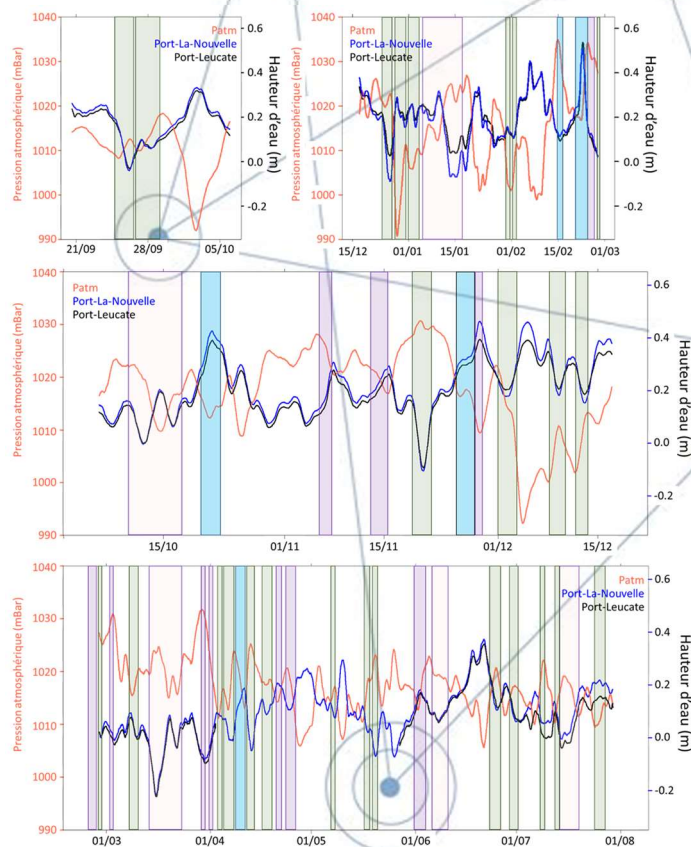


Etude de l'impact des barrages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate

Action 2.1 - Accompagnement scientifique de la suppression des barrages mobiles sur l'étang de Salses-Leucate (Convention Plan Littoral 21)



Rapport Final

Fiche documentaire

Titre du rapport : Etude de l'impact des barrages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate	
Référence interne : ODE/UL/LERLR 22-09 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	Date de publication : 2021/10/04 Version : 1.0.0 Référence de l'illustration de couverture Langue(s) : Français
Résumé/ Abstract : <p>Ce rapport présente les résultats acquis dans le cadre du projet CONNECT LEUCATE portant sur l'étude des impacts des barrages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate et les effets à attendre après leur suppression. Des données de hauteur d'eau, salinité, température dans la lagune de Salses-Leucate et de débits dans le grau de Port-Leucate ont été acquises, sur la période d'octobre 2020 à juillet 2021, par le bureau d'étude HYDRIAD Eau et Environnement selon un cahier des charges défini par l'Ifremer. L'analyse de ces données a permis d'évaluer l'impact des portes sur 1) les volumes d'eau échangés entre la mer et la lagune de Salses-Leucate et le temps de renouvellement ; 2) les éventuelles surcotes dans la lagune lors d'évènements hydro-climatiques spécifiques. L'impact éventuel de la présence des portes sur les cultures marines a été estimé à dire d'expert.</p> <p>Le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par les trois graus a été estimé à 19 jours en automne/hiver en l'absence des portes. Comparativement aux lagunes méditerranéennes françaises, ce temps de renouvellement est caractéristique d'une lagune pour laquelle les échanges sont efficaces. En présence des portes, ce temps de renouvellement passe à 52 jours, soit un taux de renouvellement équivalent à celui de la lagune de Thau.</p> <p>La présence des portes a tendance à retarder la mise en équilibre entre les niveaux d'eau dans la lagune et en mer et notamment à limiter fortement les exports d'eaux. Ainsi, en présence des portes, les eaux douces continentales excédentaires apportées lors d'évènements pluvieux vont alors avoir tendance à résider plus longtemps dans la lagune (allant de quelques heures à la journée), augmentant ainsi les risques de surcote dans certains secteurs lagunaires.</p> <p>A la période de l'année où les portes sont mises en place, les conditions hydrologiques (température, rayonnement global, apports d'eaux douces et de nutriments) sont favorables à la survie des contaminants microbiologiques (E. Coli) et potentiellement à la croissance de Dinophysis. Dans ce contexte, l'augmentation du temps de résidence des eaux dans la lagune de Salses-Leucate engendrée par la présence des portes pourrait augmenter le risque de contamination des coquillages en élevage.</p>	

Mots-clés/ Key words : Fonctionnement hydrodynamique, hydrologie, échanges mer-lagune, Temps de renouvellement, surcote

Comment citer ce document :

Fiandrino A., Bellamy E. (2022). Etude de l'impact des barrages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate. Rapport de contrat « CONNECT LEUCATE », 49 p.

Disponibilité des données de la recherche : Disponibles sur demande

DOI :

Commanditaire du rapport : DML 66	
Nom / référence du contrat : Plan Littoral 21 – Action 9 BOP 132 du 10/04/2020 <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire NON <input type="checkbox"/> Rapport définitif : OUI	
Projets dans lesquels ce rapport s’inscrit (programme européen, campagne, etc.) : Le projet CONNECT-LEUCATE s’inscrit dans le cadre du projet multi financement CONNECT-MED porté par l’Ifremer au sein de l’UMR MARBEC	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
FIANDRINO Annie	Annie.Fiandrino@ifremer.fr
BELLAMY Elise	Elise.Bellamy@ifremer.fr
Encadrement(s) :	
Destinataire : DM 66	
Validé par : Thierry LAUGIER, responsable de RBE/Unité MARBEC	

Table des matières

1	Contexte et objectifs	6
2	Matériels et méthodes	8
2.1	Dynamique des échanges entre la mer et les lagunes	8
2.1.1	Principaux forçages de la dynamique des échanges.....	8
2.1.2	Impact des graus sur la propagation de la marée	9
2.1.3	La lagune de Salses-Leucate en quelques chiffres	10
2.2	Jeux de données disponibles	11
2.2.1	Données météorologiques.....	11
2.2.2	Données hydrologiques et hydrodynamiques.....	11
2.3	Caractérisation des conditions hydro-climatiques enregistrées sur la période d’avril 2020 à juillet 2021	13
2.4	Impact des portes sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate	13
2.4.1	Périodes échantillonnées en présence et en l’absence des portes.....	13
2.4.2	Indicateurs hydrodynamiques	14
2.4.3	Traitement statistique des données	16
2.5	Impact des portes sur les activités des cultures marines.....	16
3	Résultats	17
3.1	Caractérisation des conditions hydro-climatiques enregistrées sur la période d’avril 2020 à mars 2021	17
3.1.1	Typologie des vents	17
3.1.2	Caractérisation des événements de vent établi sur la période d’étude.....	18
3.1.3	Précipitations	20
3.2	Fonctionnement des échanges entre la mer et la lagune de Salses-Leucate.....	20
3.2.1	Caractérisation de l’onde de marée en mer et dans le grau de Port-Leucate.....	21
3.2.2	Caractérisation de l’onde de marée dans la lagune de Salses-Leucate	23
3.2.3	Variations de la hauteur d’eau « côté mer » en lien avec les variations de la pression atmosphérique	26
3.2.4	Variations des hauteurs d’eau « côté lagune » en lien avec les variations de la pression atmosphérique.....	29
3.3	Quantification des échanges avec la mer via le grau de Port-Leucate.....	34
3.3.1	Débits dans le grau de Port-Leucate	34
3.3.2	Volumes échangés dans le grau de Port-Leucate	36
3.4	Salinité et température	39
3.5	Impact sur les cultures marines.....	40
3.5.1	<i>Dinophysis</i> et contaminations des coquillages par les toxines lipophiles (DSP) dans la lagune de Salses-Leucate.....	41
3.5.2	Quelques informations complémentaires concernant <i>Dinophysis</i>	42
3.5.3	Contaminations microbiologiques (<i>E. coli</i>)	42
3.5.4	Impact potentiel de la présence des portes sur ces épisodes de contamination	42
4	Conclusions	44
5	Références bibliographiques	47

1 Contexte et objectifs

En 1965, la création des ports du Barcarès (Pyrénées-Orientales) et de Leucate (Aude) a conduit à ouvrir artificiellement deux accès permanents entre la lagune de Salses-Leucate et la mer afin de permettre le passage des navires de plaisance.

A compter de 1975, les pêcheurs professionnels ont mis en place chaque année, d'octobre à décembre, des portes métalliques sur ces graus afin d'empêcher le départ des poissons vers la mer lors de l'avalaison et en faciliter la capture dans la lagune. En 2019, les Préfets de l'Aude et des Pyrénées-Orientales ont acté de la nécessité de supprimer l'installation de ces barrages temporaires à compter de mi-2021. Une période de transition de deux ans est prévue afin de conduire les études scientifiques qui permettront de fonder les mesures de régulation sur des bases objectives.

Dans le cadre de la convention de recherche et développement partagée relative à mise en œuvre du plan Littoral 21, l'Ifremer est maître d'ouvrage de différentes actions dont une (Action 2.1) portant sur l'étude des impacts des barrages sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate et les effets à attendre après leur suppression.

Les lagunes méditerranéennes sont des systèmes semi-fermés dont le fonctionnement hydrodynamique résulte de la dynamique des échanges avec la mer (on peut parler d'efficacité des échanges) et la circulation des masses d'eau au sein de l'écosystème (on peut parler d'efficacité du mélange). Dans ce contexte, les échanges mer-lagune jouent un rôle prépondérant dans la mesure où les entrées d'eaux marines contribuent à renouveler la masse d'eau lagunaire et les sorties d'eaux saumâtres constituent la seule voie d'exportation de matière (contaminants ou nutriments en excès) vers le milieu marin.

Les échanges d'eau entre la mer et une lagune sont la conséquence des différences de niveaux d'eau qui existent de part et d'autre de son / ses grau(s). Plus cette différence de niveau est grande et plus les volumes échangés sont importants, l'échange se faisant, la plupart du temps, du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas.

Les graus agissent comme des filtres qui, par le frottement du courant sur le fond, freinent les mouvements d'eau et limitent les échanges mer-lagune. Au passage des graus, qui constituent des étranglements plus ou moins importants selon leur section d'échange et leur longueur, l'onde de marée perd plus ou moins d'énergie et le signal de hauteur dans la lagune est amorti et déphasé comparativement au signal de hauteur d'eau en mer.

Dans ce contexte, la présente sous-action a pour objectif de préciser l'impact des portes, mises en place temporairement sur les graus de Port-Leucate et Port-Barcarès, sur le fonctionnement hydrodynamique de l'étang de Salses-Leucate et ce sous différentes conditions météorologiques.

Afin d'évaluer l'impact des portes sur 1) les volumes d'eau échangés entre la mer et la lagune de Salses-Leucate ; 2) les éventuelles surcotes dans la lagune lors d'évènements hydro-climatiques spécifiques, des mesures haute fréquence de hauteur d'eau dans la lagune et de part et d'autre des portes dans le grau de Port-Leucate devaient être acquises pendant une année (avril 2020 à mars 2021). En complément, des mesures de débit dans le grau de Port-Leucate devaient être réalisées durant deux campagnes d'un mois afin de couvrir des périodes en l'absence (mai 2020)

et en présence des portes (octobre 2020). Ces campagnes d'acquisition de données ont été confiées au bureau d'études HYDRIAD Eau et Environnement.

La crise sanitaire qui a débuté en mars 2020 nous a contraints à revoir entièrement la stratégie d'échantillonnage. L'acquisition de données de hauteur d'eau a dû être décalée et réduite à dix mois, de septembre 2020 à juillet 2021. Concernant les données de débit dans le grau de Port-Leucate, Hydriad Eau et Environnement a proposé, sans modification du budget de la sous-traitance, de réaliser une campagne unique de quatre mois sur une période encadrant la mise en place des portes, de fin septembre 2020 à fin janvier 2021.

2 Matériels et méthodes

2.1 Dynamique des échanges entre la mer et les lagunes

Les principaux moteurs de la dynamique des masses d'eau en milieu lagunaire sont les échanges avec la mer et la circulation des masses d'eau à l'intérieur de la lagune induite par le vent. Ces processus physiques sont à la base du fonctionnement des écosystèmes lagunaires puisqu'ils gouvernent le transport et le mélange de toute substance dissoute ou particulaire, conservative ou non, contenue dans ces masses d'eau.

La circulation des masses d'eau au sein de l'écosystème est gouvernée par le vent et contrainte par la topographie (sinuosité du contour, marche bathymétrique...), le mélange des eaux lagunaires saumâtres et des eaux douces apportées par les bassins versants et les précipitations directes sur la lagune.

Les échanges d'eau entre la mer et une lagune sont la conséquence des différences de niveaux d'eau qui existent de part et d'autre de son / ses grau(s), ces derniers jouent le rôle de frein et limitent l'efficacité de ces échanges (Mehta, 1978 ; Di Lorenzo, 1988).

2.1.1 Principaux forçages de la dynamique des échanges

Les variations de niveau côté mer sont principalement dues aux effets conjugués de la marée, de la pression atmosphérique et du vent. Le vent, les apports d'eau douce et l'évaporation font varier les niveaux d'eau dans la lagune. Les volumes journaliers entrants et sortants sont donc la résultante de l'intégration dans le temps de l'ensemble de ces processus qui présentent des temps caractéristiques très différents et fortement variables, car en lien avec la variabilité des conditions environnementales (hydrologie / météorologie).

2.1.1.1 La marée

Le caractère permanent de la marée fait que ce forçage joue un rôle essentiel dans les échanges d'eau entre la mer et la lagune. Ce phénomène correspond aux variations du niveau de la mer dues à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. La marée peut être considérée comme la somme de marées élémentaires strictement périodiques appelées composantes harmoniques. La courbe de marée d'une composante est une sinusoïde dont l'amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d'observation. Les composantes harmoniques sont réparties en quatre groupes (SHOM) :

- les ondes de longues périodes : bimensuelles, mensuelles, semestrielles, annuelles (Ondes Sa)
- les ondes diurnes dont la période est voisine de 24 heures (Ondes K1 ; O1)
- les ondes semi-diurnes dont la période est voisine de 12 heures (Ondes M2 ; S2)
- les ondes supérieures et composées de périodes quart-diurne, tiers-diurne...

En Méditerranée, la marée est semi-diurne à inégalité diurne : les harmoniques diurnes et semi-diurnes sont du même ordre de grandeur, toutefois les harmoniques semi-diurnes sont légèrement plus importantes. Il y a donc deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les amplitudes des deux pleines mers (ou deux basses mers) successives sont différentes. L'amplitude moyenne de la marée est de 20 cm environ (toutefois elle peut atteindre jusqu'à 1 m dans le Golfe de Gabès ou en mer Adriatique, NASA). Cette faible amplitude est due à l'atténuation de la marée lorsque les eaux de l'Atlantique entrent par le détroit de Gibraltar en mer Méditerranée.

2.1.1.2 La pression atmosphérique

La pression atmosphérique, qui traduit le poids que l'air exerce sur le monde qui nous entoure, varie en permanence sous l'action de nombreuses contraintes et selon des lois complexes. Une hausse de la pression que l'air exerce sur la mer s'accompagne donc d'une baisse du niveau en mer (décote barométrique) tandis qu'une baisse de pression de 1 millibar occasionne une augmentation du niveau de la mer (surcote barométrique) de 1 centimètre : c'est le phénomène du baromètre inversé [+/-1mBar = -/+1cm].

Aux oscillations régulières dues à la marée se superpose donc le forçage induit par les variations irrégulières de la pression atmosphérique.

2.1.1.3 Le vent

Même si l'effet du vent sur les lagunes est irrégulier, son rôle est déterminant dans la dynamique des masses d'eau à l'intérieur des étangs car il permet la mise en mouvement des masses d'eaux par l'apparition de courants. Le vent, phénomène barocline¹, agit sur un plan d'eau (lagune en l'occurrence) en poussant l'eau superficielle dans la direction du vent : il s'ensuit alors un basculement du plan d'eau autour de son niveau moyen. En fonction de sa direction, de sa vitesse, de la longueur du fetch² et de la durée du coup de vent, la surcote ou la décote dynamique ne sera pas la même (Burtchaell, 2000). D'autre part, lorsque le vent s'arrête, le basculement s'inverse progressivement : c'est le phénomène de seiche.

2.1.2 Impact des graus sur la propagation de la marée

2.1.2.1 Impact sur les hauteurs d'eau

Au passage des graus, qui constituent des étranglements plus ou moins importants, la marée subit un phénomène d'amortissement dû à l'étroitesse de la passe. En effet, l'onde de marée perd plus ou moins d'énergie en fonction de la section du grau qu'elle traverse. On observe alors une différence d'amplitude entre la mer et la lagune et un déphasage de la marée dans la lagune.

Cet amortissement décrit par DiLorenzo (1988) est fonction d'une période caractéristique du système, appelée période d'Helmholtz propre à chaque grau, telle que :

$$T_h = \frac{2\pi}{F_h} \quad (\text{exprimé en s}) \text{ et } F_h \text{ fréquence d'Helmholtz égale à } F_h = \sqrt{\frac{gA_c}{L A_s}}$$

avec :

g : accélération de la pesanteur (9.81 ms⁻²)

L : longueur du grau (en m)

Ac : section du grau(en m²).

As : surface de l'étang (en m²)

Toute onde élémentaire pour laquelle la période T est inférieure à 10 T_h sera atténuée et déphasée par le grau. L'atténuation des ondes de marée (α) est définie par le rapport du marnage dans la lagune (Marn_{lag}) sur le marnage en mer (Marn_{mer}):

$$\alpha = \frac{Marn_{lag}}{Marn_{mer}}$$

¹ Barocline : dont l'effet n'est pas uniforme sur la verticale.

² Fetch : Distance sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent sans rencontrer d'obstacle. Plus cette distance est faible et moins l'impact du vent est important.

2.1.2.2 Impact sur les courants

Une onde de marée, qui en l'absence d'obstacle prend la forme d'une onde progressive, est telle que le courant s'inverse durant les phases de flot et de jusant et le courant de flot (resp. de jusant) atteint son maximum au moment de la pleine-mer (resp. la basse-mer). En présence d'une côte, l'onde de marée donne naissance à une onde réfléchie qui, en interférant avec l'onde incidente, génère une onde stationnaire. Dans ce cas, le courant ne s'inverse pas durant les phases de flot mais s'annule à la pleine-mer et la basse-mer. En présence d'un obstacle (tel qu'un grau), on observe généralement une situation intermédiaire avec la superposition d'ondes stationnaires et progressives et un déphasage entre les signaux de courant et de hauteur d'eau. Le courant s'inverse durant les phases de flots de jusant et le courant de flot est maximum entre le mi-montant et la pleine mer c'est-à-dire qu'il est en avance de phase par rapport au maximum de la hauteur d'eau.

2.1.3 La lagune de Salses-Leucate en quelques chiffres

La lagune de Salses-Leucate, d'une superficie de 5 400 ha pour un volume d'environ 90.10^6 m^3 (Rivage, 2015) communique avec la mer par trois graus :

- le grau de Leucate (dit grau des conchyliculteurs). Autrefois naturel, c'est le plus ancien et le plus petit des graus aménagés de la lagune (Tableau 1). Il est sujet à des envasements récurrents et abrite les installations conchyloles.
- le grau de Port-Leucate est le plus long et le plus large (Tableau 1). Entièrement artificiel, d'orientation NE-SO, il a été creusé en 1968 lors des travaux d'aménagement du port et des marinas de Port-Leucate
- le grau de Port-Barcarès (grau Saint-Ange), situé à l'extrémité Sud de la lagune, a été aménagé en 1965 sur le tracé d'un ancien grau naturel. Ce grau est relativement long mais sa section est beaucoup plus étroite que celle de Port-Leucate (Tableau 1). Suivant un tracé en lignes brisées, il abrite divers bassins à usage de plaisance ainsi qu'un port côté mer, destiné aux pêcheurs professionnels.

Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques des trois graus de la lagune de Salses-Leucate (Rivage, 2015 ; Cesmat, 2002). Les valeurs de la période de Helmholtz ont été ajoutées à titre indicatif (cf. §.2.1.2.1).

	Longueur (m)	Largeur (m)	Profondeur (m)	Section (m ²)	Th (en h)
Grau de la Corrège (ou de Port-Leucate)	3 000	50	4.0	138	19
Grau Saint-Ange (ou de Port-Barcarès)	2 000	30	2.5	80	20
Grau des conchyliculteurs (ou de Leucate)	500	25	0.5 – 1.5	30	16

L'action combinée de ces trois graus, de géométrie très différente, sur le fonctionnement des échanges avec la mer est complexe et une étude antérieure (BCEOM, 1984), basée sur des mesures de champ de courant réalisées simultanément dans les graus de Port-Leucate et Port-Barcarès entre juillet et août 1983, a abouti aux conclusions suivantes :

- le grau de Leucate joue un rôle mineur dans les échanges entre la mer et la lagune,
- les volumes échangés à travers le grau de Port-Leucate sont cinq fois plus importants que les échanges à Port-Barcarès (lorsqu'on néglige le grau de Leucate),
- il existe, dans les deux graus, une dissymétrie entre les phases de jusant et de flot, en faveur du jusant, et celle-ci est plus marquée dans le grau de Port-Leucate. En intégrant les signaux

dans le temps (sur les 2 mois d'étude), le grau de Port-Leucate favoriserait les exports d'eau (+ 29.10^6 m^3 / - 35.10^6 m^3 soit un volume net sortant de - 6.10^6 m^3) alors que le grau de Port-Barcarès favoriserait les imports (+ 9.10^6 m^3 / - 5.10^6 m^3 soit un volume net entrant de + 4.10^6 m^3).

- il existe un déphasage dans le basculement des courants entre les deux graus. Le courant s'inverse d'abord dans le grau de Port-Barcarès puis en moyenne une heure après dans le grau de Port-Leucate.

2.2 Jeux de données disponibles

2.2.1 Données météorologiques

La caractérisation des conditions météorologiques durant la période d'étude est basée sur les données acquises à la station Météo-France de Leucate :

- de vent (intensité, direction), à un pas de temps tri-horaire
- de pression atmosphérique, à un pas de temps tri-horaire
- de précipitation, cumul journalier.

2.2.2 Données hydrologiques et hydrodynamiques

Les données hydrologiques et hydrodynamiques ont été réalisées par le bureau d'étude HYDRIAD Eau et Environnement selon un cahier des charges établi par l'Ifremer.

2.2.2.1 Hauteurs d'eau, salinité, température

Des séries temporelles de hauteur d'eau, conductivité électrique, température ont été acquises, à un pas de temps de 5 mn, en quatre stations (Figure 1) au moyen de sondes STPS localisées :

- au niveau du port de Port Leucate (Sonde Port),
- sur la balise située à la pointe Sud de l'île Hauts fonds de la Corrège (Sonde Ile)
- sur une balise de délimitation de la zone nautique au cœur de la partie Sud de l'Etang de Salses-Leucate (en face de Port-Barcarès ; Sonde Sud) ;
- sur la table Ifremer dans la zone conchylicole de Parc Leucate (zone Nord de l'étang ; sonde Parc).



Localisation des sondes STS

Port	N 42°52.188'	E 3°02.483'
Ile	N 42°50.716'	E 3°01.300'
Sud	N 42°49.653'	E 3°00.079'
Parc	N 42°52.668'	E 3°01.590'

Localisation du courantomètre

ADCP	N 42°52.146'	E 3°02.580'
------	--------------	-------------

Figure 1 : (gauche) Localisation des stations de mesures de hauteur d'eau, salinité, température dans le grau de Port-Leucate et dans la lagune de Salses-Leucate (point rouge) et de courant dans le grau de Port-Leucate (point orange). (droite) : coordonnées géographiques des stations de mesures.

Les sondes ont été mises en place le 20 septembre 2020, lors des premières conditions de vent favorables à leur installation. Lors du déchargement des données des sondes le 12 mai 2021, le personnel d'Hydriad a constaté le vol de la sonde STPS/CTD installée à Port de Leucate. Une nouvelle sonde a été installée sur cette station le 26 mai 2021. Nous ne disposons donc pas de données de suivi à Port-Leucate entre le 2 avril et le 26 mai.

La récupération des sondes STP s'est étalée entre le 01/07/2021 et le 29/07/2021. Le Tableau 2 récapitule les périodes d'acquisition de données pour les quatre stations suivies dans le cadre de cette étude.

Tableau 2 : Récapitulatif des périodes d'acquisition de données STP aux quatre stations suivies dans le cadre de cette étude. Le nombre de données disponibles et les périodes d'interruption sont également renseignés.

Station	Date de pose	Date de relève	Période d'interruption	Nombre de données
Port	20/09/2020 13:35	29/07/2021 10:40	du 02/04/2021 11:10 au 26/05/2021 15:15	74 214
Ile	20/09/2020 12:00	29/07/2021 09:55	-	89 817
Sud	20/09/2020 12:20	01/07/2021 13:40	-	81 786
Parc	24/09/2020 13:20	04/07/2021 06:45	-	81 417

En complément les données de hauteur d'eau acquises par le SHOM à la station de Port-La-Nouvelle sur la période du 20/09/2020 au 30/07/2021, à un pas de temps de 5 mn, ont été téléchargées sur le site du SHOM³ pour caractériser l'état de référence en mer.

Les données de conductivité électrique spécifique (mS/cm à 25°C) ont été traduites en salinité à partir de la relation d'Aminot et Kérouel (2004).

2.2.2.2 Courant et débit dans le grau de Port-Leucate

Des séries temporelles de profils horizontaux de courant et de hauteur d'eau ont été acquises dans le grau de Port-Leucate à un pas de temps de 10 mn sous le pont de la D627 au moyen d'un courantomètre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Les profondeurs le long d'un transec au niveau du courantomètre ont été mesurées pour estimer la section d'échange et extrapoler les débits dans le grau.



Figure 2 : (gauche) Localisation de l'appareil ADCP en contre-bas du quai sous le pont de la D627. (droite) Structure contenant l'appareil ADCP et sa centrale d'acquisition (source des photos : Hydriad Eau et Environnement).

³ Portail internet de données du SHOM : <https://data.shom.fr/>

Le cahier des charges initial prévoyait une acquisition de données de débit dans le grau durant deux campagnes d'un mois, en l'absence (mai 2020) et en présence (octobre 2020) des portes. Sur proposition du bureau d'études Hydriad Eau et Environnement, une campagne terrain unique de quatre mois a finalement été réalisée du 29/09/2020 au 26/01/2021 (Tableau 3).

Tableau 3 : Période d'acquisition de données de débit dans le grau de Port-Leucate. Le nombre de données disponibles est également renseigné.

Station	Date de pose	Date de relève	Nombre de données
Grau - Leucate	29/09/2020 11:40	26/01/2021 12:50	17 144

2.3 Caractérisation des conditions hydro-climatiques enregistrées sur la période d'avril 2020 à juillet 2021

Les données de vent sont analysées afin de définir différentes typologies d'événements hydro-climatiques : épisodes de vent établi, épisodes pluvieux (vent de mer concomitant au passage d'une dépression atmosphérique et à de fortes précipitations).

Des typologies de vent sont recherchées à partir des données de vent acquises à une fréquence tri-horaire, sur la période de janvier 2020 à juillet 2021, en identifiant les « périodes de vent établi ». On considère que le vent est établi dans un secteur directionnel donné lorsque, durant au moins un jour, 80 % des données de direction du vent restent dans ce même secteur (Figure 3). Une période de vent établi (i) est donc définie par : sa durée (di), le secteur directionnel dans lequel le vent souffle (θ_i) et l'intensité moyenne du vent (I_{vi}) sur toute la période.

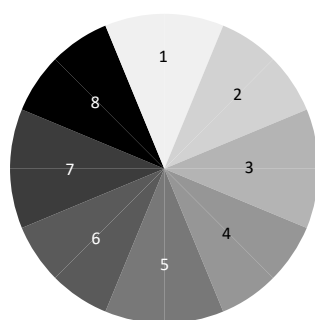


Figure 3 : Découpage du cercle des directions de vent (direction d'où vient le vent) en 8 secteurs directionnels. (à titre d'exemple : le secteur 8 est centré sur des vents de N-O (315°N), le secteur 4 est centré sur des vents de S-E (135°N).

Par suite, une classification ascendante hiérarchique (CAH) est effectuée sur les périodes de vent établi afin de mettre à jour des typologies remarquables. Les variables d'intérêt pour la CAH sont la durée des événements (di), l'intensité moyenne du vent (I_{vi}), le cosinus et le sinus de la direction moyenne du vent ($\cos \theta_i$, $\sin \theta_i$).

2.4 Impact des portes sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate

2.4.1 Périodes échantillonnées en présence et en l'absence des portes

En 2020, les portes sur le grau de Port-Leucate ont été mises en place le 5/10/2020 et déposées le 15/12/2020 (Figure 4). Le grau de Saint-Ange au Barcarès a également été équipé de portes à grille. Afin d'évaluer l'impact de la présence des portes sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate trois périodes ont été définies pour analyser les séries temporelles de hauteur d'eau :

- La période « **ss_Porte1** », d'une durée totale de 87 jours, regroupe la période du 20/09/2020 au 05/10/2020, soit 15 jours en période automnale avant la mise en place de portes et la période du 17/12/2020 au 27/02/2021, soit 72 jours en période hivernale après l'enlèvement des portes. Cette période d'une durée équivalente à la durée de mise en place des portes contient des événements météorologiques représentatifs des principales catégories de vent identifiées à la station Météo-France de Leucate (cf. §. 3.1.2).
- La période « **av_Porte** » correspond à la période automnale en présence des portes du 06/10/2020 au 16/12/2020, soit 71 jours.
- La période « **ss_Porte2** » correspond à la période du 27/02/2021 au 29/07/2021, soit 152 jours.



Figure 4 : (gauche) Structure béton et passe pouvant être fermée au moyen d'une porte amovible (en arrière-plan, sur le talus du pont, la porte en attente d'installation). (droite) Porte installée dans le grau de Port-Leucate (source des photos : Hydrriad Eau et Environnement).

Une période supplémentaire a été définie pour analyser la série temporelle de débit dans le grau de Port-Leucate :

- La période « **ss_Porte** », d'une durée totale de 46 jours, regroupe la période du 29/09/2020 au 05/10/2020, soit 5.5 jours en période automnale avant la mise en place de portes et la période du 17/12/2020 au 26/01/2021, soit 40.5 jours en période hivernale après l'enlèvement des portes.

2.4.2 Indicateurs hydrodynamiques

L'impact de la présence des portes est évalué au regard des différences engendrées sur des descripteurs pertinents du fonctionnement hydrodynamique aux échelles de temps caractéristiques des forçages.

Concernant l'impact sur la propagation de l'onde de marée dans le grau et dans la lagune de Salses-Leucate, les descripteurs retenus sont : la durée des phases de flot et de jusant, le marnage (Figure 5 - gauche), le déphasage et l'atténuation du signal de marée entre le grau de Port-Leucate et la lagune (cf. §.2.1.2.1 pour la définition).

Concernant l'impact sur les variations de hauteurs d'eau liées aux variations de la pression atmosphérique, les descripteurs retenus sont : le déphasage et l'atténuation du signal entre le grau de Port-Leucate et la lagune (cf. §.2.1.2.1 pour la définition), les niveaux d'eau moyens (η_{moy}) dans le grau de Port-Leucate et dans la lagune, les extremums de hauteur d'eau dans la lagune (Figure 5 - droite) et les durées et les amplitudes de variation de hauteur d'eau entre deux extrema successifs ($\Delta\eta$ équivalentes au marnage pour la marée).

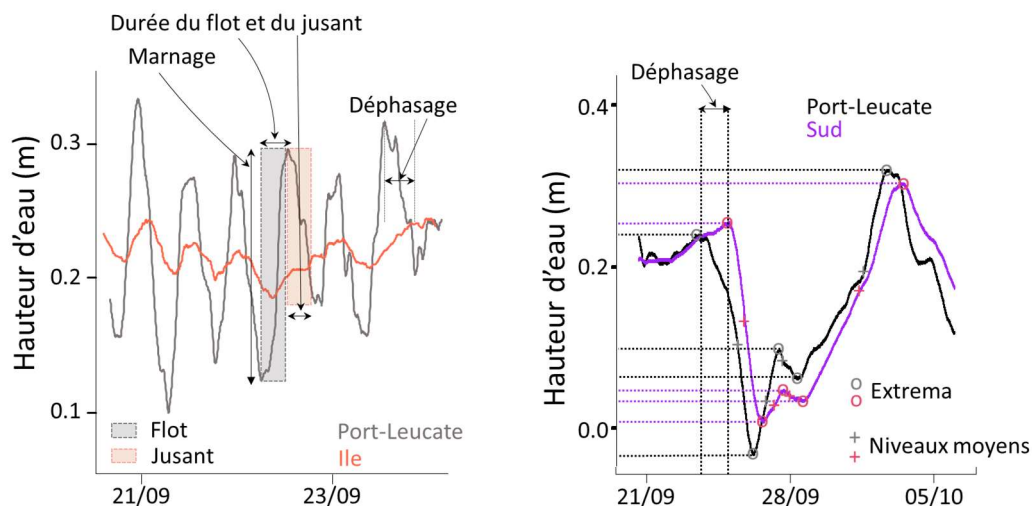


Figure 5 : (gauche) Représentation schématique des indicateurs hydrodynamiques en lien avec les variations des hauteurs induites par la marée (gauche) et par les variations de la pression atmosphérique (droite).

Concernant l'impact sur les échanges mer – lagune via le grau de Port-Leucate, les descripteurs retenus sont (Figure 6) : la durée des phases de montant et de descendant, le déphasage entre les signaux de débit et de hauteur d'eau, la durée des phases d'entrant et de sortant et les volumes entrants / sortants dans le grau durant ces phases, les bilans nets et entrées / sorties⁴ sur les deux périodes échantillonnées en débit « av_Porte » et « ss_Porte ».

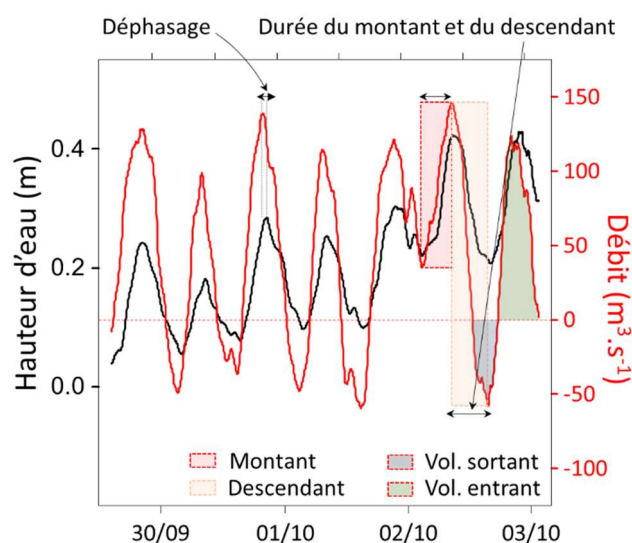


Figure 6 : Représentation schématique des indicateurs hydrodynamiques en lien avec les débits et les volumes d'eau échangés entre la lagune et la mer.

Le temps de renouvellement ou flushing time (Monsen *et al.*, 2002) est également calculé pour rendre compte de l'efficacité des échanges (Fiandrino *et al.*, 2017). Cet indicateur, que l'on peut qualifier de « global », suppose que la lagune se comporte comme un réservoir parfaitement mélangé, c'est-à-dire que tout volume infinitésimal d'eau qui entre dans la lagune est immédiatement et parfaitement mélangé avec la totalité du volume du système. Dans ce contexte le temps de renouvellement est défini comme le temps nécessaire pour renouveler la totalité du volume du système en fonction des flux échangés avec l'extérieur.

⁴ La convention de signe retenue pour les échanges entre la mer et la lagune est que les volumes entrants dans la lagune sont comptés positivement, les volumes sortants de la lagune sont comptés négativement.

L'hypothèse forte faite pour calculer le temps de renouvellement est que le volume de la lagune reste constant, c'est-à-dire qu'à chaque instant, les flux d'eau (FE) qui entrent dans le système à travers les frontières du domaine sont exactement compensés par des flux équivalents qui sortent (FS = FE). Le temps de renouvellement s'exprime alors comme :

$$TR \text{ (en jour)} = V_{Lag} \text{ (en } 10^6 \cdot m^3) / FE \text{ (en } 10^6 \cdot m^3 \cdot j^{-1})$$

Le taux de renouvellement journalier définit comme le rapport $\tau_R \text{ (en } \% \cdot j^{-1}) = 100 / TR \text{ (en jour)}$ est indépendant du volume considéré et permet de comparer les lagunes entre elles (Tableau 4).

Tableau 4 : Récapitulatif des volumes, des temps et des taux de renouvellement de lagunes méditerranéennes françaises (Fiandrino et al., 2012).

Lagune	Vol. Lag Mm ³	Tf j	τ_f %j ⁻¹
La Palme	3,1	12	8,3
Bages-Sigean	63,6	59	1,7
Thau	295	53	1,9
Ingril Sud	2,7	5	20,0
Prévost	2,7	5	20,0
Berre	900	142	0,7
Biguglia	18	90	1,1
Diana	34	27	3,7

Le temps de renouvellement des eaux de la lagune de Salses-Leucate pourra être calculé :

- à partir des mesures de débits et des volumes entrants et sortants par le grau de Port-Leucate. Dans ce cas, l'indicateur « Temps de renouvellement » ne rendra compte que de l'efficacité des échanges par ce grau,
- en considérant les variations temporelles du volume de la lagune estimées à partir des variations temporelles des hauteurs d'eau aux deux stations lagunaires « Ile » et « Sud ». En négligeant les volumes évaporés et précipités directement sur la surface de la lagune lors des événements pluvieux, les augmentations (respectivement les diminutions) du volume de la lagune peuvent alors être associées aux entrées d'eaux marines (respectivement aux sorties d'eaux lagunaires) par les trois graus. Dans ce cas, le temps de renouvellement rendra compte de l'efficacité globale des échanges entre la lagune de Salses-Leucate et la mer.

2.4.3 Traitement statistique des données

L'impact des conditions météorologiques et de la présence des portes dans les graus sera étudié à partir d'une analyse de variance (ANOVA) à plusieurs facteurs (package doBy sous R) et d'un test post-hoc de Tukey (test de la différence franchement significative).

2.5 Impact des portes sur les activités des cultures marines

Une évaluation à dire d'expert des effets de la présence des barrages sur les activités de cultures marines et sur l'écosystème de l'étang sera également réalisée. Une attention particulière sera portée aux épisodes de contamination en toxines lipophiles (produites par le genre de phytoplancton *Dinophysis*) qui sont récurrents en périodes automnales et hivernales et impactent fortement la production conchylicole dans la lagune de Salses-Leucate. L'impact vis-à-vis des contaminations microbiologiques sera également discuté.

3 Résultats

3.1 Caractérisation des conditions hydro-climatiques enregistrées sur la période d'avril 2020 à mars 2021

3.1.1 Typologie des vents

Les données de vent (intensité et direction) acquises à la station Météo-France de Leucate à un pas de temps tri-horaire sur la période du 01/01/2020 au 10/08/2021 ont permis de caractériser les typologies de vent établi. Sur cette période, plus large que la période d'étude (4505 données disponibles), cinq typologies de vent établi ont été mises à jour (Figure 7) :

- Typologie 1 : (n = 22) vent de **secteur Nord-Ouest**, d'**intensité modérée** ($5.0 \pm 0.6 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 22 évènements), de **courte durée** ($1.5 \pm 0.5 \text{ j}$)
- Typologie 2 : (n = 5) vent de **secteur Nord-Ouest**, d'**intensité forte** ($7.0 \pm 1.0 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 5 évènements), de **longue durée** ($8.0 \pm 2.8 \text{ j}$).
- Typologie 3 : (n = 26) vent de **secteur Nord-Ouest**, d'**intensité forte** ($6.9 \pm 0.9 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 26 évènements), de **courte durée** (durée moyenne $2.2 \pm 0.8 \text{ j}$)
- Typologie 4 : (n = 10) vent de **secteur Est-Sud-Est**, d'**intensité forte** ($6.6 \pm 1.9 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 10 évènements), de **courte durée** ($1.9 \pm 0.8 \text{ j}$)
- Typologie 5 : (n = 5) vent de **secteur Est-Sud-Est**, d'intensité très forte ($11.9 \pm 0.9 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 5 évènements), de **courte durée** ($2.7 \pm 0.7 \text{ j}$).

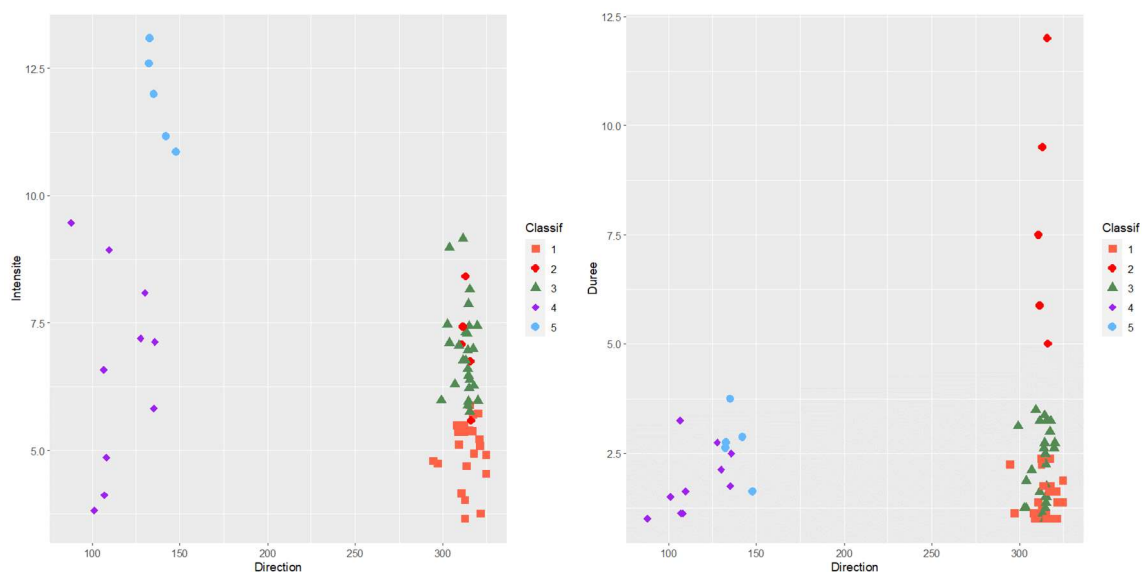


Figure 7 : Caractéristiques des vents établis sur la période du 20/09/2020 au 02/08/2021 en fonction des typologies mises à jour par la CAH. (à gauche) : Représentation, par évènement de vent établi, de l'intensité moyenne du vent (à gauche) et de la durée totale de l'évènement (à droite) en fonction de la direction du vent.

Entre ces périodes de vent établi, les périodes de vent non établi peuvent être regroupées selon trois typologies supplémentaires (Figure 8) :

- Typologie 6 : (n = 32) vent de **faible intensité** ($3.2 \pm 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 32 évènements), de **courte durée** ($1.6 \pm 1.0 \text{ j}$)
- Typologie 7 : (n = 18) vent d'intensité modérée ($4.9 \pm 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 18 évènements), de **courte durée** ($1.6 \pm 1.0 \text{ j}$)
- Typologie 8 : (n = 11) vent d'intensité faible à modérée ($3.9 \pm 0.7 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 11 évènements), de **longue durée** ($6.6 \pm 3.3 \text{ j}$).

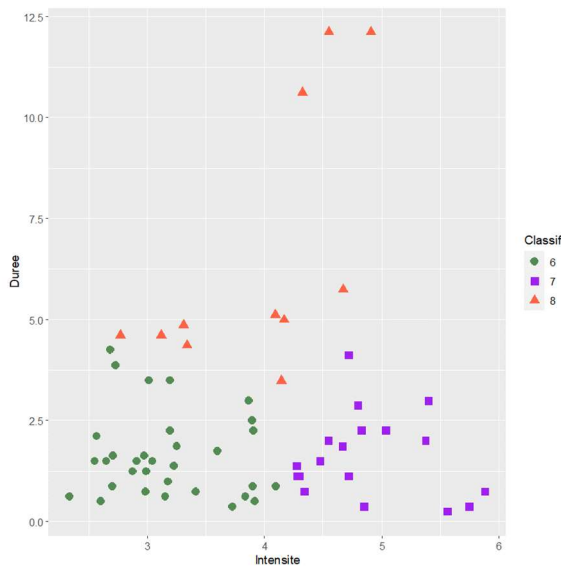


Figure 8 : Caractéristiques des vents non établis sur la période du 20/09/2020 au 02/08/2021 en fonction des typologies mises à jour par la CAH. Représentation, par évènement de vent non établi, de la durée totale de l'évènement en fonction de l'intensité moyenne du vent.

3.1.2 Caractérisation des évènements de vent établi sur la période d'étude

Sur la période du 20/09/2020 au 06/10/2020 (avant la mise en place des portes), deux évènements de vent établi de secteur Nord-Ouest, d'intensité forte et de courte durée (Typologie 3) ont été enregistrés (Tableau 5 haut).

Sur la période du 06/10/2020 au 17/12/2020 (en présence des portes), les principales typologies de vent établi (typologies 2, 3, 4 et 5) ont été enregistrées. Cinq épisodes de vent de secteur Nord-Est sont survenus durant cette période dont un évènement de forte intensité et de longue durée (type 2 – du 09/10/2020, Tableau 5 – au centre) et quatre épisodes de fortes intensités et de courte durée (type 3, – au centre). De même, cinq évènements de vent de secteur Sud-Sud-Est ont été enregistrés dont deux de très forte intensité (type 5 du 20/10/2020 et du 25/11/2020) et 3 de forte intensité (type 4, Tableau 5 – au centre).

Les épisodes enregistrés entre le 17/12/2020 (après l'enlèvement des portes) et le 03/04/2021 (dernière relève de données à la station de Port-Leucate avant la disparition de la sonde) sont regroupés dans le Tableau 5 – en bas).

Au total, 68 épisodes de vent établi sont survenus sur la période du 20/09/2020 au 02/08/2021 pour une durée cumulée de 163.25 jours, soit plus de 50% du temps.

Pour la suite de l'analyse, les huit typologies de vent sont regroupées selon trois catégories :

- les vents de secteur Nord-Ouest, de forte intensité (Typologies 2 et 3)
- les vents de secteur Sud-Est, de forte intensité (Typologies 4 et 5)
- les autres typologies (1, 6, 7 et 8) constituent la catégorie « Autres vents ».

Tableau 5 : Caractérisation des épisodes de vent établi (uniquement les typologies 2, 3, 4 et 5) sur les périodes (en haut) : du 20/09/2020 au 06/10/2020 (avant la mise en place des portes) ; (au milieu) : du 06/10/2020 au 17/12/2020 (en présence des portes) ; (en bas) : après le 17/12/2020 (après l'enlèvement des portes).

Date début	Date fin	Intensité (m.s ⁻¹)	Direction (°N)	Durée (jours)	Type
24/09/2020 18:00	26/09/2020 15:00	9.0	304	1.9	3
26/09/2020 18:00	29/09/2020 03:00	7.3	313	2.4	3

Date début	Date fin	Intensité (m.s ⁻¹)	Direction (°N)	Durée (jours)	Type
09/10/2020 21:00	17/10/2020 09:00	7.1	311	7.5	2
20/10/2020 06:00	23/10/2020 00:00	13.1	133	2.8	5
06/11/2020 00:00	07/11/2020 15:00	8.9	110	1.6	4
13/11/2020 00:00	15/11/2020 12:00	7.1	136	2.5	4
18/11/2020 21:00	21/11/2020 12:00	7.5	320	2.6	3
25/11/2020 00:00	27/11/2020 15:00	12.6	133	2.6	5
27/11/2020 18:00	28/11/2020 18:00	9.5	88	1.0	4
30/11/2020 21:00	03/12/2020 12:00	7.3	314	2.6	3
08/12/2020 03:00	10/12/2020 06:00	6.3	307	2.1	3
11/12/2020 18:00	13/12/2020 09:00	6.8	311	1.6	3

Date début	Date fin	Intensité (m.s ⁻¹)	Direction (°N)	Durée (jours)	Type
24/12/2020 00:00	27/12/2020 06:00	9.2	311	3.3	3
27/12/2020 21:00	31/12/2020 00:00	6.0	299	3.1	3
31/12/2020 21:00	04/01/2021 09:00	7.1	309	3.5	3
04/01/2021 21:00	16/01/2021 21:00	6.7	316	12.0	2
30/01/2021 12:00	31/01/2021 18:00	7.1	304	1.3	3
01/02/2021 03:00	02/02/2021 09:00	7.5	303	1.3	3
14/02/2021 12:00	16/02/2021 03:00	10.9	148	1.6	5
20/02/2021 00:00	23/02/2021 18:00	12.0	135	3.8	5
23/02/2021 21:00	26/02/2021 00:00	8.1	130	2.1	4
26/02/2021 18:00	27/02/2021 18:00	7.0	314	1.0	3
02/03/2021 00:00	03/03/2021 03:00	4.9	108	1.1	4
07/03/2021 18:00	10/03/2021 12:00	6.0	320	2.8	3
13/03/2021 21:00	23/03/2021 09:00	8.4	313	9.5	2
29/03/2021 03:00	30/03/2021 15:00	3.8	101	1.5	4
31/03/2021 12:00	01/04/2021 15:00	4.1	107	1.1	4
03/04/2021 03:00	04/04/2021 12:00	7.4	315	1.4	3
04/04/2021 21:00	07/04/2021 21:00	7.0	317	3.0	3
08/04/2021 15:00	11/04/2021 12:00	11.2	142	2.9	5
11/04/2021 15:00	13/04/2021 21:00	6.2	315	2.3	3
16/04/2021 03:00	19/04/2021 09:00	6.3	318	3.3	3
20/04/2021 12:00	22/04/2021 06:00	5.8	135	1.8	4
23/04/2021 12:00	26/04/2021 06:00	7.2	128	2.8	4
06/05/2021 18:00	07/05/2021 21:00	6.8	313	1.1	3
16/05/2021 12:00	18/05/2021 06:00	6.4	315	1.8	3
18/05/2021 21:00	20/05/2021 09:00	6.5	315	1.5	3
31/05/2021 12:00	03/06/2021 18:00	6.6	106	3.3	4
05/06/2021 15:00	10/06/2021 15:00	5.6	316	5.0	2
22/06/2021 18:00	26/06/2021 03:00	5.9	314	3.4	3
28/06/2021 15:00	01/07/2021 03:00	6.0	315	2.5	3
07/07/2021 18:00	09/07/2021 00:00	7.9	315	1.3	3
12/07/2021 00:00	13/07/2021 12:00	8.2	315	1.5	3
13/07/2021 15:00	19/07/2021 12:00	7.4	312	5.9	2
23/07/2021 21:00	27/07/2021 03:00	5.8	315	3.3	3
30/07/2021 15:00	02/08/2021 09:00	6.6	314	2.8	3

3.1.3 Précipitations

En 2020, les précipitations annuelles à la station Météo-France de Leucate ont été excédentaires (+25% comparativement à la moyenne sur les dix dernières années : 543 mm en 2020 contre 434 mm sur la période 2010-2019). Ces cumuls excédentaires s'expliquent notamment par plusieurs épisodes méditerranéens intenses qui ont touché le littoral en début d'année. En avril, de fortes pluies orageuses ont conduit à des cumuls de précipitations de 124 mm (Figure 9 – croix rouges). Le mois d'octobre 2020, à l'inverse, a été sec avec un cumul mensuel de 19.3 mm.

De même, les sept premiers mois de l'année 2021 ont été particulièrement secs (Figure 9 – ronds verts) avec un cumul de précipitations de 129.6 mm, soit un déficit de près de -34% comparativement à la période 2010-2019.

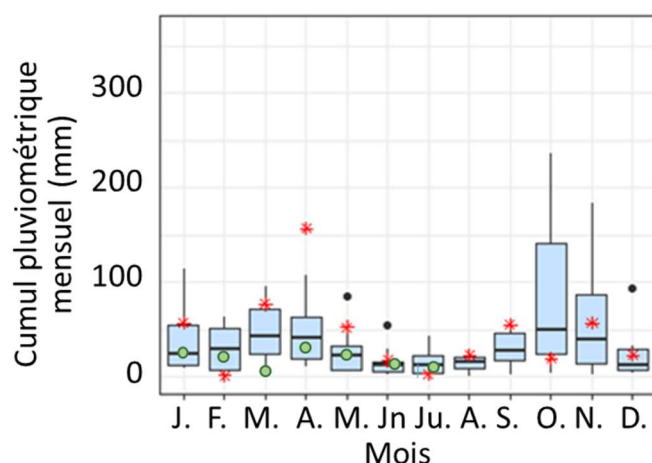


Figure 9 : Distributions des cumuls de précipitation mensuels en mm à la station Météo-France de Leucate de 2010 à 2019. Les croix rouges représentent les cumuls mensuels de l'année 2020, les ronds verts représentent les cumuls mensuels de l'année 2021.

Sur la période d'étude, un seul évènement pluvieux dépassant 40 mm de pluie en 48h été enregistré, avec 46.9 mm précipités entre les 27 et 28 novembre 2020.

Deux autres épisodes pluvieux ont dépassé le seuil de 20 mm : un cumul de 34.8 mm a été enregistré sur 6 jours entre le 21 et le 26 septembre 2020 ; un cumul de 28 mm a été enregistré sur 7 jours entre le 25 avril et le 1^{er} mai 2021.

3.2 Fonctionnement des échanges entre la mer et la lagune de Salses-Leucate

Les variations de hauteur d'eau en mer et dans les lagunes sont la résultante de trois principaux forçages : la marée, les variations de la pression atmosphérique, le vent. Le signal de hauteur d'eau mesuré à Port-Leucate (Figure 10) illustre les effets combinés de ces trois forçages.

Un lissage (moyenne glissante) sur une heure permet de filtrer les variations très haute fréquence dues notamment aux vagues et met à jour le signal de marée (courbe rouge - Figure 10).

Un lissage sur 24 heures permet de filtrer les ondes de marée pour ne garder que les variations plus basse fréquence dues aux variations de la pression atmosphérique et au vent (courbe bleue - Figure 10).

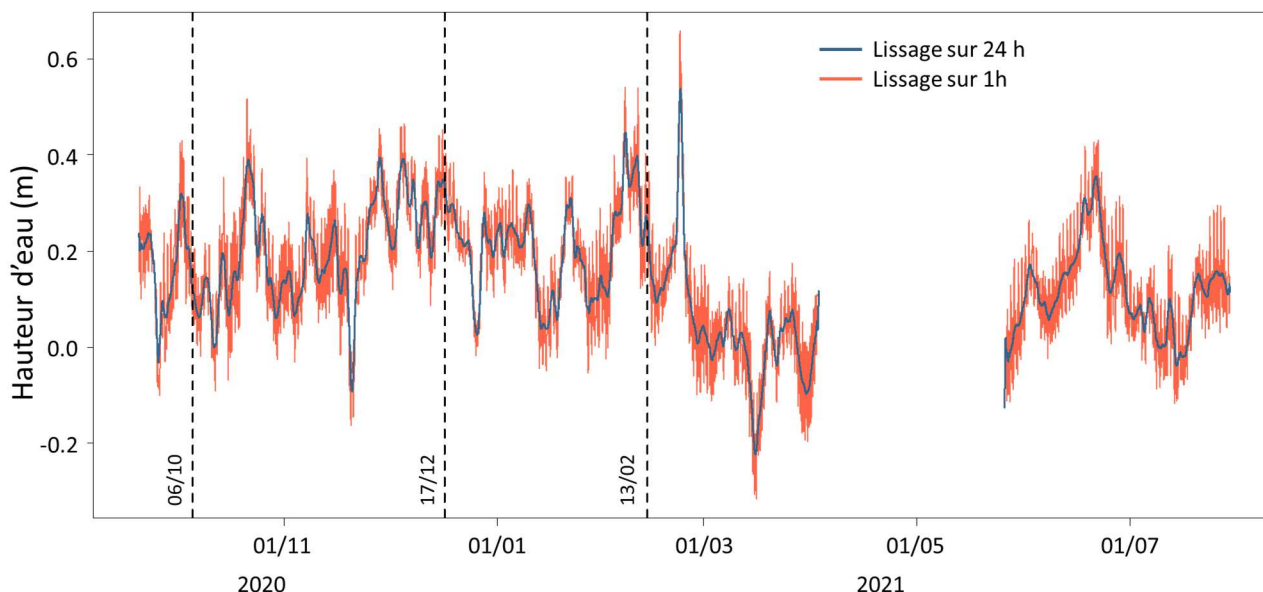


Figure 10 : Evolution temporelle de la hauteur d'eau mesurée à la station de Port-Leucate sur les 3 périodes (avant, pendant et après la mise en place du barrage). Un lissage des données sur 1 heure (courbe rouge) a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence (vagues notamment). Un lissage des données sur 24 heures (courbe bleue) a été fait pour filtrer les variations dues à la marée.

3.2.1 Caractérisation de l'onde de marée en mer et dans le grau de Port-Leucate

3.2.1.1 Fonctionnement général

Les signaux de hauteur d'eau à Port-La-Nouvelle et Port-Leucate mettent en évidence une dissymétrie entre la durée du flot et du jusant, en faveur du jusant (Figure 11 - gauche). Ce phénomène connu (Voineson et Jan, 2013) est lié à la propagation de la marée en eaux profondes : le flot est plus rapide que le jusant, freiné par les faibles profondeurs.

A Port-Leucate la durée du flot est de $5h16 \pm 1h45$ et celle du jusant de $6h25 \pm 2h02$. A Port-La-Nouvelle la durée du flot est de $5h08 \pm 1h49$ et celle du jusant est de $6h10 \pm 2h02$.

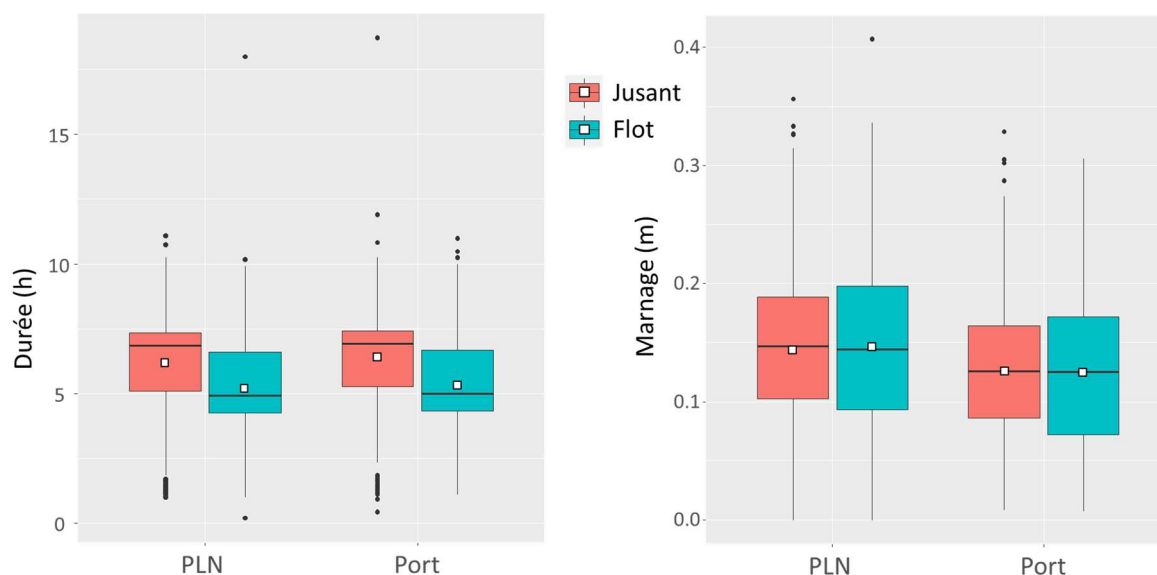


Figure 11 : Distributions des durées (à gauche) et des marnages (à droite) des phases de flot et de jusant aux stations de Port-La-Nouvelle (PLN, données SHOM) et Port-Leucate (Port, suivie dans le cadre de cette étude).

La période de la marée est de $23h24 \pm 3h48$ à Port-Leucate et de $22h38 \pm 4h11$ à Port-La-Nouvelle. On observe un retard de phase de $0h10 \pm 0h54$ entre les signaux à Port-Leucate et Port-La-Nouvelle.

Le marnage à Port-Leucate est de 12.6 ± 6.1 cm contre 14.6 ± 6.7 cm à Port-La-Nouvelle (Figure 11 - droite). L'atténuation de l'onde de marée entre Port-La-Nouvelle et Port-Leucate est de $85.3\% \pm 36.5\%$.

3.2.1.2 Impact du vent sur la propagation de la marée dans le grau de Port-Leucate

La décomposition du jeu de données en fonction des conditions météorologiques permet de préciser l'impact du vent sur la propagation de l'onde de marée dans le grau de Port-Leucate. Aucun impact significatif n'est identifié via l'analyse statistique des données (cf. §.2.4.3).

Toutefois l'analyse de la corrélation entre les marnages à Port-Leucate et Port-La-Nouvelle ($a = 0.84$, $R^2 = 0.96$, $n = 1009$ – courbe bleue sur la Figure 12 – gauche) fait apparaître deux types de relation entre ces signaux qui peuvent être en partie expliqués par les conditions de vent. Les vents forts de secteur SE (Typologies 4 et 5) ont tendance à favoriser la propagation de l'onde dans le grau et par conséquent à réduire l'atténuation ($a=0.90$, $R^2=0.98$, $n = 100$ – courbe bleue sur la Figure 12 - droite). A l'inverse, les forts vents de secteur NO (Typologies 2 et 3) auraient tendance à s'opposer à la propagation de la marée et augmenter l'atténuation de l'onde de marée entre Port-La-Nouvelle et Port-Leucate ($a= 0.81$, $R^2 = 0.97$, $n = 316$ – courbe verte sur la Figure 12).

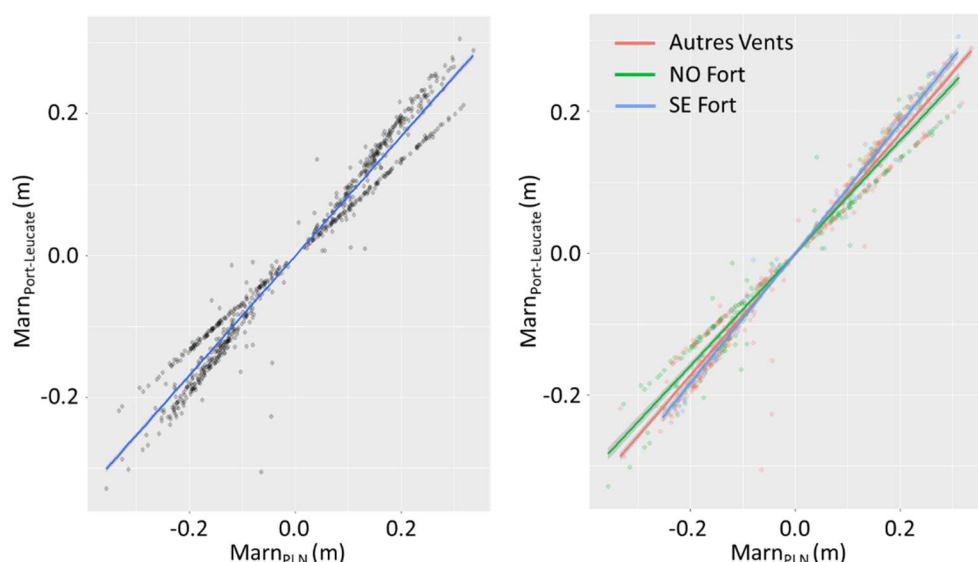


Figure 12 : relation entre les marnages mesurés à Port-La-Nouvelle et Port-Leucate. Les droites représentent la régression estimée à partir des mesures (points). Les enveloppes représentent les intervalles de confiance à 0.95. (à gauche) : jeu de données complet ; (à droite) : la distinction est faite sur les typologies de vent établi (NO – Fort correspond aux typologies 2 et 3 ; SE Fort regroupe les typologies 4 et 5 ; les quatre autres typologies sont regroupées dans « Autres Vents »).

3.2.1.3 Impact de la présence des portes sur la propagation de la marée dans le grau de Port-Leucate

La décomposition du jeu de données en distinguant les périodes en présence et en absence des portes permet de préciser l'impact des portes sur la propagation de l'onde de marée dans le grau de Port-Leucate. Aucun impact significatif n'est identifié via l'analyse statistique des données.

A RETENIR

- ✓ Les signaux de marée à Port-La-Nouvelle et Port-Leucate présentent une dissymétrie entre la durée du flot et du jusant, en faveur du jusant. Ce phénomène connu est lié à la propagation de la marée en eaux profondes : le flot est plus rapide que le jusant qui est freiné par les faibles profondeurs.
- ✓ L'atténuation de l'onde de marée est de l'ordre 80% entre Port-Leucate et Port-La-Nouvelle.
- ✓ L'impact du vent sur la propagation de l'onde de marée est quantifiable : les forts vents de secteur NO ont tendance à s'opposer à la propagation de l'onde de marée et à augmenter l'atténuation du signal de hauteur d'eau entre Port-Leucate et Port-La-Nouvelle ; les vents forts de secteur SE ont tendance à favoriser cette propagation et à diminuer cette atténuation.
- ✓ Pas d'impact quantifiable de la présence des portes sur la propagation du signal de marée dans le grau de Port-Leucate.
- ✓ Globalement, le signal de marée mesuré dans le grau de Port-Leucate est peu différent de celui de Port-la-Nouvelle, la propagation de la marée est donc peu perturbée par la partie aval du grau de Port-Leucate.

3.2.2 Caractérisation de l'onde de marée dans la lagune de Salses-Leucate

3.2.2.1 Fonctionnement général

Le passage des graus impacte fortement la propagation du signal de marée à l'intérieur de la lagune. La dissymétrie entre les phases de flot et de jusant n'est plus observable dans la lagune et les durées de ces deux phases présentent une variabilité beaucoup plus importante qu'en mer (Figure 13 – gauche).

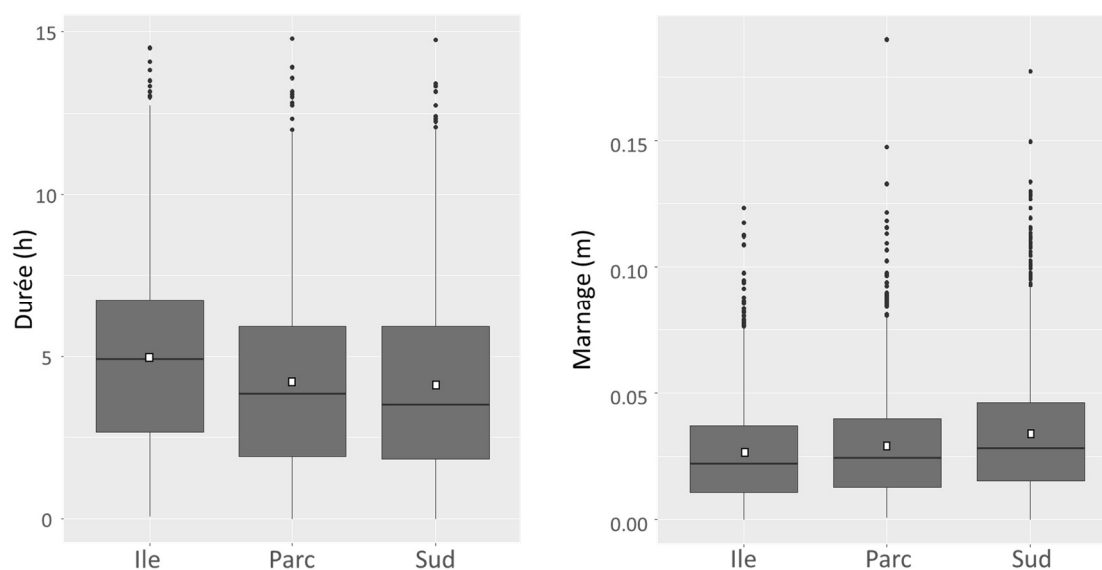


Figure 13 : Distributions des durées (à gauche) et des marnages (à droite) des phases de flot et de jusant aux stations lagunaires (suivies dans le cadre de cette étude).

Les durées moyennes des phases de flot et de jusant aux stations « Ile », « Sud » et « Parc » sont respectivement de $4h58 \pm 2h41$; $4h06 \pm 2h38$; $4h14 \pm 2h36$. Ces durées sont plus élevées à la station « Ile » (différence statistiquement significative) comparativement aux deux autres stations lagunaires (« Sud » et « Parc ») pour lesquelles aucune différence significative n'est observable.

Des déphasages sont observables entre les extrema de marée mesurés à Port-Leucate et aux stations lagunaires « Ile », « Sud » et « Parc ». Comparativement au signal dans le grau de Port-

Leucate, l'onde de marée dans la lagune est en retard de phase de $1h11 \pm 3h02$ (station « Ile ») ; $1h02 \pm 3h13$ (station « Sud ») ; $0h56 \pm 3h12$ (station « Parc »).

Les marnages moyens aux stations « Ile », « Sud » et « Parc » sont respectivement de 2.6 ± 2.0 cm ; 3.4 ± 2.4 cm ; 2.9 ± 2.1 cm. Ces marnages sont plus importants à la station « Sud » (différence statistiquement significative) comparativement aux deux autres stations lagunaires (« Ile » et « Parc ») pour lesquelles aucune différence significative n'est observable.

Le passage des graus impacte donc fortement l'atténuation de l'onde de marée entre Port-Leucate et la lagune. Cette atténuation présente une forte variabilité avec des plages de variation, aux stations « Ile », « Sud » et « Parc » respectivement égales à $30.4 \pm 60.5\%$; $37.5 \pm 56.5\%$; $30.7 \pm 40.6\%$. Du fait de cette variabilité importante, aucune différence significative entre les stations n'est identifiable sur ces deux descripteurs.

3.2.2.2 Impact du vent sur la propagation de la marée dans la lagune

La décomposition du jeu de données en fonction des conditions météorologiques permet de préciser l'impact du vent sur la propagation de l'onde de marée dans la lagune.

L'impact du vent sur la propagation de l'onde de marée dans la lagune est observable lors des épisodes de forts vents de secteur NO. Ceux-ci ont tendance à réduire la durée des phases de flot et de jusant (Figure 14 - gauche) et à augmenter le marnage (Figure 15 - gauche). Ces forts vents de NO génèrent des oscillations plus haute fréquence et d'amplitudes plus importantes que les ondes de marée. Ce phénomène est surtout observable à la station « Sud » pour laquelle le fetch est le plus important pour ce secteur de vent (cf. § 2.1.1.3). Les évolutions temporelles des hauteurs d'eau à Port-Leucate et aux trois stations lagunaires permettent d'illustrer ces oscillations associées aux épisodes de vent de types 2 et 3 (Annexe 1).

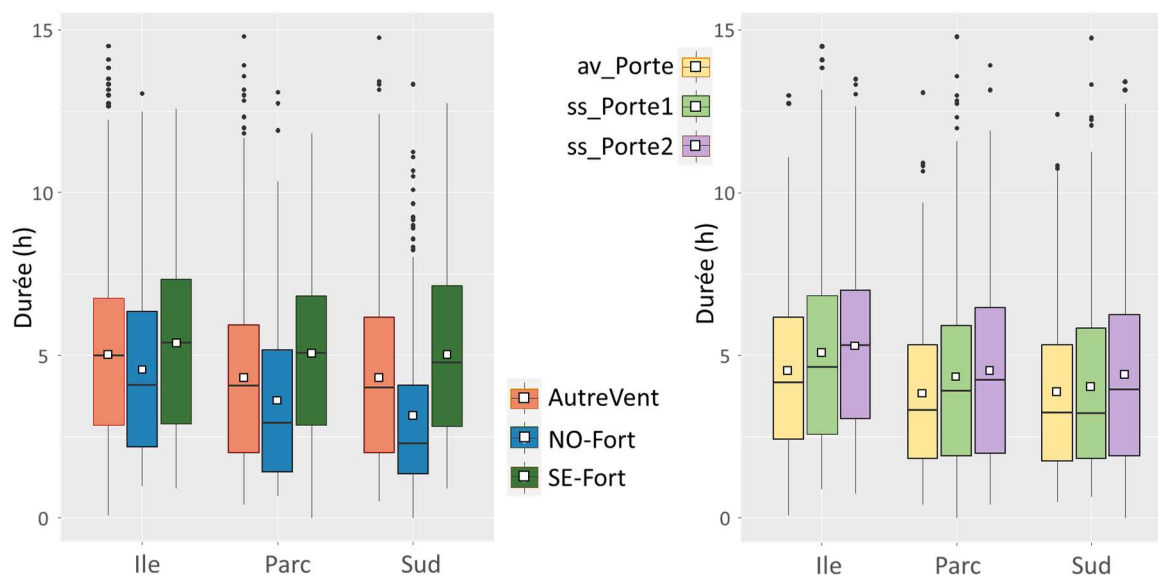


Figure 14 : Distributions des durées des phases de flot et de jusant aux trois stations lagunaires en fonction des catégories de vent (gauche) et des périodes en présence et en l'absence des portes (droite).

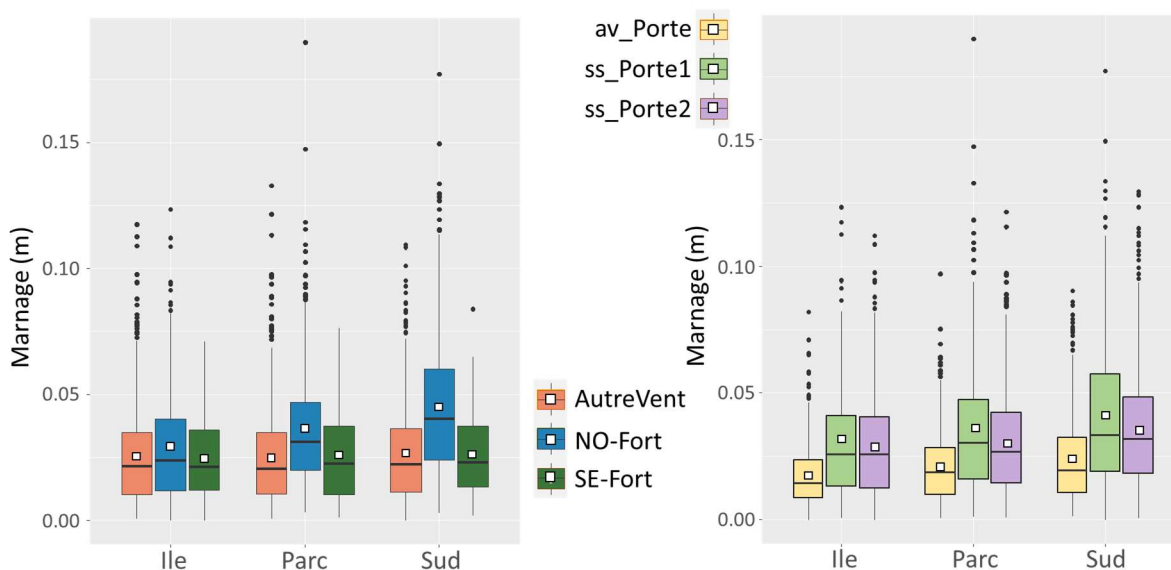


Figure 15 : Distributions des marnages aux trois stations lagunaires en fonction des catégories de vent (gauche) et des périodes en présence et en l'absence des portes (droite).

3.2.2.3 Impact des portes sur la propagation de la marée dans la lagune

La décomposition du jeu de données en distinguant les périodes en présence et en absence des portes permet de préciser l'impact de ces ouvrages sur la propagation de l'onde de marée dans la lagune.

L'impact de la présence des portes sur la propagation de l'onde de marée dans la lagune est observable à la fois sur la durée des phases de flot et de jusant et sur le marnage.

Les portes, qui réduisent fortement les sections d'échange des graus, amplifient encore le rôle de frein joué par ces derniers. En présence des portes, l'onde de marée pénètre moins dans la lagune ce qui se traduit par i) : une diminution de la durée des phases de flot et de jusant d'environ 40 minutes, comparativement aux périodes sans porte (Figure 14 - droite) et ii) : une diminution du marnage aux trois stations de plus de 50% (Figure 15 - droite). En présence des portes, le signal de marée dans la lagune n'est plus que de $2.2 \text{ cm} \pm 1.6 \text{ cm}$, en moyenne sur les trois stations et toutes conditions de vent confondues, contre $4.0 \text{ cm} \pm 3.5 \text{ cm}$ en l'absence des portes. L'atténuation de l'onde de marée passe en moyenne de 43.7% en l'absence des portes à 21.5% en leur présence.

A RETENIR

- ✓ Le passage des graus limite fortement la propagation du signal de marée à l'intérieur de la lagune et réduit la durée des phases de flot et de jusant et le marnage.
- ✓ Dans la lagune l'onde de marée est en retard de phase d'environ 1h (en moyenne aux trois stations et toutes conditions de vent confondues) et est atténuée à près de 33% comparativement au grau de Port-Leucate.
- ✓ Les forts vents de secteur NO génèrent des oscillations plus haute fréquence et d'amplitude plus importantes que les ondes de marée. Ce phénomène est surtout observable à la station « Sud » pour laquelle le fetch est le plus important pour ce secteur de vent.
- ✓ Les portes amplifient le rôle de frein joué par les graus, l'atténuation du signal de marée dans la lagune est en moyenne de 21.5% (en moyenne aux trois stations, toutes conditions de vent confondues) en présence des portes contre 43.7% en leur absence.

3.2.3 Variations de la hauteur d'eau « côté mer » en lien avec les variations de la pression atmosphérique

Afin de filtrer les ondes de marée et ne garder que les variations plus basse fréquence, les signaux de hauteur d'eau ont été lissés sur 24h. Un lissage identique a été fait sur le signal de pression atmosphérique afin de comparer les signaux entre eux.

3.2.3.1 Vérification de la loi du baromètre inversé

La relation entre les variations de la pression atmosphérique et les variations de la hauteur d'eau est analysée en comparant les ΔP_{atm} (différences entre deux extrema successifs) et les $\Delta \eta$ à Port-La-Nouvelle et Port-Leucate.

Le coefficient de régression entre ΔP_{atm} et $\Delta \eta_{PLN}$ est égal à $-0.01 \text{ m.mBar}^{-1}$ ($R^2 = 0.62$ - Figure 16) et est cohérent avec la loi du baromètre inversé (cf. § 2.1.1.2) qui formalise l'action des variations de la pression atmosphérique sur l'évolution du niveau marin.

A Port-Leucate, cette relation du baromètre inversé est également vérifiée avec un coefficient de régression entre ΔP_{atm} et $\Delta \eta_{Port}$ égal à $-0.009 \text{ m.mBar}^{-1}$ ($R^2 = 0.59$).

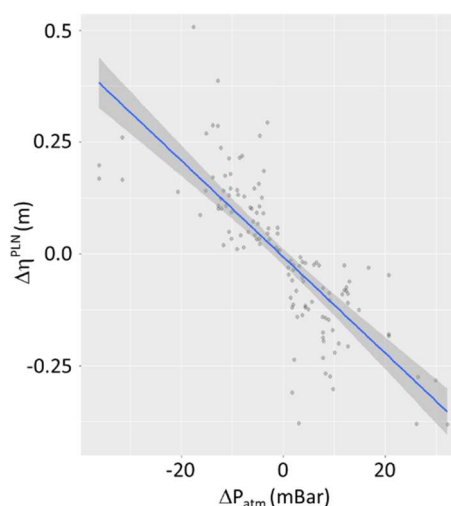


Figure 16 : relation entre les amplitudes de variation de la pression atmosphérique mesurée à la station Météo-France de Leucate et les variations d'amplitude du signal de hauteur d'eau mesuré à Port-La-Nouvelle (données SHOM). La droite représente la régression estimée à partir des mesures (points) acquises entre le 20/09/2020 et le 03/08/2021. L'enveloppe représente l'intervalle de confiance à 0.95.

3.2.3.2 Variation des niveaux d'eau moyens

Sur la période étudiée (du 20/09/2020 au 29/07/2021) les niveaux d'eau moyens affichent une variabilité saisonnière marquée. En périodes automnale et hivernale les niveaux moyens à Port-La-Nouvelle (référence en mer) sont égaux à $19.1 \text{ cm} \pm 10.5 \text{ cm}$ (période « ss_Porte1 ») et $21.4 \text{ cm} \pm 9.3 \text{ cm}$ (période « av_Porte »). Au printemps et en début d'été (période « ss_Porte2 ») les niveaux d'eau moyens sont significativement plus faibles et égaux à $8.0 \text{ cm} \pm 10.1 \text{ cm}$.

Dans le grau de Port-Leucate, les niveaux d'eau moyens sont respectivement égaux à $20.2 \text{ cm} \pm 9.0 \text{ cm}$ et $20.1 \text{ cm} \pm 8.4 \text{ cm}$ sur les périodes « ss_Porte1 » et « av_Porte ». Sur la période « ss_Porte2 », les niveaux moyens ne sont plus que de $6.0 \text{ cm} \pm 10.1 \text{ cm}$.

En 2020, les portes ont mises en place à une période de l'année où les niveaux d'eau moyens étaient les plus élevés.

3.2.3.3 Déphasage et atténuation des hauteurs d'eau entre la mer et Port-Leucate

Sur la période étudiée, les temps caractéristiques des variations de hauteur d'eau (durée de montant et des descendants) liées aux variations de la pression atmosphérique (conditions

cycloniques et anticycloniques) varient autour de $53h \pm 29h$ sans différence significative entre les deux stations de Port-La-Nouvelle et Port-Leucate. Les événements les plus longs ont duré près de 6 jours.

En moyenne sur toute la durée de la période, les variations de hauteurs d'eau ($\Delta\eta$) sont de $13.0 \text{ cm} \pm 9.9 \text{ cm}$ à Port-La-Nouvelle et de $12.3 \text{ cm} \pm 9.5 \text{ cm}$ à Port-Leucate.

De même que pour le forçage lié à la marée, à ces échelles de temps, les signaux de hauteur d'eau à Port-Leucate et Port-La-Nouvelle sont très similaires (Figure 17). Le déphasage entre les extrema de Port-La-Nouvelle et de Port-Leucate est de $2h06 \pm 4h33$. L'atténuation du signal à Port-Leucate (comparativement à Port-La-Nouvelle) est de $87.8\% \pm 24.2\%$.

3.2.3.4 Impact du vent

La décomposition du jeu de données en fonction des conditions météorologiques permet de préciser l'impact du vent sur i) : les niveaux d'eau moyens dans le grau de Port-Leucate et ii) : les variations de la hauteur d'eau liées aux variations de la pression atmosphérique.

Les vents forts de secteur SE (Typologies 4 et 5) ont tendance à ramener les masses d'eau du large à la côte et augmenter les niveaux moyens. Des différences de -8.7 cm (respectivement -6.4 cm) sont observables (mais non significatives) entre les niveaux moyens à Port-La-Nouvelle (respectivement Port-Leucate) en condition de vent de secteur NO et SE. Lorsque les forts vents de secteurs SE sont concomitants à une diminution de la pression atmosphérique, tels que les coups de mer du 20/10/2020, du 22/02/2021 et l'évènement pluvieux des 27-28/11/2020 - Figure 17), leurs effets s'ajoutent et engendrent des fortes élévations des hauteurs d'eau ($\Delta\eta$ allant de $+25 \text{ cm}$ à $+40 \text{ cm}$ aux deux stations).

A l'inverse, les forts vents de secteur NO (Typologie 3), qui entraînent les masses d'eau de la côte vers le large, ont tendance à diminuer les niveaux d'eau moyens. Des forts vents de secteurs NO, concomitants à une augmentation de la pression atmosphérique (conditions anticycloniques telle que celles enregistrées début janvier 2021 - Figure 17 – haut ou mi-mars - Figure 17 bas), engendrent de fortes baisses des hauteurs d'eau.

3.2.3.5 Impact des portes

Aucun impact significatif des portes n'est observable sur les niveaux d'eau moyens (η_{moy}) et les variations des hauteurs d'eau ($\Delta\eta$) dans le grau de Port-Leucate.

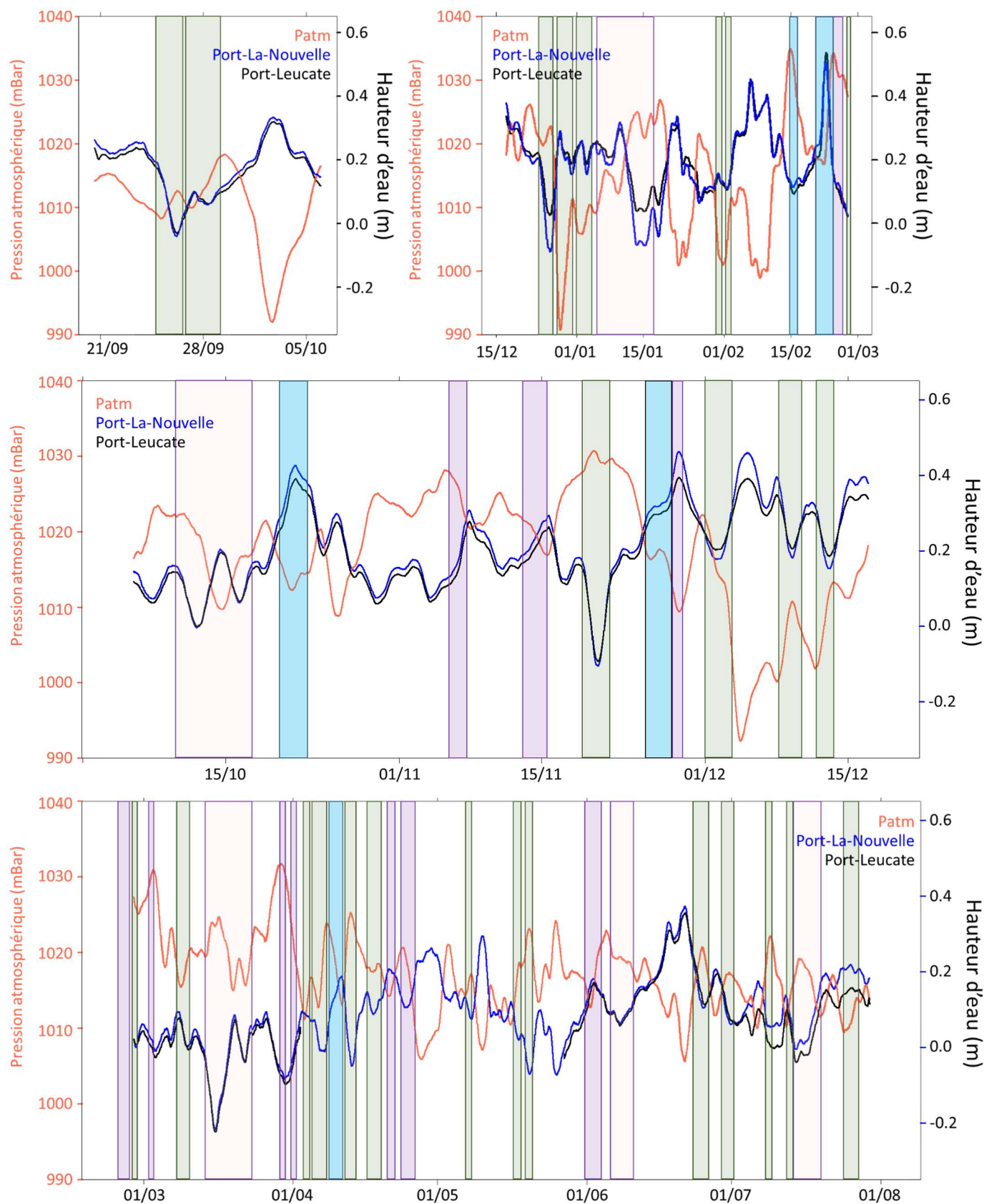


Figure 17 : Evolution temporelle sur les trois périodes considérées (en haut) « ss_Porte1 », (au milieu) « av_Porte » et (en bas) « ss_Porte2 », de la pression atmosphérique mesurée à la station Météo-France de Leucate (courbe rouge) et des signaux de hauteur d'eau mesurés à Port-La-Nouvelle (courbe bleue - données SHOM) et à Port-Leucate (courbe noire – données acquises dans le cadre de cette étude). Un lissage des données sur 24 heures a été fait pour filtrer les variations dues à la marée sur les hauteurs d'eau.

A RETENIR

- ✓ La relation entre les variations de la pression atmosphérique et des hauteurs d'eau (loi du baromètre inversé) est vérifiée aux stations de Port-La-Nouvelle et Port-Leucate.
- ✓ Sur la période d'étude (du 20/09/2020 au 29/07/2021) les niveaux d'eau moyens affichent une variabilité saisonnière marquée avec des niveaux significativement plus élevés en automne/hiver qu'au printemps/été. En 2020, les portes ont été mises en place à une période de l'année où les niveaux moyens ont été les plus élevés.
- ✓ L'atténuation des variations de hauteur d'eau liées aux variations de pression est de l'ordre 88% entre Port-Leucate et Port-La-Nouvelle.
- ✓ L'impact du vent sur les variations de hauteur d'eau est quantifiable avec les forts vents de secteur NO qui entraînent les masses d'eau de la côte vers le large et diminuent les niveaux d'eau moyens. Les vents forts de secteur SE qui ont tendance à ramener les masses d'eau du large à la côte et augmenter les niveaux moyens.
- ✓ Pas d'impact quantifiable de la présence des portes sur les variations de hauteur d'eau liées aux variations de la pression atmosphérique dans le grau de Port-Leucate.
- ✓ Globalement, le signal de hauteur d'eau mesuré dans la partie aval du grau de Port-Leucate est représentatif des variations de la hauteur d'eau à la côte.

3.2.4 Variations des hauteurs d'eau « côté lagune » en lien avec les variations de la pression atmosphérique

3.2.4.1 Variation des niveaux d'eau moyens dans la lagune

De même que pour les stations en mer, les niveaux d'eau moyens dans la lagune affichent une forte variabilité saisonnière. En périodes automnale et hivernale (en moyenne sur les périodes « ss_Porte1 » et « av_Porte »), les niveaux moyens dans lagune varient autour de $22.3 \text{ cm} \pm 11.6 \text{ cm}$. Au printemps et en début d'été (période « ss_Porte2 ») les niveaux d'eau moyens sont nettement plus faibles et varient autour de $6.5 \text{ cm} \pm 9.9 \text{ cm}$.

3.2.4.2 Déphasage et atténuation des hauteurs d'eau entre la lagune et Port-Leucate

Sur la période étudiée, les temps caractéristiques des variations de hauteur d'eau dans la lagune (durée des $\Delta\eta$) liées aux variations de la pression atmosphérique (conditions cycloniques et anticycloniques) sont plus importants dans la lagune qu'à Port-Leucate (Figure 18 - gauche) sans que cette différence soit significative. Aux stations intra-lagunaires (Parc et Sud), les durées des phases de vidange (descendant) sont plus variables et plus longues que les phases de remplissage (montant). Les événements les plus longs ont duré plus d'une semaine : à titre d'exemple, l'évènement du 20/10/2020 (type 5 - Tableau 5) associé au passage d'une dépression et à un évènement de vent de secteur SE (Figure 19 - centre) a donné lieu à une augmentation de la hauteur d'eau dans la lagune de 23 cm suivi d'une phase de vidange de ces eaux excédentaires qui a duré près de 8 jours.

Le passage des graus induit un déphasage important, de l'ordre d'une quinzaine d'heures, entre les extrema de hauteur d'eau dans la lagune et dans le grau de Port-Leucate. Ce déphasage est plus marqué pour les phases de vidange de la lagune ($17\text{h}39 \pm 9\text{h}56$) que pour les phases de remplissage ($14\text{h}50 \pm 10\text{h}36$).

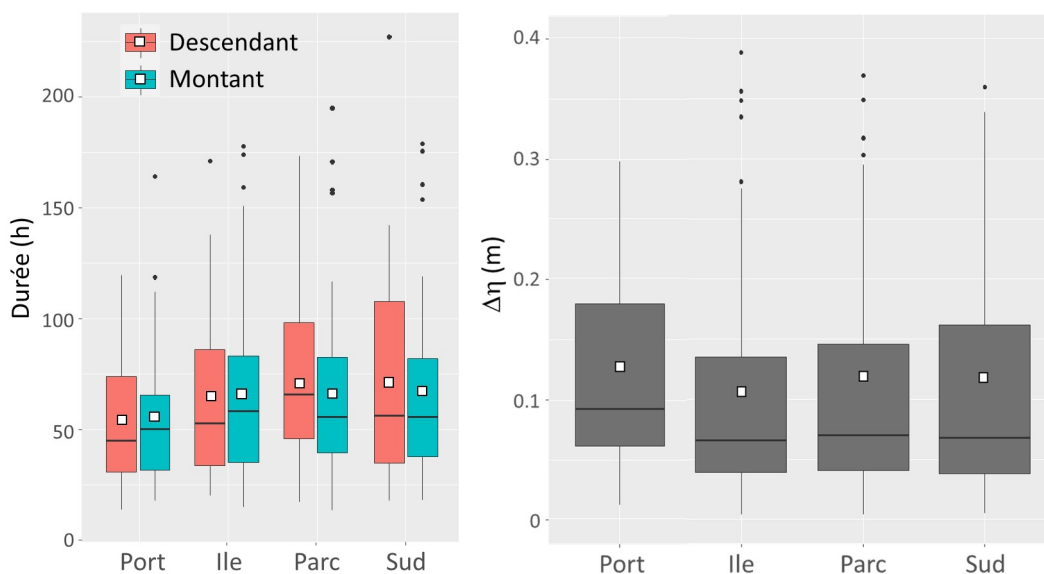


Figure 18 : Distributions des durées des phases de montant et de descendant (gauche) et des variations des hauteurs d'eau ($\Delta\eta$) aux trois stations lagunaires et à Port-Leucate.

En moyenne sur toute la période d'étude, les variations de hauteurs d'eau dans la lagune liées aux variations de la pression atmosphérique ($\Delta\eta$) sont de $11.4 \text{ cm} \pm 9.8 \text{ cm}$ et peu différentes entre les stations lagunaires (Figure 20 - droite).

L'atténuation de la hauteur d'eau entre Port-Leucate et la lagune varie autour de $77.1\% \pm 46.2\%$ avec très peu de différences entre les trois stations lagunaires. L'impact des graus sur les variations plus basse fréquence de la hauteur d'eau dans la lagune est donc moins marqué que pour les ondes de marée. Ces résultats sont en accord avec les phénomènes décrits par DiLorenzo concernant l'impact des graus sur la propagation des signaux en fonction de leur fréquence (cf. § 2.1.2.1).

3.2.4.3 Impact du vent

Contrairement aux observations en mer, l'impact du vent sur les hauteurs d'eau moyennes dans la lagune n'est pas mesurable. Toutefois, de même qu'en mer, les variations de hauteur d'eau dans la lagune liées aux variations de la pression atmosphérique sont significativement plus importantes lors des épisodes de vent de secteur SE : $17.2 \text{ cm} \pm 10.7 \text{ cm}$ en moyenne sur les trois stations lagunaires contre $10.9 \text{ cm} \pm 9.6 \text{ cm}$ pour les deux autres conditions de vent.

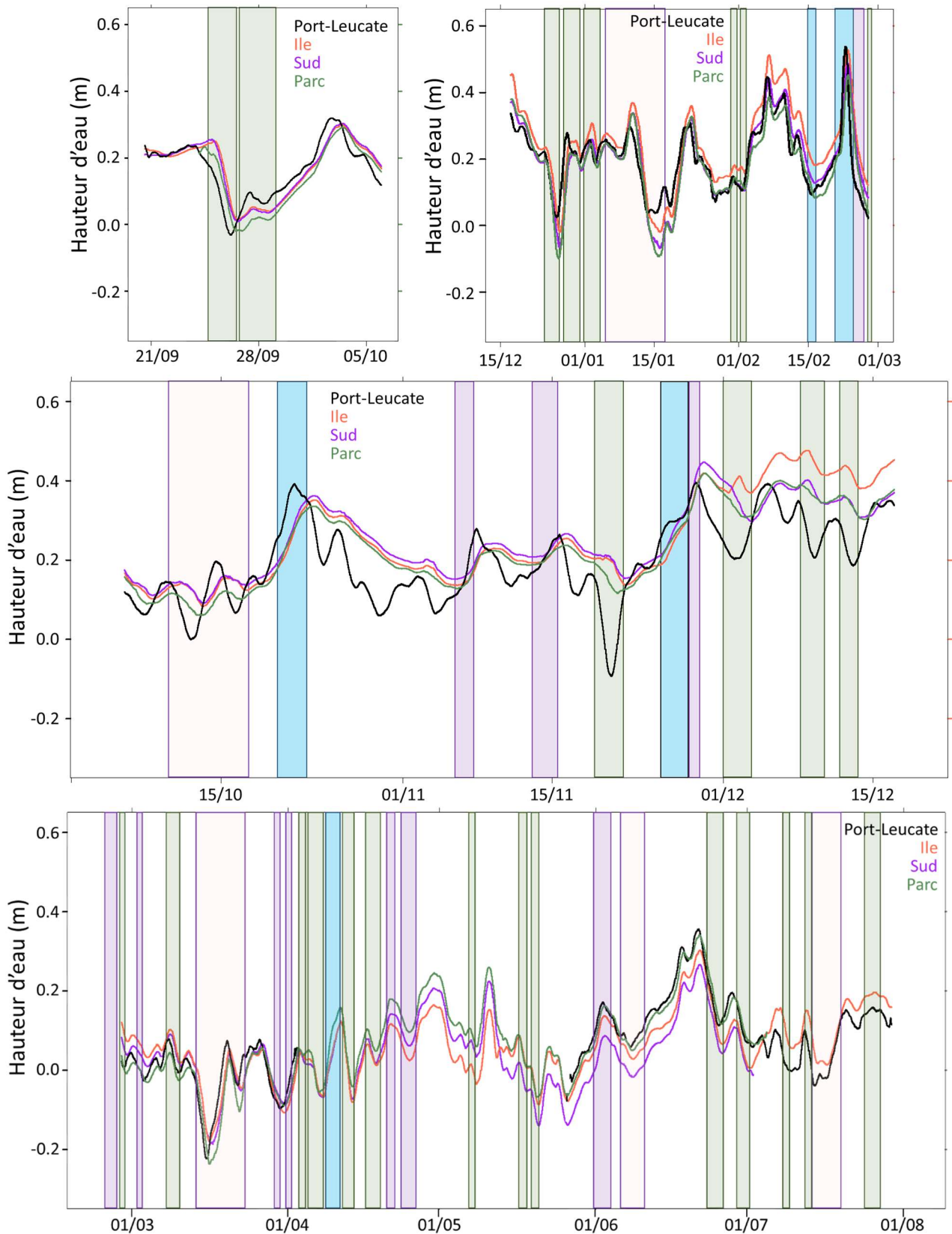


Figure 19 : Evolution temporelle, sur les trois périodes considérées (en haut) « ss_Porte1 », (au milieu) « av_Porte » et (en bas) « ss_Porte2 », des signaux de hauteur d'eau mesurés à Port-Leucate (courbe noire), Ile (courbe orange), Sud (courbe violette) et Parc (courbe verte). Un lissage des données sur 24 heures a été fait pour filtrer les variations dues à la marée.

3.2.4.4 Impact des portes

La décomposition du jeu de données en distinguant les périodes en présence et en absence des portes permet de préciser l'impact des portes sur i) : les niveaux d'eau moyens dans le grau de Port-Leucate ; ii) : les variations de la hauteur d'eau liées aux variations de la pression atmosphérique et iii) : le déphasage entre les variations des signaux dans la lagune et dans le grau de Leucate.

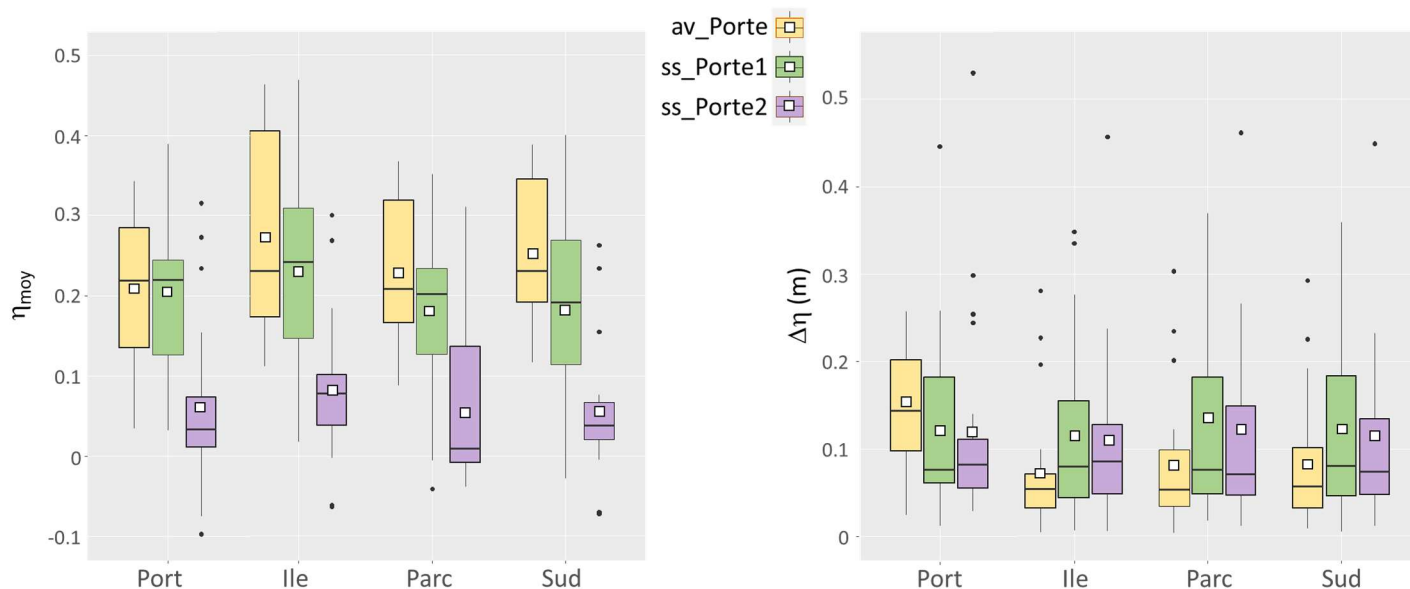


Figure 20 : Distributions des niveaux d'eau moyens (gauche) et des variations des hauteurs d'eau ($\Delta\eta$) (droite) aux trois stations lagunaires et à Port-Leucate en distinguant les périodes en présence et en l'absence des portes.

Les niveaux d'eau moyens dans la lagune (η_{moy}) sont plus élevés lorsque les portes sont en place et varient entre $25.2 \text{ cm} \pm 10.7 \text{ cm}$ sur la période « av_Porte » (Figure 20 – gauche) comparativement au reste de la période hivernale (période « ss_Porte1 ») où ces niveaux varient entre $19.8 \text{ cm} \pm 11.9 \text{ cm}$.

A l'inverse, les variations des hauteurs d'eau dans la lagune liées aux variations de la pression atmosphérique ($\Delta\eta$) sont significativement plus faibles en présence des portes qu'en leur absence (Figure 20 – droite). L'atténuation de ces variations comparativement au grau de Port-Leucate varie autour de $45.8\% \pm 28.2\%$ en présence des portes contre $92.7\% \pm 45.6\%$ en l'absence des portes.

La conjugaison de ces deux effets antagonistes peut être analysée en considérant les valeurs des extrema dans la lagune. Il apparaît que l'impact des portes sur l'augmentation du niveau moyen est plus important que l'atténuation engendrée sur les variations de la hauteur d'eau. Par conséquent, les extrema (valeurs maximales et minimales) des niveaux d'eau dans la lagune sont légèrement plus importants en présence des portes qu'en leur absence (Figure 21 - gauche). Les extrema varient entre $25.6 \text{ cm} \pm 12.0 \text{ cm}$ sur la période « av_Porte » contre $21.3 \text{ cm} \pm 14.0 \text{ cm}$ sur la période « ss_Porte1 ». Cette différence de moins de 5 cm n'est pas significative.

Par ailleurs, l'analyse des déphasages entre les variations des signaux de hauteur d'eau dans la lagune et dans le grau de Leucate en présence et en l'absence des portes renseigne sur l'impact de ces ouvrages sur la dynamique de mise en équilibre de la lagune avec la mer.

Ces déphasages sont significativement plus élevés en présence des portes qu'en leur absence (Figure 21 - droite). En moyenne sur les phases de montant et de descendant, ces déphasages varient entre $25\text{h}29 \pm 10\text{h}54$ en présence des portes contre $11\text{h}33 \pm 6\text{h}05$ en leur absence.

En outre, ces déphasages entre la lagune et le grau de Port-Leucate sont légèrement plus élevés pour les phases de vidange de la lagune que pour les phases de remplissage (Figure 21 - droite).

Ainsi, lors du passage de dépressions, qui engendrent des entrées d'eaux marines dans la lagune, les niveaux d'eau dans la lagune vont avoir tendance à être légèrement plus hauts en présence des portes ($29.4 \text{ cm} \pm 11.3 \text{ cm}$) qu'en leur absence ($26.7 \text{ cm} \pm 12.8 \text{ cm}$) et le temps nécessaire pour vidanger ces eaux excédentaires peut être allongé de plus d'une demi-journée.

Enfin, lorsque ces dépressions sont accompagnées de précipitations, comme ce fut le cas fin novembre 2020, les eaux continentales et les précipitations directes sur la lagune ont apporté des eaux excédentaires qui, du fait de la présence des portes, sont restées « bloquées » dans la lagune, notamment dans le secteur proche des portes (station « Ile » sur la Figure 19 – centre).

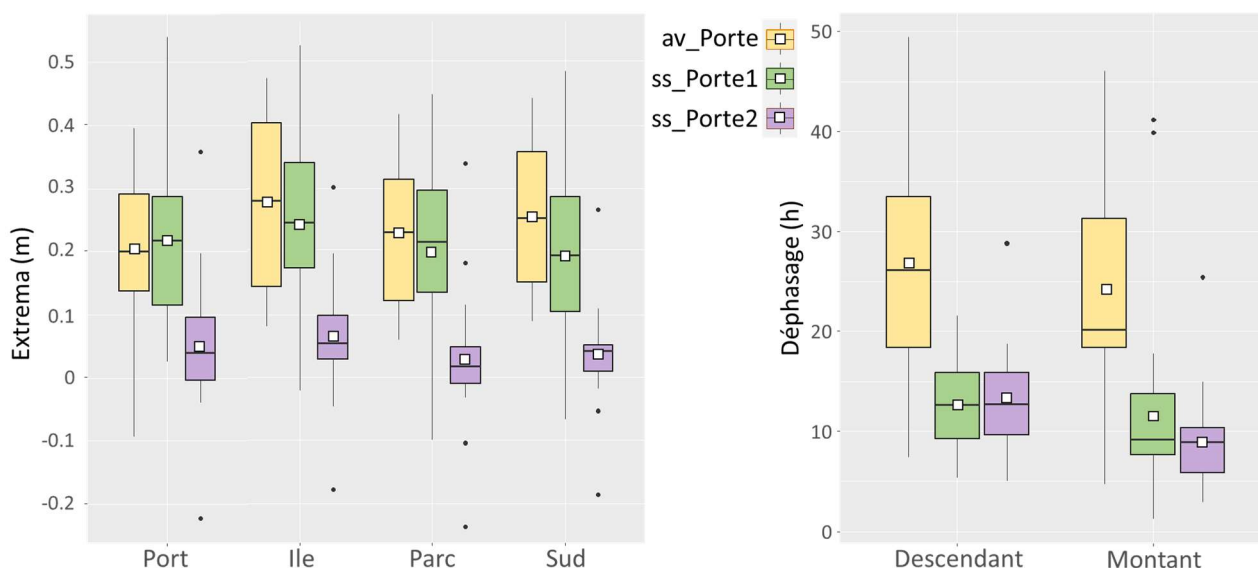


Figure 21 : Distributions des extrema de hauteur d'eau aux trois stations lagunaires et à Port-Leucate (gauche) et distributions des déphasages entre les variations de la hauteur d'eau dans la lagune et à Port-Leucate (droite) en distinguant les périodes en présence et en l'absence des portes.

A RETENIR

- ✓ De même qu'en mer, les niveaux d'eau moyens dans la lagune affichent une variabilité saisonnière marquée avec des niveaux significativement plus élevés en automne/hiver qu'au printemps/été.
- ✓ Le passage des graus induit un déphasage de l'ordre d'une quinzaine d'heures, entre les extrema de hauteur d'eau dans la lagune et dans le grau de Port-Leucate. Ce déphasage est plus marqué pour les phases de vidange de la lagune ($17\text{h}39 \pm 9\text{h}56$) que pour les phases de remplissage ($14\text{h}50 \pm 10\text{h}36$).
- ✓ L'impact des graus sur les amplitudes des variations plus basse fréquence de la hauteur d'eau dans la lagune est moins marqué que pour les ondes de marée. L'atténuation de la hauteur d'eau entre Port-Leucate et la lagune varie autour de $77.1\% \pm 46.2\%$ avec très peu de différences entre les trois stations lagunaires.

A RETENIR (suite)

- ✓ La présence des portes augmente significativement le déphasage entre les signaux de hauteur d'eau dans la lagune et Port-Leucate. Ce déphasage dépasse la journée en présence des portes alors qu'il est inférieur à la demi-journée en leur absence et il est plus marqué pour les phases de descendant que de montant.
- ✓ La présence des portes induit deux phénomènes antagonistes : les niveaux d'eau moyens dans la lagune sont supérieurs de plus de 5 cm en présence des portes qu'en leur absence mais l'atténuation des variations autour de ces niveaux moyens est plus importante en présence des portes (de l'ordre de 46%) qu'en leur absence (de l'ordre de 93%). L'impact des portes sur l'augmentation du niveau moyen est plus important que l'atténuation engendrée sur les variations de la hauteur d'eau et par conséquent, les extrema des niveaux d'eau dans la lagune sont légèrement plus importants (+ 5 cm) en présence des portes qu'en leur absence.
- ✓ Lors du passage de dépressions, qui engendrent d'importantes entrées d'eaux marines dans la lagune, les niveaux d'eau dans la lagune vont avoir tendance à être plus hauts en présence des portes qu'en leur absence et le temps nécessaire pour vidanger ces eaux excédentaires peut être allongé de plus d'une demi-journée.
- ✓ La présence des portes augmente le risque de surcote notamment lors d'évènements pluvieux durant lesquels les eaux excédentaires (apports par les bassins versants et les précipitations directes sur la lagune) restent « bloquées » dans la lagune (dans le secteur proche des portes).

3.3 Quantification des échanges avec la mer via le grau de Port-Leucate

3.3.1 Débits dans le grau de Port-Leucate

3.3.1.1 Fonctionnement général

Les séries temporelles de débits dans le grau de Port-Leucate ont été lissées sur 1 heure afin d'être comparées aux données de hauteur d'eau à la station Port-Leucate. Le signal de débits est analysé en considérant les phases de montant (variations entre les minima et maxima successifs) et les phases de descendant (variations entre les maxima et minima successifs).

Le signal de débit affiche une forte variabilité (Figure 22) et des renverses de courant (inversion du sens du courant) dans le grau de Port-Leucate ne sont observées que 66% du temps. Dans ces cas-là, la durée des phases de montant et de descendant varie entre $5h21 \pm 1h41$ (resp. $5h44 \pm 2h10$) sans que cette différence soit significative.

Les débits sont en moyenne en avance de phase sur la hauteur d'eau et cet effet est plus marqué durant les phases de jusant pour lesquelles les débits sortants sont maximaux $1h24 \pm 2h01$ avant la basse mer. Lors des phases de flot, les débits entrants sont maximaux $0h31 \pm 1h10$ avant la pleine mer.

Dans les cas où les débits sont perturbés et ne s'inversent pas durant les phases de montant et de descendant (34% du temps), les durées de ces phases sont réduites et varient entre $2h56 \pm 1h52$. De même, les déphasages entre les débits et la hauteur d'eau dans le grau varient fortement entre $0h10 \pm 3h23$, sans différence significative entre les phases de jusant et de flot.

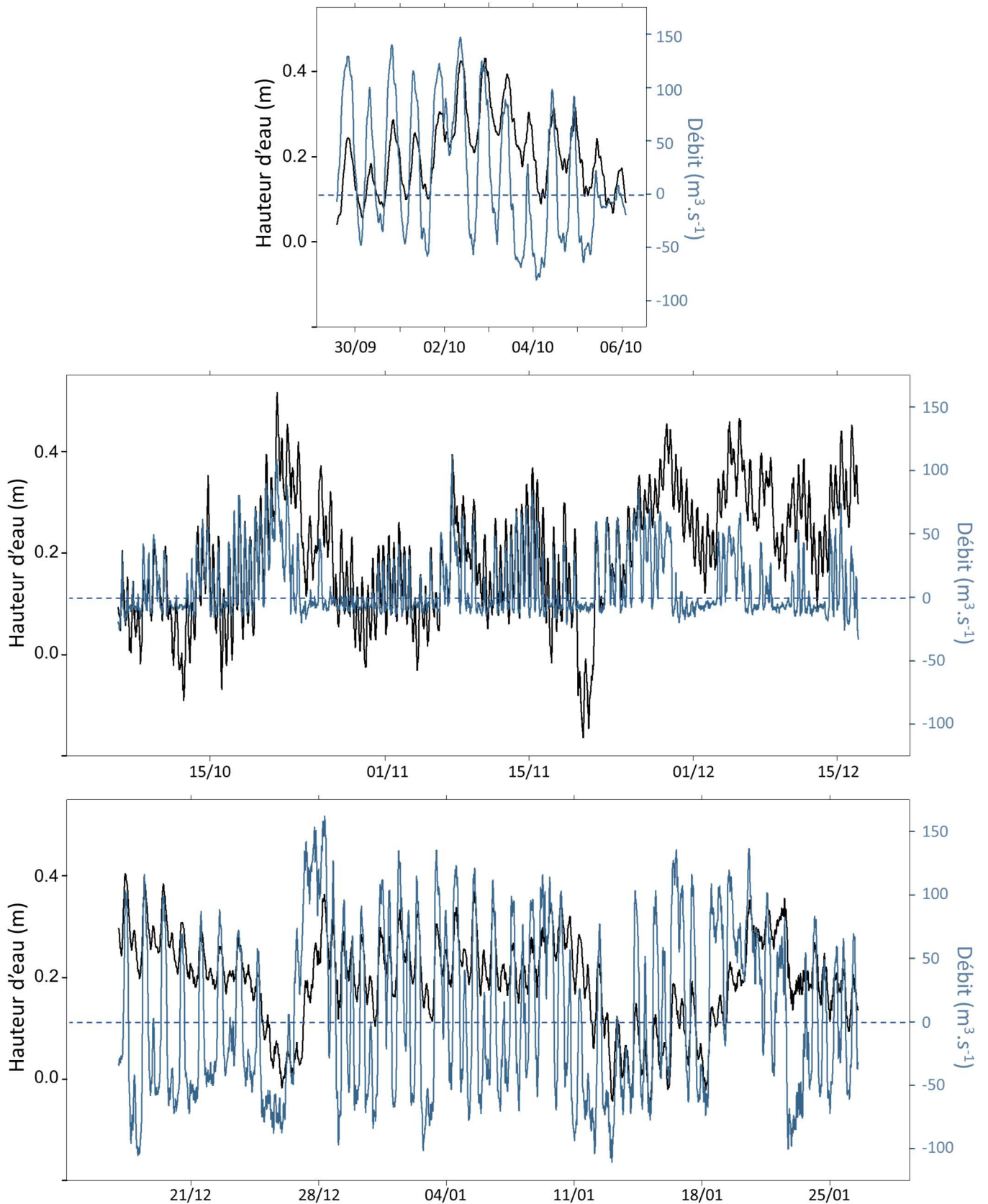


Figure 22 : Evolution temporelle des signaux de débit (courbes bleues) et de hauteur d'eau (courbe noire) mesurés dans le grau de Port-Leucate sur les périodes avant la mise en place des portes (en haut), sur la période avec les portes (au milieu) et sur la période après leur enlèvement (en bas). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

La comparaison des débits et des typologies de vent ne met pas à jour de lien direct entre les perturbations des écoulements dans le grau de Leucate (annulation des renverses) et des conditions de vent particulières.

3.3.1.2 Impact des portes

La présence des portes réduit les durées des phases de montant et descendant et accentue les avances de phase entre les débits et la hauteur d'eau sans que ces différences soient significatives. En outre, en présence des portes les écoulements sont plus perturbés et l'annulation des renverses survient 37.5% du temps contre 29.3% du temps en leur absence.

3.3.2 Volumes échangés dans le grau de Port-Leucate

3.3.2.1 Fonctionnement général

La durée des phases de sortant varient entre $3h13 \pm 2h03$ contre $4h39 \pm 2h47$ pour les phases d'entrant. Si ces phases de sortant ont une durée significativement plus courte que les phases d'entrant, elles sont en revanche plus fréquentes, 56% du temps sur la période échantillonnée.

Les volumes entrants par le grau de Port-Leucate sont significativement plus importants que les volumes sortants. En moyenne sur la période échantillonnée, les volumes échangés entre la mer et la lagune durant une phase d'entrant varient entre $+0.83 \pm 0.72 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et les volumes échangés entre la lagune et la mer durant les phases de sortant varient entre $-0.27 \pm 0.37 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Ainsi, si le grau de Port-Leucate a eu tendance à favoriser ces écoulements sortants (au regard de durée totale des phases de sortant/entrant), le bilan net des échanges via ce grau sur les 122 jours échantillonnés est en faveur des volumes entrants : $+ 86.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ correspondant à $+ 220.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eaux marines qui ont alimentées la lagune par ce grau contre $- 134.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eaux saumâtres qui ont été exportées de la lagune par ce même grau.

3.3.2.2 Impact des portes

La présence des portes accentue la différence entre les durées des phases d'entrant et sortant et notamment les durées des phases de sortants qui varient entre $3h08 \pm 1h57$ en présence des portes contre $3h49 \pm 2h11$ en leur absence (Figure 23 - droite). Ces différences ne sont toutefois pas significatives.

Les volumes échangés dans le grau de Port-Leucate durant les phases d'entrant et de sortant sont significativement plus faibles en présence des portes qu'en leur absence (Figure 23 - gauche). En moyenne sur la période « av_Porte », les volumes entrants varient entre $+0.59 \pm 0.53 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et les volumes sortants entre $-0.09 \pm 0.07 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. En l'absence des portes les volumes entrants varient entre $+1.13 \pm 0.81 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et les volumes sortants entre $-0.65 \pm 0.45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

La présence des portes ne modifie pas significativement l'occurrence des phases de sortant qui, sur la période échantillonnée, sont survenues plus de 58% du temps, contre 53% du temps en leur absence.

Ainsi, durant les 71 jours où les portes ont été en place, le bilan net des échanges par le grau de Port-Leucate a été en faveur des entrées : $+60.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ correspondant à $+90.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ entrées d'eaux marines contre $-29.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sorties d'eaux saumâtres.

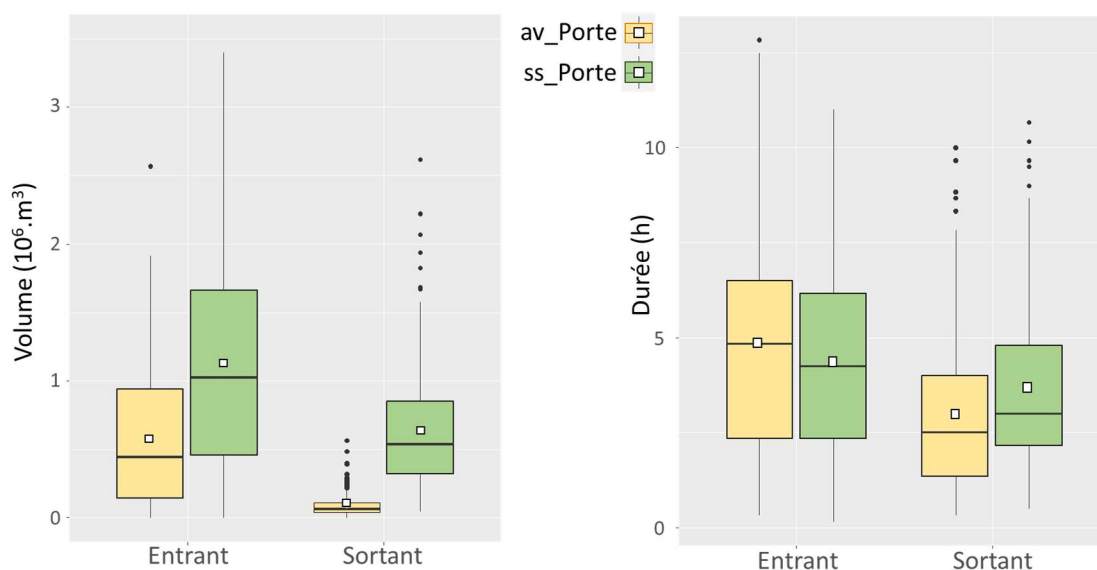


Figure 23 : Distributions, sur les phases d'entrant et de sortant, des volumes échangés entre la lagune de Salses-Leucate et la mer par le grau de Port-Leucate (gauche) et des durées de ces phases (droite) en distinguant les périodes en présence et en l'absence des portes.

Bien que moins marqué, ce déséquilibre des échanges par le grau de Port-Leucate en faveur des entrées est également observé durant les 46.5 jours échantillonnés en l'absence des portes avec un bilan net de +28.9 10⁶ m⁶ correspondant à des entrées d'eaux marines de +134.2 10⁶ m⁶ contre des sorties d'eaux saumâtres de -105.3 10⁶ m⁶.

3.3.2.3 Temps de renouvellement

En présence des portes, les sorties d'eaux saumâtres de la lagune de Salses-Leucate via le grau de Port-Leucate représentent moins d'un tiers du volume de la lagune. Le temps de renouvellement de la lagune via le grau de Port-Leucate ne peut donc pas être évalué en présence des portes.

En estimant les variations du volume de la lagune à partir des variations des hauteurs d'eau aux stations lagunaires « Ile » et « Sud » (cf. § 2.4.2), les volumes entrants (respectivement sortants) par les trois graus seraient de l'ordre de 155.0 10⁶ m⁶ (respectivement de -122.0 10⁶ m⁶).

Ainsi, en présence des portes le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par les trois graus serait de l'ordre de 52 jours soit un taux de renouvellement de 1.9%.j⁻¹, équivalent à celui de la lagune de Thau (Tableau 4).

Dans ces conditions, les entrées d'eaux par le grau de Port-Leucate représenteraient 58% des entrées totales alors que les sorties par ce grau représenteraient moins de 24% des sorties totales.

En l'absence des portes, le temps de renouvellement des eaux de la lagune de Salses-Leucate via le seul grau de Port-Leucate est évalué à 35 jours à partir des mesures de débit.

En estimant les variations du volume de la lagune à partir des variations des hauteurs d'eau aux deux stations lagunaires, les volumes entrants (respectivement sortants) par les trois graus sur la période « ss_Porte » (d'une durée de 46.5 jours) sont de l'ordre de +198.0 10⁶ m⁶ (respectivement de -223.0 10⁶ m⁶). Ainsi, en l'absence des portes, le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par les trois graus serait de l'ordre de 19 jours, soit un taux de renouvellement de 5.2%.j⁻¹. Ces taux de renouvellement sont caractéristiques de lagunes ayant des échanges parmi les plus efficaces (Tableau 4).

En l'absence des portes, les entrées d'eaux par le grau de Port-Leucate représenteraient 67% des entrées totales alors que les sorties par ce grau représenteraient 47% des sorties totales.

Ces résultats confirment les résultats de l'étude BCEOM en termes d'importance du grau de Port-Leucate dans les échanges entre la lagune et la mer. En revanche, ils ne confirment pas les conclusions relatives au fait que le grau de Port-Leucate favoriserait les exports d'eau. Cette différence pourrait s'expliquer par les périodes d'acquisition différentes. La présente étude a été réalisée en périodes automnale et hivernale alors que l'étude BCEOM a été réalisée dans des conditions hydrométéorologiques spécifiques aux périodes estivales.

Outre le fait que la présence des portes réduit de façon significative l'efficacité des échanges entre la mer et la lagune de Salses-Leucate, celle-ci modifie « le rôle » que joue chacun des graus dans ces échanges. Si en l'absence des portes le grau de Port-Leucate joue un rôle majeur dans les échanges puisqu'il assure plus de 65% des entrées d'eaux marines et près de la moitié des sorties d'eaux saumâtres, en présence des portes, la part des sorties qu'il assure devient largement minoritaire.

A RETENIR

- ✓ Le signal de débit dans le grau de Port-Leucate affiche une forte variabilité et 34% du temps les débits ne s'inversent pas durant les phases de montant et de descendant.
- ✓ Le grau de Port-Leucate a tendance à favoriser les écoulements sortants au regard de la durée totale des phases entrant/sortant : 56 % du temps en faveur des phases de sortant.
- ✓ En revanche, en termes de volumes échangés, durant les périodes automnale et hivernale (en moyenne sur les périodes en présence et en l'absence des portes) le grau de Port-Leucate a favorisé les entrées d'eaux dans la lagune de Salses-Leucate (1.6 fois plus d'entrées que de sorties).
- ✓ La présence des portes réduit significativement les volumes échangés entre la lagune de Salses-Leucate et la mer par le grau de Port-Leucate. Les volumes entrants diminuent de plus de la moitié et les volumes sortants de plus d'un facteur 7.
- ✓ En l'absence des portes, bien que moins marqué, ce déséquilibre entre les entrées/sorties par le grau de Port-Leucate reste vrai et le grau de Port-Leucate importe plus de 1.2 fois plus d'eau qu'il n'en exporte.
- ✓ Le grau de Port-Leucate joue un rôle prépondérant dans les échanges mer-lagune, en l'absence des portes il assure plus de 65% des entrées d'eaux marines et près de la moitié des sorties d'eaux saumâtres. Toutefois, la présence des portes modifie « le rôle » que joue chacun des graus dans ces échanges, la part des sorties d'eaux par le grau de Port-Leucate devenant largement minoritaire (moins du quart).
- ✓ Le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par le grau de Port-Leucate est évalué, à partir des mesures de débit, à 35 jours en l'absence des portes. En présence des portes, cet indicateur ne peut être estimé car sa valeur est supérieure à la durée de mise en place des portes (71 jours).
- ✓ Le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par les trois graus est évalué à partir des variations de hauteurs d'eau dans la lagune. Il est estimé à 19 jours en automne/hiver et à 52 jours respectivement en absence et en présence des portes.

3.4 Salinité et température

3.4.1 Fonctionnement général

La salinité dans la lagune affiche des oscillations infra-horaires très marquées (Figure 24), de plusieurs unités. Celles-ci pourraient s'expliquer par une position de la sonde à proximité de l'interface de la stratification haline qui se met en place sur la verticale.

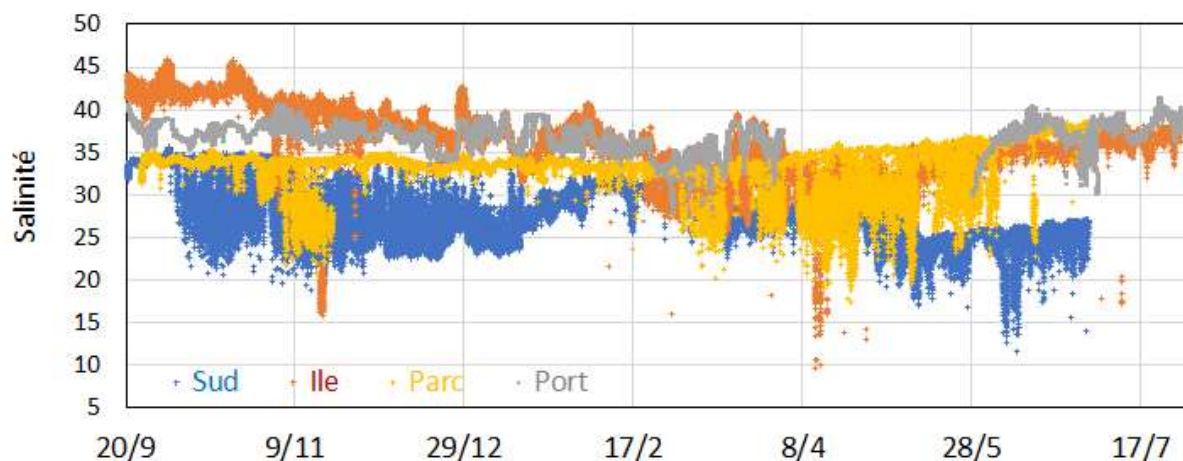


Figure 24 : Evolution temporelle de la salinité aux quatre stations suivies dans le cadre de cette étude

En moyennant les données de salinité et de température à l'échelle de la semaine, les variations conjointes de salinité et de température permettent de rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle de l'hydrologie de la lagune (Figure 25).

La station « Ile » présente un cycle Salinité-Température représentatif d'une station lagunaire euhaline, c'est-à-dire sous influence, à la fois, d'apports d'eaux marines et continentales : en été, les valeurs de salinité et de température sont plus élevées que celles de la mer (représentée ici par la station Port-Leucate) du fait de l'évaporation (salinité élevée) et de la faible inertie des masses d'eaux lagunaires (température élevée en lien avec la température de l'air) ; à l'inverse en hiver les valeurs de salinité et de température sont plus faibles qu'en mer du fait des apports d'eaux continentales (salinité faible) et de la faible inertie des masses d'eaux lagunaires.

La station « Sud » présente un cycle Salinité-Température représentatif d'une station lagunaire influencée par des apports d'eaux continentales tout au long de l'année : sur tout le cycle les valeurs de salinité restent inférieures à celle de la mer, signifiant que des apports d'eau douce compensent l'évaporation estivale.

L'influence d'apports permanents d'eau douce est également visible à la station « Parc » mais de façon moins marquée qu'au sud de la lagune.

Ces résultats sont cohérents avec les résultats de simulation obtenus à partir d'un modèle hydrodynamique (Cesmat, 2006) qui montrent que les apports d'eaux par Font Dame et Font Estramar ont tendance à se mélanger préférentiellement avec les eaux du bassin sud du fait des hauts fonds situés au centre de la lagune qui limitent les échanges d'eau entre les bassins nord et sud.

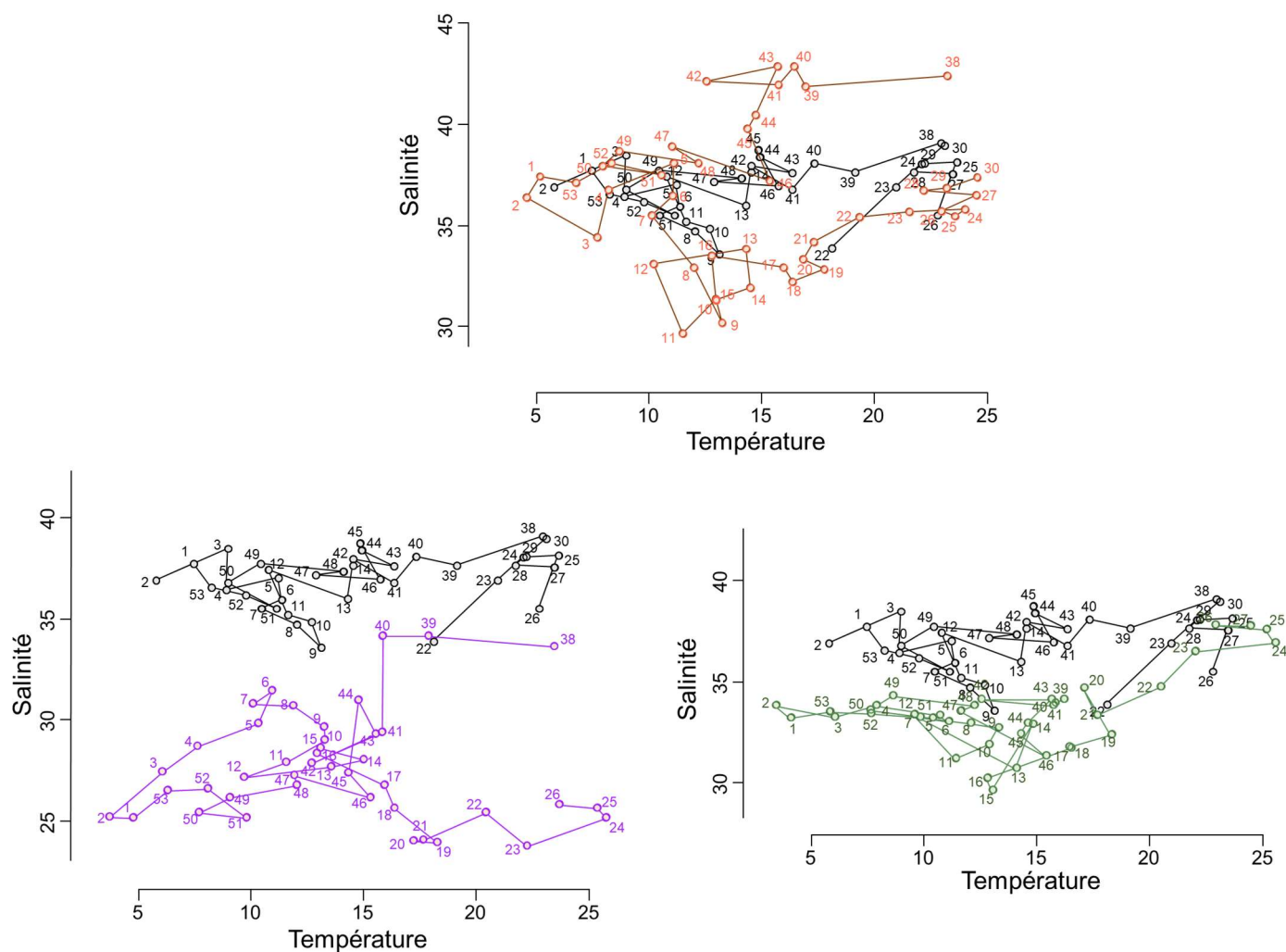


Figure 25 : Comparaison des cycles Salinité – Température, mesurés sur la période d’août 2020 à juillet 2021 et moyennés à l’échelle de la semaine, à la station « Port-Leucate » (en noir sur les trois graphes) et aux trois stations lagunaires « Ile » (en orange – graphe du haut), « Sud » (en violet graphe en bas à gauche) et « Parc » (en vert graphe en bas à droite). Les numéros des semaines sont indiqués comme étiquette des points de mesure

3.4.2 Impact des portes

Aucune variation particulière de salinité et température n’est observable suite à la mise en place ou au retrait des portes. La chute brutale de salinité à la station Sud entre les semaines 40 et 41 (Figure 25 en bas à gauche) n’est toutefois pas en lien avec un évènement météorologique particulier.

3.5 Impact sur les cultures marines

L’impact de la présence des portes sur les cultures marines est analysé au regard des risques de contamination de la production conchylicole par i) les phycotoxines et notamment les toxines lipophiles (DSP) produite par le genre *Dinophysis* ; ii) *E. coli*, bactérie témoin de contaminations fécales.

3.5.1 *Dinophysis* et contaminations des coquillages par les toxines lipophiles (DSP) dans la lagune de Salses-Leucate

Parmi les trois genres de phytoplancton potentiellement toxiques, *Dinophysis* est celui qui impacte le plus fréquemment les activités de pêche et d'élevage dans les eaux lagunaires et littorales d'Occitanie. Ce genre produit des toxines lipophiles incluant les diarrhéiques ou DSP (Diarrhetic Shellfish Poisoning), qui peuvent entraîner chez le consommateur des troubles digestifs d'apparition rapide, le plus souvent sans gravité.

L'activité d'élevage de coquillages dans la lagune de Salses-Leucate est régulièrement affectée par de longs épisodes toxiques liés au développement de *Dinophysis*, qui peut être potentiellement présent tout au long de l'année dans cette lagune. Depuis 2010, année du passage du bio-essai souris à la méthode chimique pour le dosage officiel des toxines lipophiles dans les coquillages, des épisodes de toxicité en lipophiles avec dépassement du seuil réglementaire dans les moules sont survenus chaque année en périodes automnale et hivernale généralement entre la semaine 45 et la semaine 10 de l'année suivante (Serais *et al.*, 2021). Exceptés en 2016 et 2019, ces épisodes de toxicité ont également engendré des dépassements du seuil réglementaire dans les huîtres, généralement à des niveaux plus faibles et sur des périodes moins longues que pour les moules.

La lagune de Salses-Leucate est ainsi identifiée comme une zone à risque sur laquelle les toxines lipophiles dans les coquillages en élevage sont recherchées systématiquement durant des périodes à risque⁵. En 2020 et comme pour les années précédentes les périodes à risque dans cette lagune sont les mois de janvier, février, novembre et décembre.

Dinophysis a été présent tout au long de l'année 2020 dans la lagune de Salses-Leucate. Les concentrations maximales du genre *Dinophysis* dans l'eau ont été observées début mai et, comme les années précédentes pendant la saison automnale, à partir du mois de novembre au cours duquel le maximum de 2 600 Cellules/L est atteint (le 23 novembre 2020 au point « Parc Leucate 2 »).

Ces efflorescences de *Dinophysis* ont été associées à trois épisodes de toxicité des moules sur de longues durées (période de novembre 2019 à février 2020, mai 2020 puis période de novembre 2020 à février 2021). Ainsi, l'année 2020 est caractérisée par une situation inédite depuis 2013, avec 18 semaines de résultats supérieurs au seuil réglementaire en toxines lipophiles dans les moules et une interdiction d'exploitation de cette espèce pendant cinq mois (148 jours dont près de 80% en périodes automnale et hivernale). Seules la seconde quinzaine d'avril et la période de la mi-juin à fin septembre auront été caractérisées par de faibles toxicités. Comme les années précédentes, les huîtres se sont contaminées en toxines lipophiles à de plus faibles niveaux de concentration que les moules. Elles ont toutefois été impactées par un épisode de toxicité automnal caractérisé par un dépassement du seuil réglementaire ayant conduit à deux semaines d'interdiction d'exploitation des huîtres fin novembre - début décembre 2020.

⁵ *Dinophysis* est susceptible, même à faible concentration de contaminer les coquillages en toxines lipophiles. Dans ce contexte, l'hypothèse du phytoplancton comme indicateur d'alerte n'est pas vérifiée ou pas fiable et il existe un risque élevé que les coquillages soient contaminés dès la première observation de *Dinophysis*. Ainsi, durant les périodes à risque la recherche hebdomadaire des toxines lipophiles dans les coquillages est systématique et non assujettie à la présence de *Dinophysis* dans l'eau. Ces périodes sont définies chaque année à partir des données historiques sur les trois années précédentes.

3.5.2 Quelques informations complémentaires concernant *Dinophysis*

Les dinoflagellés, famille à laquelle appartient le genre *Dinophysis* constituent une catégorie de plancton à la frontière entre les règnes végétal et animal. Si certaines espèces de dinoflagellés ont un profil strict de microalgue (organisme autotrophe dont la croissance s'appuie exclusivement sur la photosynthèse), d'autres se comportent exclusivement comme des animaux en ingérant des proies pour se nourrir. Des études récentes ont montré que *Dinophysis* appartient à une troisième catégorie qui développe des stratégies dites «mixtes» qui s'appuient à la fois sur la photosynthèse et la prédation (Souchu *et al.*, 2013).

Cette stratégie mixte complexifie l'étude du déterminisme des blooms qui dépendent donc à la fois de la disponibilité des proies et des facteurs qui influencent la photosynthèse (lumière, nutriments). De même, il est difficile de construire un modèle déterministe pour prévoir l'évolution des distributions spatiales et temporelles de *Dinophysis* dans les eaux côtières dans la mesure où un tel outil doit reproduire la chaîne trophique complexe dans laquelle *Dinophysis* est impliqué. Dans ce contexte, les séries temporelles acquises dans le cadre du REPHY (abondance de cellules de *Dinophysis*)/REPHYTOX (concentrations en toxines lipophiles dans les moules et huitres) dans la lagune de Salses-Leucate sur les 20 dernières années sont en cours d'analyses pour proposer un outil de prévision (Bouquet *et al.*, in prep.). Ces analyses ont mis à jour des seuils de température et salinité en deçà desquels les occurrences de blooms de *Dinophysis* et d'épisodes de toxicité des moules et des huitres en élevage dans la lagune de Salses-Leucate sont significativement augmentées.

3.5.3 Contaminations microbiologiques (*E. coli*)

Depuis 2002, la qualité microbiologique de la zone n°11.14 « Etang de Leucate - parcs ostréicoles » pour le groupe 3 est estimée B et en conformité avec le classement sanitaire. Sur la période 2011-2020, les épisodes de contaminations microbiologiques des coquillages de la zone d'élevage de Leucate ont été peu fréquents (dépassement du seuil d'alerte de 4 600 *E. coli*/100 g CLI). Cependant, pour la première fois depuis l'automne 2014, deux épisodes de contamination microbiologique ont été détectés en 2020. Le premier est survenu suite à l'évènement pluvieux d'avril 2020 (cf. § 3.1.3) et a donné lieu à un arrêté d'interdiction de la pêche de coquillages d'une durée de sept jours (Ifremer, 2021). Le second épisode de contamination a été détecté en décembre 2020, en surveillance régulière par temps sec, quatre jours après une période de petites pluies du 7 au 11 décembre. Le 15 décembre, le niveau de contamination dans les huîtres a dépassé le seuil d'alerte (4 900 *E. coli*/100 g CLI). L'origine de cette contamination non persistante et localisée n'a pas été identifiée et cet épisode n'a pas donné lieu à un arrêté d'interdiction de la pêche.

3.5.4 Impact potentiel de la présence des portes sur ces épisodes de contamination

Les résultats de la présente étude montrent que la présence des portes a tendance à retarder la mise en équilibre entre les niveaux d'eau dans la lagune et en mer et notamment à limiter fortement les exports d'eaux. Ainsi, en présence des portes, les eaux douces continentales excédentaires apportées lors d'évènements pluvieux vont alors avoir tendance à résider plus longtemps dans la lagune.

A cette période de l'année où la température de la lagune est inférieure à 15°C (Figure 25), cette augmentation du temps de résidence d'eaux douces potentiellement chargées en nutriments est susceptible de favoriser des blooms phytoplanctoniques dans un contexte hydrologique qui semble propice à la croissance de *Dinophysis*.

De même, ces apports d'eaux en provenance des bassins versant lors d'évènements pluvieux peuvent être le vecteur de pollutions microbiologiques liées à des dysfonctionnements des systèmes de traitement des eaux usées. A une période de l'année où les taux de survie des micro-organismes sont plus élevés du fait de la baisse des températures et du rayonnement global, l'augmentation du temps de résidence de ces eaux dans la lagune augmente le risque de contamination des coquillages en élevage.

4 Conclusions

La présente étude a été menée, à la demande de la DDTM de l'Aude, pour évaluer l'impact de la présence des portes, mises en place temporairement en périodes automnale et hivernale sur les graus de Port-Leucate et Port-Barcarès, sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate et potentiellement sur les cultures marines.

Les graus, qui contrôlent l'efficacité des échanges entre la mer et les lagunes, jouent un rôle majeur dans le fonctionnement hydrodynamique et écologique de ces milieux semi-fermés. Plus la section d'échange et la profondeur du grau sont faibles et plus le grau est long, plus la dynamique des échanges est limitée et plus les différences de hauteur d'eau entre la lagune et la mer sont importantes. Ainsi ces différences renseignent sur le temps de renouvellement des eaux de la lagune et sur l'impact des graus sur les équilibres hydrodynamiques qui se mettent en place entre ces deux écosystèmes. En complément, l'évolution annuelle de la salinité permet de rendre compte du poids relatif des interfaces « bassin versant » et « mer ».

Ainsi, l'évaluation de l'impact des portes sur le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Salses-Leucate a été réalisée à partir de mesures de hauteurs d'eau, salinité, température acquises, en haute fréquence, durant 10 mois entre septembre 2020 et juillet 2021 en différentes stations de la lagune de Salses-Leucate et dans le grau de Port-Leucate. Les données de hauteur d'eau acquises par le SHOM dans le grau de Port-La-Nouvelle ont également été utilisées pour caractériser les variations des niveaux d'eau à la côte. Des mesures de débit dans le grau de Port-Leucate ont également été acquises entre septembre et janvier 2021. L'acquisition de l'ensemble des données terrain a été confiée au bureau d'études HYDRIAD Eau et Environnement, selon un cahier des charges défini par l'Ifremer.

Cette étude s'est intéressée à caractériser l'impact des portes sur l'efficacité des échanges entre la lagune de Salses-Leucate et la mer en distinguant les conséquences sur la propagation dans la lagune i) : de la marée et ii) : des signaux plus basse fréquence liés aux variations de la pression atmosphérique.

Concernant la propagation de l'onde de marée, cette étude a montré que :

- le signal de hauteur d'eau mesuré dans la partie aval du grau de Port-Leucate est représentatif du signal de hauteur à la côte et il a donc pu être utilisé comme référence « mer » dans cette étude.
- le passage des graus limite fortement la propagation du signal de marée dans la lagune avec, en l'absence des portes, un déphasage de l'ordre de 1 heure et une atténuation du marnage de près de 44% comparativement au marnage dans le grau de Port-Leucate.
- la présence des portes amplifie encore le rôle de frein joué par les graus et l'atténuation du signal de marée dans la lagune est réduite à 21.5% en présence des portes.

Concernant les variations de la hauteur d'eau liées aux variations de la pression atmosphérique :

- sur la période d'étude (du 20/09/2020 au 29/07/2021) les niveaux d'eau moyens affichent une variabilité saisonnière marquée avec des niveaux significativement plus élevés en automne/hiver (de l'ordre de 20 cm dans le grau de Port-Leucate) qu'au printemps/été (de l'ordre de 6 cm). Ainsi, les portes sont mises en place à une période de l'année où les niveaux moyens sont les plus élevés.

- l'impact du vent sur les variations des niveaux d'eau moyens est quantifiable avec les forts vents de secteur Nord-Ouest qui entraînent les masses d'eau de la côte vers le large et diminuent les niveaux d'eau moyens. Les vents forts de secteur Sud-Est qui ont tendance à ramener les masses d'eau du large à la côte et augmenter les niveaux moyens.
- l'impact des graus sur les variations plus basse fréquence de la hauteur d'eau dans la lagune est bien moins marqué que pour les ondes de marée. En l'absence des portes l'atténuation moyenne de la hauteur d'eau entre Port-Leucate et la lagune est de l'ordre de 93%.
- le passage des graus induit un déphasage de l'ordre d'une quinzaine d'heures, entre les extrema de hauteur d'eau dans la lagune et dans le grau de Port-Leucate. Ce déphasage est plus marqué pour les phases de vidange de la lagune.
- la présence des portes augmente significativement ce déphasage entre les signaux de hauteur d'eau dans la lagune et Port-Leucate, il est alors supérieur à la journée.
- la présence des portes induit deux phénomènes antagonistes : des niveaux d'eau moyens dans la lagune supérieurs (de plus de 5 cm en présence des portes qu'en leur absence) mais une atténuation des variations autour de ces niveaux moyens plus importante (de l'ordre de 46%). L'impact des portes sur l'augmentation du niveau moyen étant plus important que l'atténuation engendrée sur les variations de la hauteur d'eau, les extrema des niveaux d'eau dans la lagune sont légèrement plus importants (+ 5 cm) en présence des portes qu'en leur absence.
- lors du passage de dépressions, qui engendrent d'importantes entrées d'eaux marines dans la lagune, les niveaux d'eau dans la lagune vont avoir tendance à être plus hauts en présence des portes qu'en leur absence et le temps nécessaire pour vidanger ces eaux excédentaires peut être allongé de plus d'une demi-journée.
- la présence des portes augmente le risque de surcote notamment lors d'évènements pluvieux durant lesquels les eaux excédentaires (apports par les bassins versants et les précipitations directes sur la lagune) restent « bloquées » dans la lagune (dans le secteur proche des portes).

Les volumes échangés via le grau de Port-Leucate ont été calculés à partir des débits mesurés et les volumes totaux échangés entre la lagune et la mer ont été estimés à partir des variations de hauteurs dans la lagune. La part relative du grau de Port-Leucate dans les échanges totaux a ainsi pu être évaluée. Cette étude met en évidence :

- un déséquilibre entre les entrées/sorties par le grau de Port-Leucate qui a tendance à favoriser les entrées d'eaux marines. En l'absence des portes, les volumes entrants par ce grau sont 1.2 fois plus importants que les volumes sortants.
- La présence des portes réduit significativement les volumes échangés entre la lagune de Salses-Leucate et la mer par le grau de Port-Leucate et amplifie le déséquilibre entrées/sorties. Les volumes entrants diminuent de plus de la moitié et les volumes sortants de plus d'un facteur 7.
- Le grau de Port-Leucate joue un rôle prépondérant dans les échanges mer-lagune, en l'absence des portes il assure plus de 65% des entrées d'eaux marines et près de la moitié des sorties d'eaux saumâtres. Toutefois, la présence des portes modifie « le rôle » que joue chacun des graus dans ces échanges et en présence des portes, la part des sorties d'eaux par le grau de Port-Leucate devient largement minoritaire (moins du quart). Il n'est toutefois pas possible, à partir des données acquises dans le cadre de cette étude, d'estimer la part relative des deux autres graus au regard des volumes échangés. L'hypothèse peut toutefois être posée que les volumes échangés par le grau des conchyliculteurs, et notamment les volumes sortants, seraient

augmentés durant les périodes où les portes sont en place sur les graus de Port-Leucate et Port-Barcarès.

Les temps de renouvellement des eaux de la lagune en présence et en l'absence des portes ont été évalués afin d'estimer à dire d'expert l'impact possible de la présence des portes sur les cultures marines.

- Le temps de renouvellement des eaux par le grau de Port-Leucate a été évalué à 35 jours en l'absence des portes. En présence des portes, il ne peut être estimé et est supérieur à la durée de mise en place des portes (71 jours).
- Le temps de renouvellement de la lagune de Salses-Leucate par les trois graus est évalué à partir des variations de hauteurs d'eau dans la lagune. Il est estimé à 19 jours en automne/hiver en l'absence des portes. Comparativement aux lagunes méditerranéennes françaises, ce temps de renouvellement est caractéristique d'une lagune pour laquelle les échanges sont efficaces.
- En présence des portes, ce temps de renouvellement passe à 52 jours, soit un taux de renouvellement équivalent à celui de la lagune de Thau.

Les résultats de la présente étude montrent que la présence des portes a tendance à retarder la mise en équilibre entre les niveaux d'eau dans la lagune et en mer et notamment à limiter fortement les exports d'eaux. Ainsi, en présence des portes, les eaux douces continentales excédentaires apportées lors d'évènements pluvieux vont alors avoir tendance à résider plus longtemps dans la lagune.

A la période de l'année où les portes sont mises en place, les conditions hydrologiques (température, rayonnement global, apports d'eaux douces et de nutriments) sont favorables à la survie des contaminants microbiologiques (*E. Coli*) et potentiellement à la croissance de *Dinophysis*. Dans ce contexte, l'augmentation du temps de résidence des eaux dans la lagune de Salses-Leucate engendrée par la présence des portes pourrait augmenter le risque de contamination des coquillages en élevage.

Ainsi, les résultats de cette étude indiquent que la non remise en place des portes sur les graus de Port-Leucate et Port-Barcarès pourrait avoir un impact positif sur les risques de surcotes du fait d'une réduction des temps de vidange lors d'évènements pluvieux et sur les risques de contamination des coquillages en élevage dans la lagune de Salses-Leucate.

5 Références bibliographiques

Aminot A., Kerouel R. (2004). Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Ed. Ifremer.

BCEOM (1984). Etang de Salses-Leucate. Etude courantologique, échanges avec la mer. Aménagement touristique du Languedoc-Roussillon.

Burtchaell O. (2000). Les variations du niveau de l'étang de Thau- Etude des phénomènes de surcôtes-décôtes au sein d'un milieu lagunaire méditerranéen. Mémoire de maîtrise en Géographie, Université Paris1. 188p.

Cesmat L. (2002). Application du modèle hydrodynamique MARS-3D sur la lagune de Salses-Leucate. Rapport de stage de DEA, Université de la Méditerranée, Luminy. 38p.

Cesmat L. (2006). Etude des processus hydrodynamiques et écophysologiques de la dynamique d'une algue invasive : *Valonia aegagropila* (C. Agardh) dans la lagune de Salses-Leucate. PhD Thesis, Université Montpellier II. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2453/>

Di Lorenzo J.L. (1988). The overtide and filtering response of small inlet/bay systems. Notes and Coastal and Estuarine Studies 29, 24-53.

Fiandrino A., Giraud A., Robin S., Pinatel C. (2012). Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes et définition d'indicateurs hydrodynamiques associés. ODE/UL/LER/LR 12-35. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00274/38544/>

Fiandrino A., Ouisse V., Dumas F., Lagarde F., Pete R., Malet N., Le Noc S., de Wit R. (2017). Spatial patterns in coastal lagoons related to the hydrodynamics of seawater intrusion. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.006>

Mehta J., Ozsoy A.E, 1978. Inlet hydraulics. In Stability of Tidal Inlets Theory and Engineering (Brunn, P. Ed.) Elsevier Publishing Co., New York, NY 96pp.

Monsen, N. E., Cloern, J. E., Lucas, L. V, Monismith, S. G. (2002). The use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, 47(5), 1545–1553. <http://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>

Rivage (2015). 3^{ième} CONTRAT de l'étang de Salses-Leucate (2016-2020). 70p. + Fiches Action.

Serais O., Caillard E., Munaron D., Cimiterra N., Fiandrino A. (2021). Qualité du Milieu Marin Littoral. Bulletin de la surveillance 2020. Région Occitanie - Départements des Pyrénées Orientales, de l'Aude, de l'Hérault, du Gard. ODE/LITTORAL/LERLR/21.007. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00718/82982/>

Souchu P., Oger-Jeanneret H., Lassus P., Sechet V., Le Magueresse A., Le Bihan V. (2013). Dinophag. Programme de recherche sur Dinophysis dans les eaux littorales des Pays de la Loire. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00172/28368/>

Voineson G., Jan G. (2013). Notions fondamentales sur la marée. Journées REFMAR. http://refmar.shom.fr/documents/10227/146428/Voineson%26Jan_Journees-REFMAR-2013.pdf

Annexe 1 : Impact du vent sur la propagation de l'onde de marée dans la lagune de Salses-Leucate

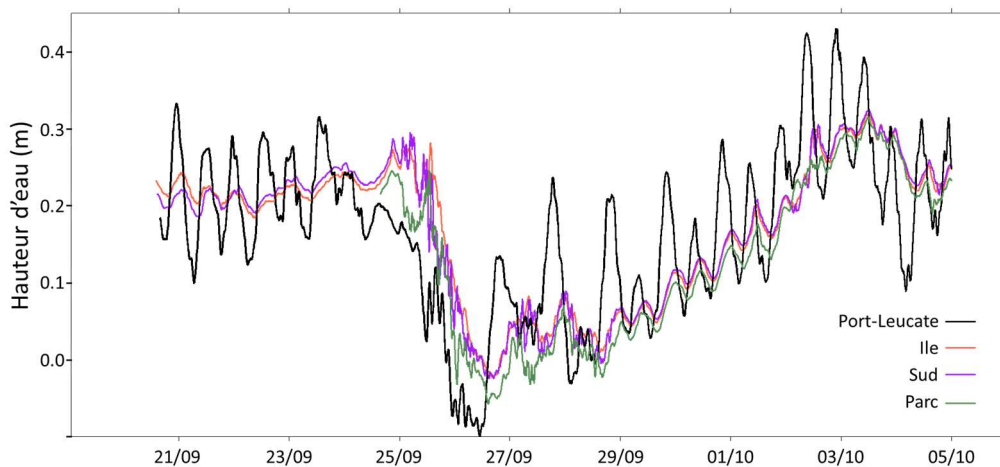


Figure 1.1 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant un événement du type 3 survenu entre le 24 et le 29 septembre (en l'absence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

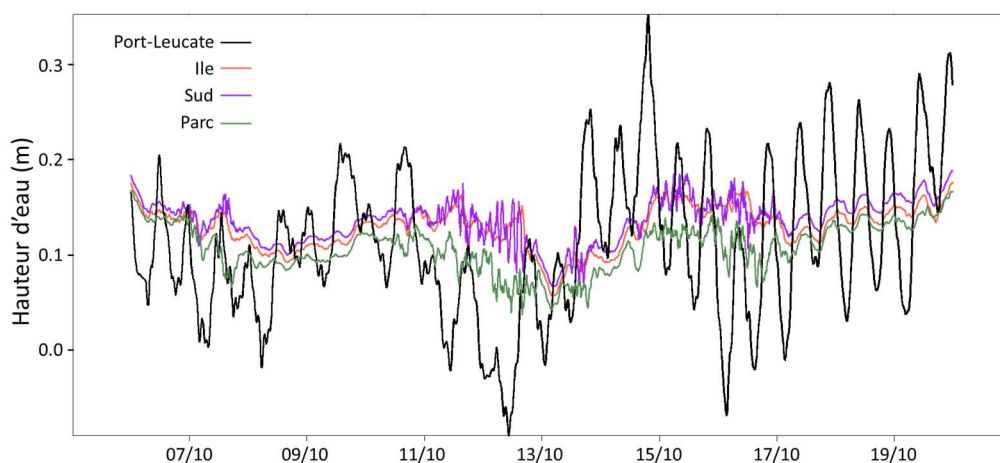


Figure 1.2 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant un événement du type 2 survenu entre le 9 et le 17 octobre (en présence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

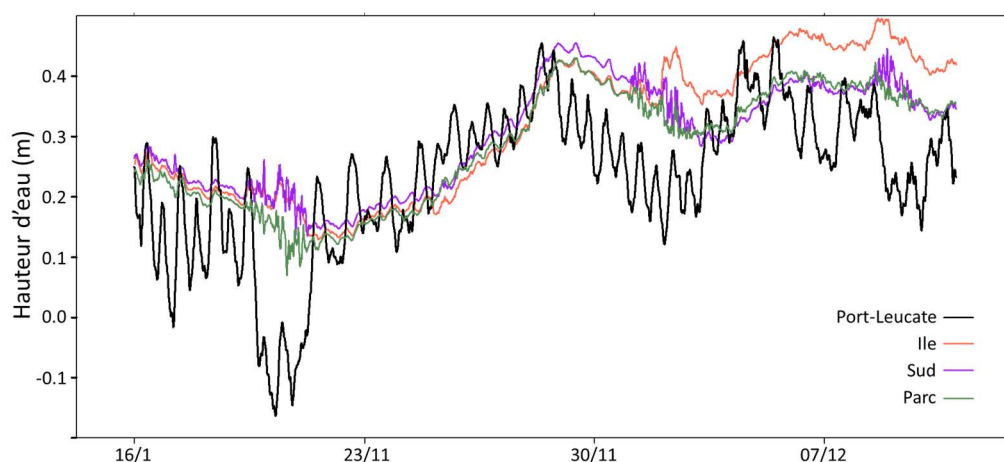


Figure 1.3 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant plusieurs événements de type 3 survenus entre le 18 novembre et le 10 décembre (en présence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

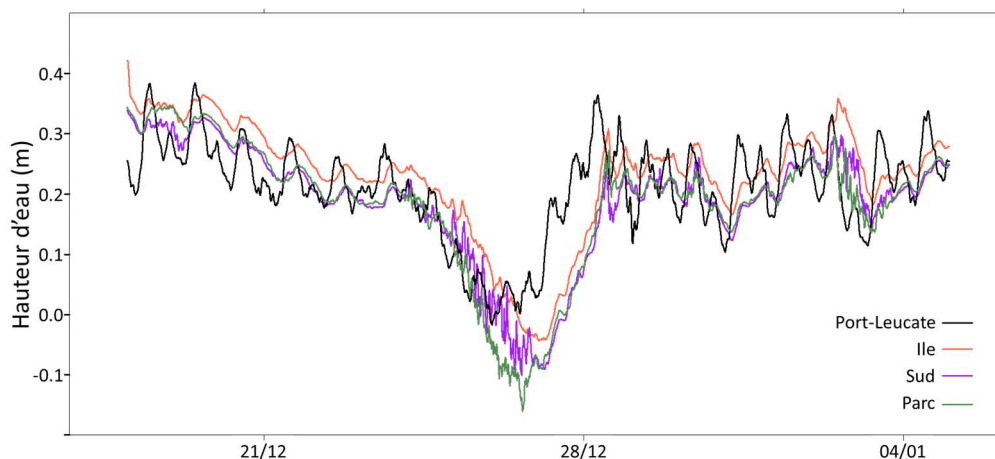


Figure 1.4 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant plusieurs évènements de type 3 survenus entre le 21 décembre 2020 et le 5 janvier 2021 (en l'absence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

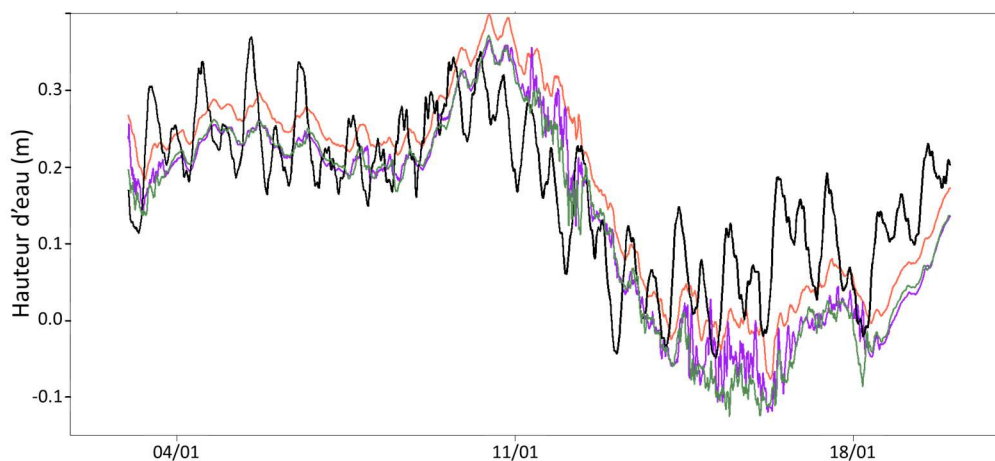


Figure 1.5 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant un évènement de type 2 survenu entre le 4 et le 16 janvier 2021 (en l'absence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.

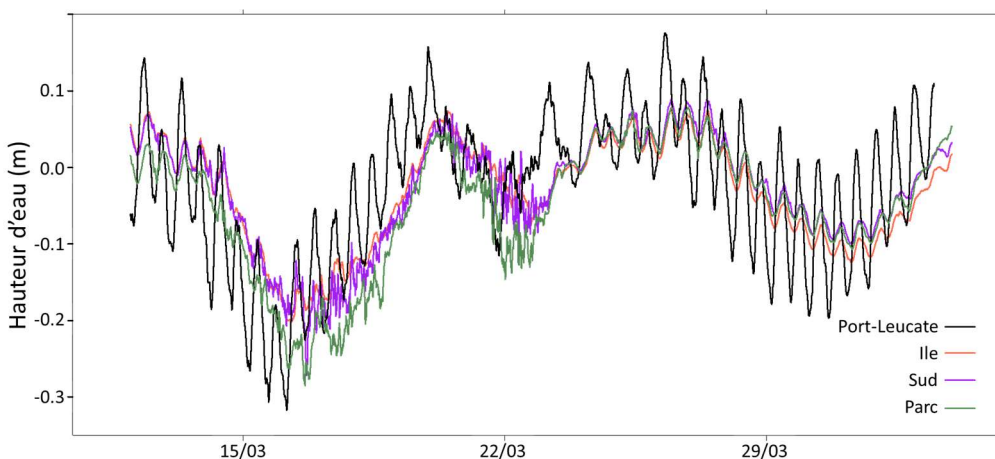


Figure 1.6 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées à la station de Port-Leucate et aux trois stations lagunaires sur la période encadrant un évènement de type 2 survenu entre le 13 et le 23 mars 2021 (en l'absence des portes). Un lissage des données sur 1 heure a été fait pour filtrer les variations très haute fréquence.