à partir de 2090.

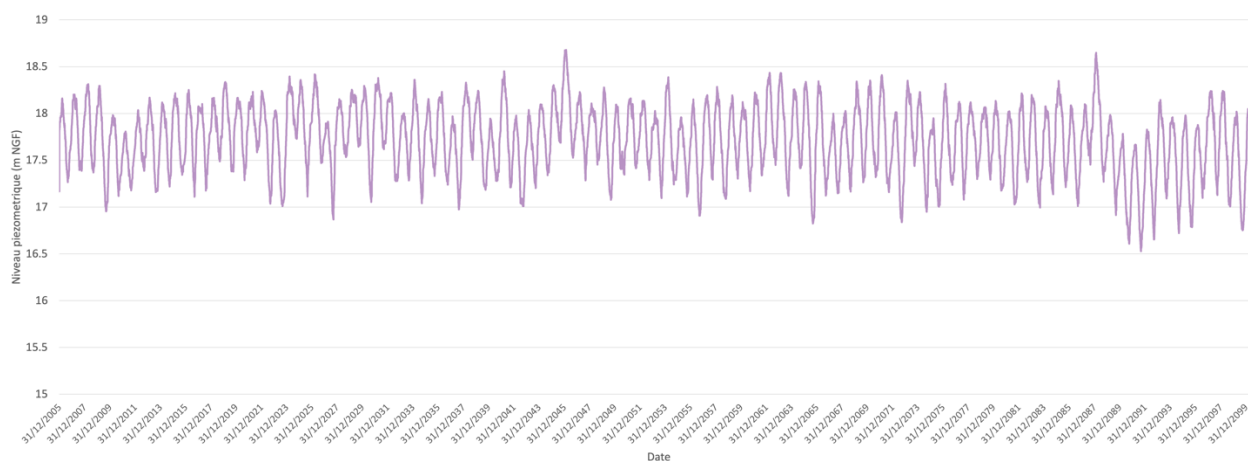


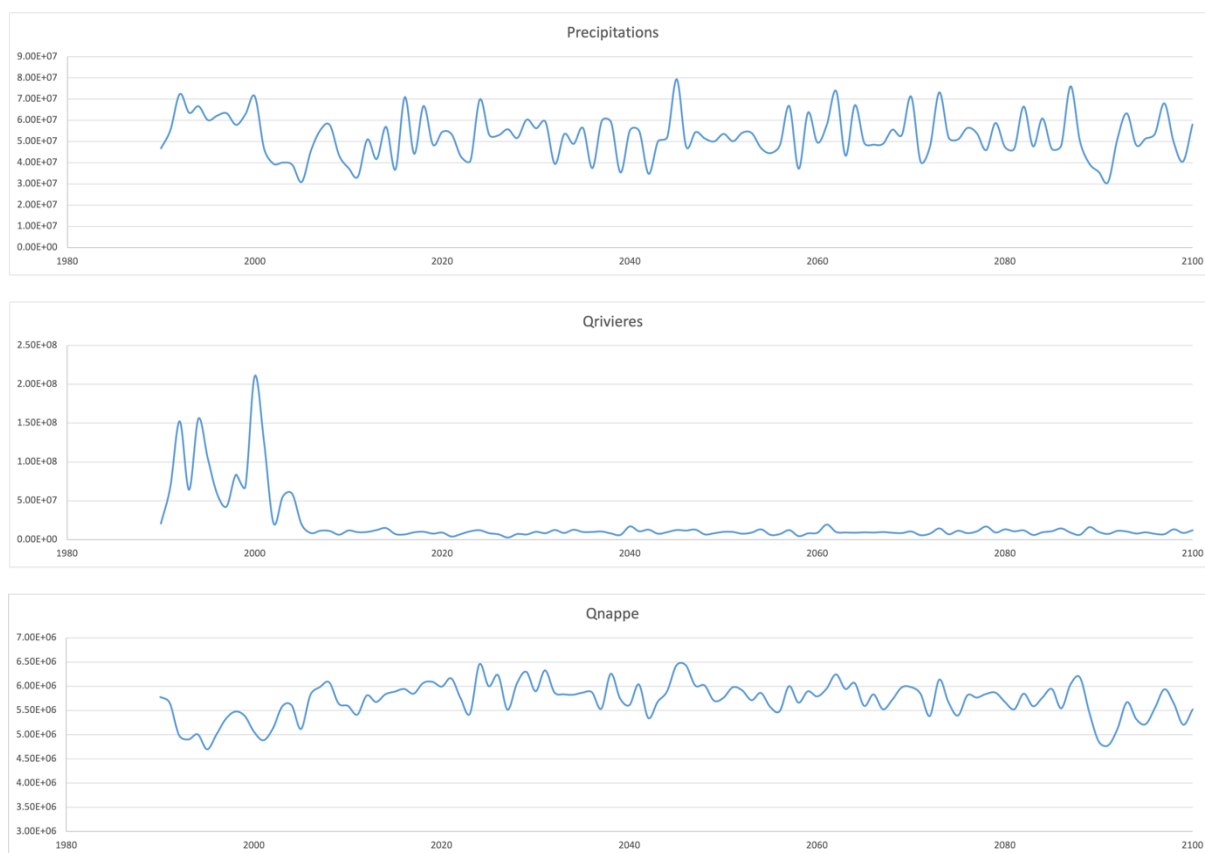
FIGURE 44: CHRONIQUE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES SIMULES

Les débits aux rivières ont également été simulés, cette fois avec le modèle GR4J qui est un modèle conceptuel à réservoir global (Figure 45). Pour caler ce modèle et obtenir des débits simulés, un forçage météorologique a été fait à partir de la BD Mérignac.

5.2.2. Résultats du bilan hydrique

Le bilan hydrique est désormais simulé sur la période prospective à partir des équations des variables présentées dans les chapitres précédents, de l'évaporation nouvellement calculées, des données de précipitations projetées par le DRIAS-2020 et des paramètres du Tableau 11 du calage d'historique. L'équation de récurrence du bilan hydrique est initialisée à partir des données du dernier jour de la période historique, soit le 31/12/2005.

La Figure 45 présente l'ensemble des volumes d'entrées et sorties sur l'ensemble de la période historique et prospective. Les débits à la nappe (dépendants du niveau piézométrique) et au canal sont calculés à travers la formule de récurrence. Sur cette figure, il est observable que les débits aux rivières et au canal chutent drastiquement à la fin de la période prospective. Cela est dû au décalage entre les données météo DRIAS et Mérignac.



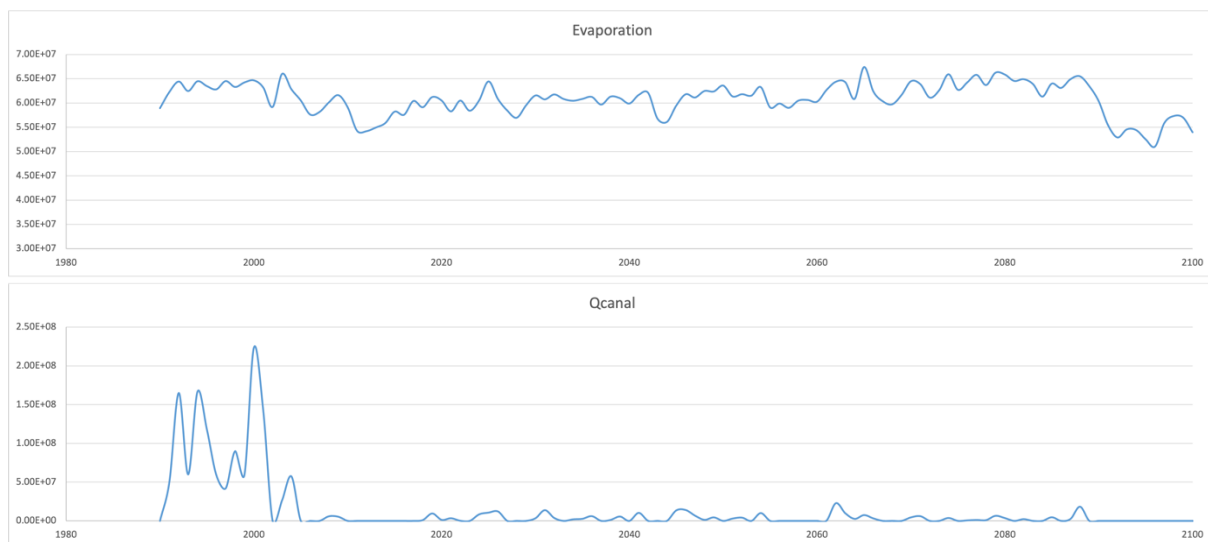


FIGURE 45: DEBITS ANNUELS DES ENTREES ET SORTIES D'EAU DU LAC. L'AXE Y EST EN VOLUME (M3).

Il en vient ainsi la Figure 46, présentant l'évolution du niveau du lac sur la période prospective. Cette dernière comporte de nombreux points de questionnement. Afin de pouvoir discuter correctement de ces résultats et de l'influence des variables d'entrée et de sortie, il est important de s'affranchir de la surface dont dépend les volumes d'eau calculés de ces variables. L'idée est ainsi d'obtenir des hauteurs d'eau pour chacune de ces variables à partir des volumes simulés en divisant par la surface, cette dernière étant elle-même calculée à partir du niveau du lac simulé puis de la relation hauteur-aire. La Figure 47 est ainsi construite.

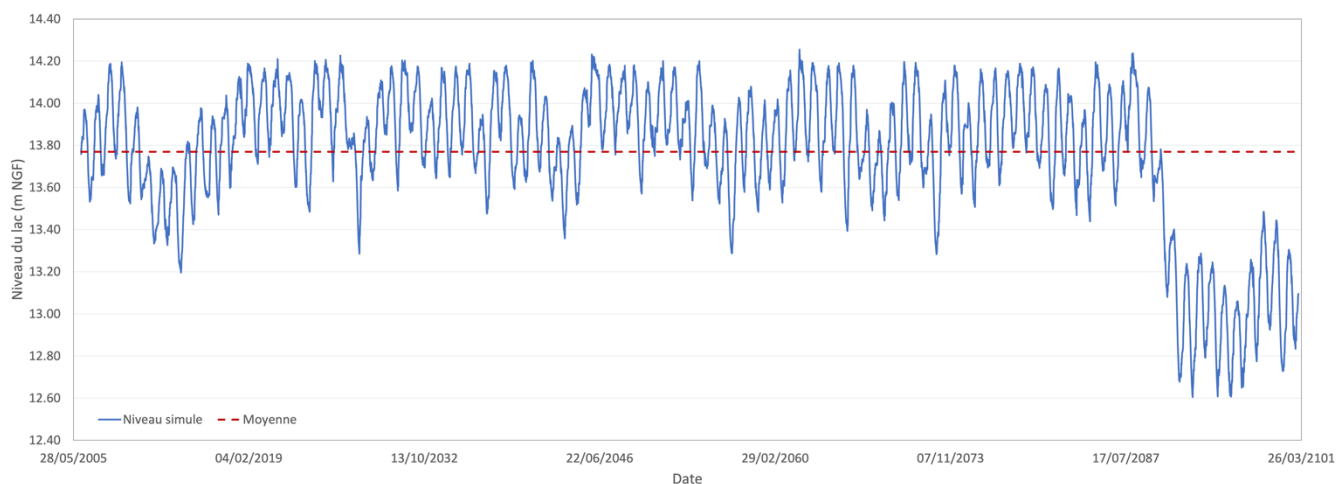


FIGURE 46: CHRONIQUE DU NIVEAU DU LAC

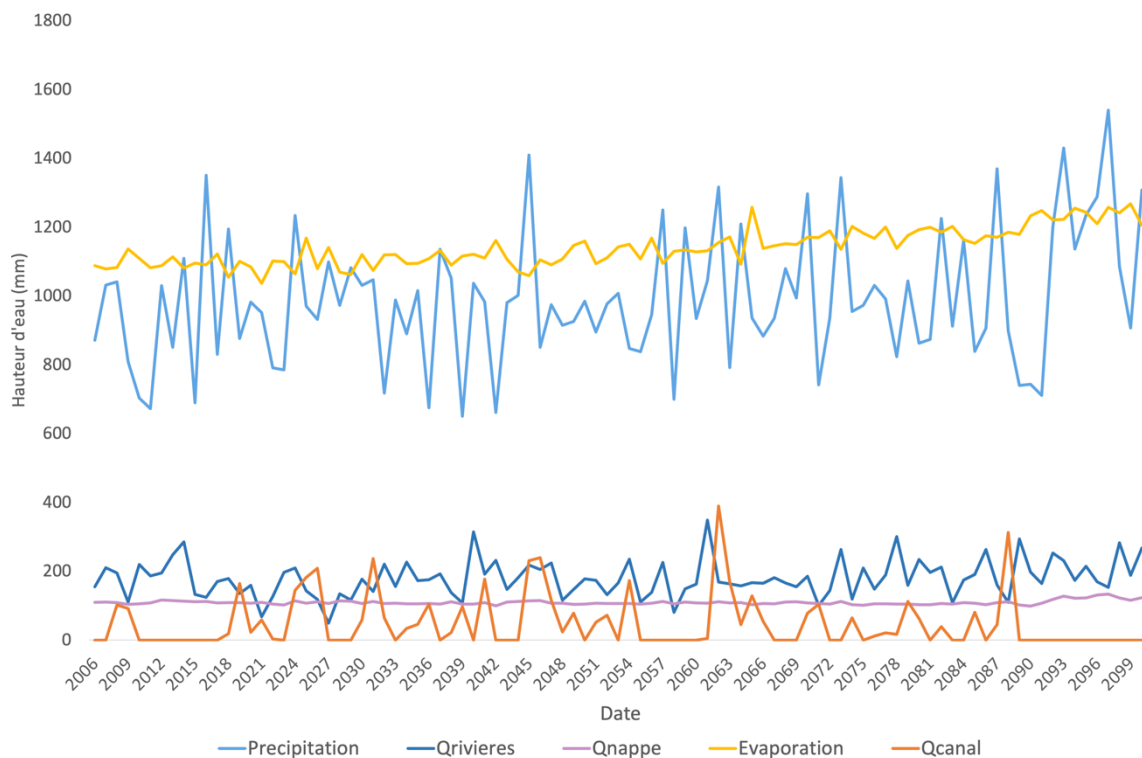


FIGURE 47 : CHRONIQUES ANNUELLES DES HAUTEURS D'EAU DES VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE DU LAC

5.3. Discussion et interprétation

Premièrement, une interprétation du niveau du lac simulé peut être faite. Entre 2010 et 2011, une chute notable du niveau du lac est remarquée (Figure 46). En observant la Figure 47, une baisse conséquente et relativement longue des précipitations a eu lieu durant cette même période. Une relation directe entre le niveau du lac et les précipitations peut donc être mise en avant ici. Par la suite, jusqu'aux années 2080, le niveau du lac modélisé est relativement stable, avec un maximum autour de 14,20m NGF et une valeur moyenne sur l'ensemble de la chronique de 13,77m NGF, étant légèrement plus bas que celui observé sur la période historique. Cette valeur moyenne se voit affectée par la diminution drastique du niveau du lac à partir de l'année 2089. En première approche, cela est lié à la sécheresse pluri-annuelle durant cette période, marquée par de faibles précipitations sur le long terme.

Ce changement brusque mène toutefois à de nombreux questionnements, notamment vis-à-vis de la fiabilité de cette simulation. Il faut tout d'abord rappeler que cette simulation constitue la partie finale de ce projet et est la moins étudiée et analysée, donc de nombreuses pistes d'améliorations seront décrites dans la partie suivante. La chute notable du niveau présente cependant des justifications et témoigne de changements importants des variables d'entrée. En s'intéressant à la Figure 45, il est observable que les précipitations, le débit de nappe et l'évaporation présentent également une diminution radicale de leur volume annuel. La Figure 47 permet de s'affranchir de l'influence du niveau du lac pour vérifier si une ou plusieurs de ces variables ont réellement pu affecter le niveau du lac engendrant une baisse importante de celui-ci. La chronique de précipitations en mm montre une chute marquante entre 2089 et 2090 m correspondant parfaitement à la baisse du niveau du lac. Le débit de

la nappe simulée par PASTAS présente le même comportement sur cette période (Figure 44). Il semblerait donc que les variations de précipitations ont un impact considérable sur l'évolution du niveau du lac. Les chroniques de précipitations et d'évaporation étant toutes deux en augmentation sur les projections futures, elles semblent se compenser maintenant un niveau relativement stable, excepté lors de périodes longues de faibles précipitations qui bouleversent le bilan hydrique du lac et le faisant diminuer drastiquement. Cette observation, qui doit être prise avec précaution, est d'intérêt majeur pour la compréhension de l'évolution du niveau du lac notamment en contexte de changement climatique et dans le cadre de la préservation des espèces patrimoniales et de l'adaptation et de l'anticipation aux changements futurs pouvant affecter le bilan hydrique du lac.

5.4. Limites et Perspectives

Cette première projection prenant en compte le scénario le plus extrême actuellement étudié du changement climatique est un premier travail sur ce sujet concernant le contexte des lacs médocains. De nombreuses améliorations peuvent et doivent être apportées à ce modèle climatique en plus de ce qui a été précédemment expliqué dans les chapitres antérieurs :

- Une correction des variables climatiques pourrait être réalisée sur les données DRIAS en se basant sur les données de Mérignac, pour avoir une quantification des températures et précipitations plus représentatives de la réalité sur l'ensemble des variables d'entrée et sortie et éviter un décalage important des valeurs de débit entre la période historique et la période prospective (ex : débits aux rivières)
- Une réestimation de l'évaporation avec une meilleure correction pourrait être faite pour apporter davantage de précision et d'amplitude sur cette variable
- Un nouvel ajustement des paramètres du calage d'historique pourrait être étudié pour éviter les variations drastiques du niveau du lac en peu de temps (ex de la chute en 2089-2090) et proposer une tendance plus continue.

En ce qui concerne les perspectives liées à ces projections climatiques pour rendre plus robuste ce travail, une projection du niveau du lac pourrait être proposée en se basant sur les autres scénarios du GIEC, de manière à comparer les différents scénarios et les conclusions associées. Un travail supplémentaire serait intéressant en ce qui concerne l'étude plus détaillée de la fréquence des cycles pour comprendre la durée des possibles périodes d'exondations qui affectent la végétation aquatique.

Partie IV : Conclusion

Ce projet de fin d'études a mené à la réalisation d'une carte bathymétrique du lac de Carcans-Hourtin via un Modèle Numérique de Terrain qui répond aux attentes du projet Vigies-Lacs quant à la caractérisation de la géométrie du fond du lac. Ce MNT met en avant une frange de faible profondeur conséquente (sur plusieurs centaines de mètres) qui serait sujette à la baisse du niveau du lac dans un contexte de changement climatique, menant donc à une vulnérabilité des espèces aquatiques y vivant. Ce MNT permet de faire ressortir les zones prioritaires à prendre en considération dans une optique de conservation de la biodiversité, d'adaptation des activités anthropiques associées, et d'émissions de carbone provenant du substrat organique y étant présent. Des incertitudes sont à prendre en compte sur ce MNT et des pistes d'améliorations telles que l'intégration d'un échantillonnage plus complet.

En plus de l'apport d'informations sur la localisation de ces zones vulnérables, ce MNT apporte une connaissance suffisamment précise à la construction d'une courbe caractéristique du lac ayant aidé à la réalisation du bilan hydrique du lac. Ce bilan hydrique a pu être fait également grâce aux différentes recherches, collectes de données et simulations des variables d'entrée et de sortie du lac, permettant une meilleure compréhension des variables influençant grandement les variations du niveau du lac comme les précipitations et l'évaporation, mais également les débits aux rivières notamment pour la compréhension des pics de niveau du lac. Un calage d'historique a été effectué des résultats simulés du bilan hydrique sur des données historiques du niveau du lac, permettant ajustement des paramètres des variables en jeu et d'ajouter des facteurs multiplicateurs ou d'addition sur certaines d'entre elles. Ceci a mis en avant une sous-estimation des données d'évaporation simulées par l'équation d'Hamon et corrigées par le GLM et une surestimation des débits simulés d'entrée par la nappe notamment. Cet ajustement a permis l'obtention d'un calage d'historique cohérent dont les paramètres d'ajustement sont utilisés pour aboutir à l'objectif final de cette étude qui est une projection du niveau du lac jusqu'à 2100. Cette projection sur la période prospective est une première modélisation du niveau du lac, qui comporte de nombreuses incertitudes liées au calage d'historique basé sur des variables dont l'incertitude sur les valeurs pourrait être amélioré, par exemple une quantification plus appropriée de l'évaporation ou encore une meilleure estimation des chroniques simulées des entrées pour la période prospective. L'amélioration de l'estimation à la fois des variables et à la fois des paramètres ajustés permettrait d'obtenir une projection plus plausible avec moins de variations brutales du niveau du lac. Cependant, ce travail complet apporte de nombreuses connaissances sur le lac et sur les variables influençant son niveau, permettant des avancées du projet Vigie-Lacs.

Grâce à ce travail, et avec des perspectives d'amélioration du bilan hydrique et de sa projection sur le futur, les émissions de carbone liées aux zones exposées à la baisse du niveau du lac pourraient être prochainement quantifiées, étant donné que c'est l'un des volets du projet Vigie-Lacs. De plus, un plan de conservation et protection des espèces aquatiques du lac pourrait être davantage ciblé sur les zones vulnérables identifiées. Un autre volet pourrait être développé qui est l'intégration des considérations concernant les usages actuels et futurs du lac, avec des propositions d'adaptations et d'aménagements des activités anthropiques.

Bibliographie

Pur la biblio > Google scholar > cite > APA

these D Buquet

ADES : <https://ades.eaufrance.fr/> [dernier accès le 20/03/2023]

Agence régionale de la biodiversité de Nouvelle Aquitaine, 2022. Actualités de l'agence : <https://www.biodiversite-nouvelle-aquitaine.fr/le-projet-vigie-lacs-pour-une-meilleure-connaissance-de-la-vegetation-aquatique-des-lacs-du-littoral-aquitain-dans-un-contexte-de-changements-globaux/> (dernier accès le 27/03/23)

Allouis T, 2007. Analyse et traitement de trains d'ondes retour de LiDAR bathymétrique : application aux lames d'eau de faibles épaisseurs. *Sciences de l'environnement*, hal-02590104.

Alleaume S, Lanoiselee C, Agillier C, 2010. Bathymétrie des plans d'eau, protocole d'échantillonnage et descripteurs morphométriques. *CEMAGREF*

Allemand, P., le Berre, I., Blaise, E., Cuq, V., Delacourt, C., Fichaut, B., ... & Suanez, S, 1994. COMMENT SUIVRE L'ÉVOLUTION DE LA TOPOGRAPHIE ET DE LA BATHYMÉTRIE DE LA ZONE LITTORALE ? *GESTION DES RISQUES D'ÉROSION ET DE SUBMERSION MARINES*.

Apexit, 2018. Interpolation de données spatiales : TIN, IDW, krigeage, krigeage en bloc, co-krigeage... quelle est la différence ? *Précision Agriculture*.

Association Cistude Nature, 2019. Les sentinelles du climat : Résultat. <https://www.sentinelles-climat.org/laboratoire/les-resultats/>

Bibliothèque GRASS

Bibliothèque ArGIS Pro. Tool Reference, concepts relatifs au jeu d'outils de l'interpolation.

Bertrin V, 2018. Ecologie et déterminisme physique des peuplements de macrophytes dans les lacs naturels peu profonds : application aux grands lacs du littoral aquitain de Carcans-Hourtin, Lacanau, Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarosse (Gronde, Landes). *Université de Bordeaux, 2018BORD0389, tel-I-02050388*

Buquet D, 2017. Cycle des éléments biogènes dans les lacs côtiers en Gironde. *Biodiversité et Ecologie. Université de Bordeaux, 2017BORD0629, tel-01617783*.

CNRM : <https://www.umr-cnrm.fr/> [dernier accès le 28/03/2023]

DRIAS, 2020. Simulations climatiques -DRIAS 2020 -CNRM-CM5/ALADIN63. *Notice explicative*, 3p .

DRIAS : <http://www.drias-climat.fr/> [dernier accès le 28/03/2023]

Escadrone : <https://escadrone.com>. La bathymétrie par drone marin : ce qu'il faut savoir.

Foulon, V., Lamard, C., Preau, I, 2022. Modélisation hydrogéologique des échanges nappe-rivières-drains autour du lac d'Hourtin - Gironde (33). *Projet REZIN, Projet de fin d'étude*, 42p.

GIEC, 2013. Changements climatiques 2013, Les éléments scientifiques. *Résumé technique, Extraits de la contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, 222p. ISBN 978-92-9169-238-5

Hamon, W.R., 1961. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, v. 87, p. 107–120.

Harwell, G.R., 2012. Estimation of evaporation from open water—A review of selected studies, summary of U.S. Army Corps of Engineers data collection and methods, and evaluation of two methods for estimation of evaporation from five reservoirs in Texas. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, 2012–5202, 96 p.

Hmouche O, Maatoug A, 2022. Analyse comparative des méthodes d'interpolation spatiale pour générer des MNT.

Keller, P.S., Marcé, R., Obrador, B., 2021. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas. *Nat. Geosci.* 14, 402–408. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00734-z>

Plan national d'actions 2021-2020 En faveur des végétations de bords d'étangs arrière-littoraux des Landes et de Gironde, 2021.

Martinsen, K.T., Kragh, T. & Sand-Jensen, K., 2019. Carbon dioxide fluxes of air-exposed sediments and desiccating ponds. *Biogeochemistry*, 144, 165–180. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00579-0>

Phyoe, W.W., Wang, F., 2019. A review of carbon sink or source effect on artificial reservoirs. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 2161–2174. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02237-2>

Poole HH, Atkins W.R., 1929. Photo-electronic measurements of submarine illumination throughout the year. *J Mar Biol Assoc*, 16:297–394

Pruitt, A, April 2021b. Appendix E - Central Sands Lakes Study Technical Memorandum: General Lake. Central sands lakes study report. *Department of Natural Resources, Wisconsin*, 11p.

Rahab K, 2021. L'utilisation de la Géostatistique pour l'estimation des paramètres géotechniques.

Shuttleworth, W.J., 1993. Handbook of hydrology: New York, McGraw-Hill, p. 4.1–4.53.

SIAEBVELG, 2021. Plan d'Actions pour la Préservation et la Valorisation des zones humides des Lacs Médocains – 2021-2030. *Rapport*, 149p.

Steve Stewart, 2014. Great Lakes also experience seasonal temperature changes. *Michigan State University Extension, Michigan Sea Grant*.

Vernier Science Education : https://www.vernier.com/experiment/bwv-21_physical-profile-of-a-lake/ [dernier accès le 23/03/2023]

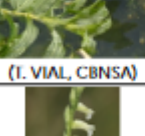
Annexes

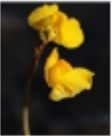
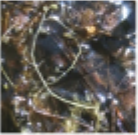
Annexe 1 – Log stratigraphique du Pliocène au Pléistocène du triangle landais (Modifié à partir de Karnay, 2007)

Ere stratigraphique	Sous-système stratigraphique	Age (A.P.)	formation	Description lithologique des faciès les plus typiques
Quaternaire	Pléistocène	-11 800 a	Dunes	Sables éoliens
			Sable des landes	Sables moyens éolisés jaunes
		-1.806 Ma	Formation de Castets	- Lignite sableux - Argiles silteuses gris sombre à débris organiques (argiles d'Argelouse) - Sables grossiers blanchâtres, fluviaux
Tertiaire	Pliocène		Formation de Belin	- Argiles gris bleu à marbrures rouille (argiles de Brach) - Gravieres et sables blancs kaoliniques

Annexe 2 : Espèces végétales protégées ou patrimoniales qui bénéficieront de la mise en œuvre du PNA (DH, Directive Habitats transposée en droit français ; PN, Protection Nationale ; PR, Protection Régionale ; Dpts, Protection Départementale ; LRN, Liste Rouge Nationale ; LRAq, Liste Rouge Aquitaine ; EDZ Espèce Déterminante ZNIEFF. Statut : RE, à rechercher ; EN : en danger ; VU, vulnérable ; NT, quasi-menacé)

Photographie	Taxon Nom latin (Famille)	Taxon Nom vernaculaire	Chorologie	Habitat caractéristique	DH	PN	PR	PDpt	LRN	LR Aq.	ED ZNIEFF
 (COSTE, 1937)	<i>Aldrovanda vesiculosa</i> (Droseraceae)	Aldrovanie à vessie	Eurasiatique	Herbiers dulçaquicoles thermophiles	X	X				RE	X
 (S. LORJOT, CBNSA)	<i>Caropsis verticillato- inundata</i> (Apiaceae)	Faux-Cresson de Thore Thorella Caropsis de Thore	Atlantique Franco- Ibérique Sub- endémique	Pelouses amphibies	X	X				NT	X
 (S. LORJOT, CBNSA)	<i>Drosera intermedia</i> (Droseraceae)	Rosolis in- termédiaire	Holarctique	Végétations ouvertes hygrophiles acidiphiles oligotrophes		X					X
 (T. BEUDIN, CBNSA)	<i>Drosera rotundifolia</i> (Droseraceae)	Rosolis à feuilles rondes	Holarctique	Tourbières à sphaignes, landes tourbeuses		X				NT	X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Elatine hexandra</i> (Elatinaceae)	Elatine à six étamines	Centre et Ouest Europe	Pelouses amphibies des grèves d'étangs sur silice						NT	
 (T. EMFRIAU, CBNSA)	<i>Hydrocharis morsus ranae</i> (Hydrochari- taceae)	Morène	Eurasiatique	Herbiers dulçaquicoles des eaux stagnantes peu profondes						EN	X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Lycopodiella inundata</i> (Lycopodia- ceae)	Lycopode inondé	Circumbo- réal	Gouilles de cicatrisation de tourbières à sphaignes et landes tourbeuses ouvertes	X	X			NT	VU	X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Menyanthes trifoliata</i> (Menyantha- ceae)	Trèfle d'eau	Circumbo- réal	Tremblants tourbeux et gouilles						VU	X

Photographie	Taxon Nom latin (famille)	Taxon Nom vernaculaire	Chorologie	Habitat caractéristique	DH	PN	PR	PDpt	LRN	LR Aq.	ED ZNIEFF
 (N. I FBLOND, CBNSA)	<i>Najas marina</i> (Hydrocharitaceae)	Grande naiade	Sub- cosmopolite	Herbiers dulcaquicoles eutrophiles			X				X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Narthecium ossifragum</i> (Nartheciaceae)	Narthécie des marais	Ouest Europe	Tourbières et landes tourbeuses à sphaignes			X			NT	X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Parnassia palustris</i> (Celastraceae)	Parnassie des marais	Circumbo- réal	Tourbières basses, pelouses mésotrophiles oligotrophiles				33,40			X
 (C. CLERO, CBNSA)	<i>Pilularia globulifera</i> (Marsileaceae)	Boulette d'eau	Ouest Europe	Pelouses amphibies vivaces acidophiles oligotrophiles		X				NT	X
 (P. LAFON, CBNSA)	<i>Potamogeton gramineus</i> (Potamogetonaceae)	Potamot à feuilles de graminées	Circumbo- réal	Herbiers dulcaquicoles oligotrophiles à mésotrophiles						VU	
 (T. EMERIAU, CBNSA)	<i>Potamogeton lucens</i> (Potamogetonaceae)	Potamot luisant	Eurasiatique	Herbiers dulcaquicoles mésotrophiles à eutrophiles						NT	
 (I. VIAL, CBNSA)	<i>Potamogeton perfoliatus</i> (Potamogetonaceae)	Potamot à feuilles perfoliées	Circumbo- réal	Herbiers dulcaquicoles mésotrophiles à eutrophiles						NT	
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Spiranthes aestivalis</i> (Orchidaceae)	Spiranthe d'été	Sub- atlantique	Bas marais oligotrophiles Pelouses neutroclines	X	X			VU	EN	X
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Trapa natans</i> (Tythaceae)	Châtaigne d'eau	Paléotem- péré	Fau stagnante des étangs et cours d'eau lents mésotrophiles à eutrophiles			X			EN	X

Photographie	Taxon Nom latin (Famille)	Taxon Nom vernaculaire	Chorologie	Habitat caractéristique	DH	PN	PR	PDpt	LRN	LR Aq.	ED ZNIEFF
 (N. MESLAGE, CBNSA)	<i>Utricularia australis</i> (Lentibularia- ceae)	Utriculaire citrine Utriculaire élevée	Eurytropical	Herbiers dulçaquicoles mésotrophiles à eutrophiles			X				X
 (P. LAFON, CBNSA)	<i>Utricularia intermedia</i> (Lentibularia- ceae)	Utriculaire intermé- diaire	Circumbo- réal	Herbiers oligotrophiles et gouilles tourbeuses					VU	EN	
 (A. CAILLON, CBNSA)	<i>Utricularia minor</i> (Lentibularia- ceae)	Petite utriculaire	Circumbo- réal	Herbiers des eaux froides et distrophes, gouilles tourbeuses					NT	VU	