



Les Eaux de Mayotte

Rapport Modélisation

Etude de définition d'une usine de dessalement
sur Grand-Terre Lot 1



822C34

30/06/2024

Assurance qualité documentaire

| | |
|---------------------------------|--|
| Type du document | Compte rendu de relèvé |
| Objet du marché | Etude de définition d'une usine de dessalement sur Grand-Terre Lot 1 |
| Client | Les Eaux de Mayotte |
| N° de la proposition | 822C34 |
| Exail Reference | 822C34_Rapport_Modélisation.docx |
| Date de livraison client | 25/06/2024 |

Suivi des révisions

| Commentaire | Révision | Préparé par | Approuvé par | Date |
|-------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-------------|
| Version initiale | V1.0 | CCH | ABO | 13/12/2023 |
| | | | | |
| | | | | |

NON VALIDE

Table de matières

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUCTION | 5 |
| 1.1 | CONTEXTE GENERAL..... | 5 |
| 1.2 | CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE..... | 5 |
| 1.3 | LES MODELES HYDRODYNAMIQUES..... | 7 |
| 1.4 | LA VALIDATION D'UN MODELE HYDRODYNAMIQUE..... | 8 |
| 2. | MATERIEL ET METHODES | 10 |
| 2.1 | MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU LAGON DE MAYOTTE AVEC LA PLATEFORME CROCO (COASTAL AND REGIONAL OCEAN COMMUNITY MODEL)..... | 10 |
| 2.1.1 | <i>Equations</i> | 10 |
| 2.1.2 | <i>Schémas numériques</i> | 10 |
| 2.1.3 | <i>Choix numériques</i> | 12 |
| 2.2 | LES DONNEES..... | 13 |
| 3. | VALIDATION | 3 |
| 3.1 | VARIABILITE DU NIVEAU D'EAU..... | 3 |
| 3.2 | ELLIPSES DE DISPERSION DES COURANTS MARINS..... | 5 |
| 3.3 | COURANT MOYEN..... | 7 |
| 3.4 | VARIABILITE TEMPORELLE DES VITESSES..... | 11 |
| 4. | DESCRIPTION DE LA CIRCULATION HYDRODYNAMIQUE DANS LE LAGON DE MAYOTTE | 17 |
| 4.1 | VITESSE INSTANTANEE AU COURS DU CYCLE DE MAREE..... | 17 |
| 4.2 | VITESSE MOYENNE..... | 18 |
| 5. | CONCLUSION | 20 |
| 6. | BIBLIOGRAPHIE | 21 |

NON VALIDE

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Circulation générale dans l'Océan Indien (Schott et al., 2009) | 6 |
| Figure 2: Grille Arakawa (Rajpoot et al. (2012))..... | 11 |
| Figure 3: Différence entre les coordonnées cartésiennes et les coordonnées sigma..... | 11 |
| Figure 4: Campagnes utilisées pour la validation du modèle et mouillages associés | 1 |
| Figure 5: Représentation de l'amplitude et de la phase des ondes M2 et S2. La couleur des cercles indiquent les valeurs obtenues par les données in-situ mesurées en ces points, les couleurs sur la carte sont les résultats du modèle | 4 |
| Figure 6: Comparaison de l'évolution du niveau d'eau mesuré et modélisé..... | 5 |
| Figure 7: Ellipses de dispersions des vitesses modélisée (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues)..... | 5 |
| Figure 8: Zoom spatial (Nord-Est) sur les ellipses de dispersion des vitesses modélisées (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues)..... | 6 |
| Figure 9: Zooms spatiaux (Sud) sur les ellipses de dispersion des vitesses modélisées (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues) | 7 |
| Figure 10: Courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparées aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la vitesse maximale (couleur « jaune » | 8 |
| Figure 11: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la v..... | 9 |
| Figure 12: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la v..... | 10 |
| Figure 13: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues) | 11 |
| Figure 14: Amplitude et Phase des ondes M2 et S2 de la vitesse : La couleur des cercles indiquent les valeurs obtenues par les données in-situ mesurées en ces points, les couleurs sur la cartes sont les résultats du modèle | 12 |
| Figure 15: Evolution de la vitesse aux mouillages MN1, MN2, MS et MC dans le lagon Nord-Est | 13 |
| Figure 16: Evolution de la vitesse tidale aux mouillages C1, C2 et BA dans le lagon Nord-Est..... | 13 |
| Figure 17: Evolution de la vitesse aux mouillages MN1, MN2, MS et MC dans le lagon Nord-Est | 14 |
| Figure 18: Variabilité de la circulation hydrodynamique au cours du cycle tidal | 17 |
| Figure 19: Variabilité de la circulation hydrodynamique moyenne..... | 18 |

Liste des tableaux

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GENERAL

Dans le cadre de l'étude de définition du dessalement d'eau de mer sur Grande Terre, Exail est en charge du lot 1 concernant la réalisation de mesures courantologiques, dans le but de collecter des données sur les différents sites envisagés et la modélisation des processus océaniques assurée par Cristèle Chevalier de l'Université d'Aix Marseille via Protisvalor.

Dans le cadre de ce projet, EXAIL a en charge une campagne de mesure de 1 ans en 8 stations réparties au niveau des 3 sites pressentis pour l'implantation d'une usine de dessalement d'eau.

En parallèle, un modèle de courantologie est mis au point par Cristèle Chevalier et son équipe, de l'Université Aix-Marseille en se basant sur un modèle de vent grande échelle, un modèle de houle et enfin un modèle de courantologie 3D présentant en compte l'effet des forçages, du vent, de la houle mais aussi de la marée. Son but est de participer à la validation des points de prélèvement et de rejet en lien avec les études environnementales confiées à CREOCEAN.

Pour chaque site, il est prévu la réalisation de 14 scénarii d'un mois pour chaque site et sur une année standard (marée, vent et houle) en prenant en compte la saison humide / saison des Alizées, ainsi que le cycle vives eaux / mortes eaux, soit des scénarii de 15 jours. Ces résultats de modèle devaient être fournis à l'issue de la campagne de mesures. Des simulations de dispersion de la saumure sont également prévues, cela pour une capacité de traitement prévisionnelle de l'installation visée d'environ 9 000 m³/j et 10 000m³/j, soit 375 m³/h et 420m³/h. Il a été souhaité en priorité l'étude la dispersion du panache pour les deux privilégiés sites Ironi Be et Mtsangabeach. Plusieurs hypothèses en termes de localisation et de débit ont été modélisées.

Cependant les résultats de modèle de dispersion de saumure ont été souhaitées en avance de phase et la campagne de mesures a commencé avec retard du fait d'un temps d'acheminement du matériel de 5 mois au lieu de 6 semaines comme initialement prévu par les transporteurs. De ce fait, le modèle courantologie sur l'ensemble du lagon a été mis au point puis validé avec des données antérieures (données issues de campagnes du SHOM de 1980 à 2000, données issues de deux campagne du BRGM : 2007 et 2008, données issues de la campagne de Cassagec pour le Parc Marin en 2020 et 2021...) et notamment une campagne relativement complète réalisée par l'IRD en 2006 sur 15 jours).

Le présent rapport constitue la présentation du modèle et de sa validation, ainsi que les résultats de l'étude de la dispersion du panache selon plusieurs hypothèses sur l'année complète 2006. La modélisation des courants marins de l'année 2022 a aussi était réalisée et celle de l'année 2023 est en cours, mais ne pourra pas être terminée avant avril 2024 en l'absence de données de forçages. Les 14 scénarii ont aussi été réalisés. Il est prévu par la suite un raffinement du modèle au niveau des 3 sites d'études (Longoni, M'Tsangabeach et IroniBe) afin d'assurer une meilleure représentation de la dispersion de la saumure.

1.2 CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

La circulation hydrodynamique intra-lagonaire dépend de plusieurs paramètres : la marée, la houle et les courants océaniques de grande échelle, et la bathymétrie du lagon.

Les courants océaniques : L'archipel des Comores est situé sur une extension du courant équatorial sud qui

quand il arrive au niveau des côtes africaines, se sépare d'une part en un courant dirigé vers le nord, et un courant fort vers le sud dans le canal du Mozambique. Autour de Mayotte, la circulation est donc globalement dirigée du nord vers le sud, et l'île se trouve dans une zone tourbillonnaire générée par le canal du Mozambique (voir Figure 4).

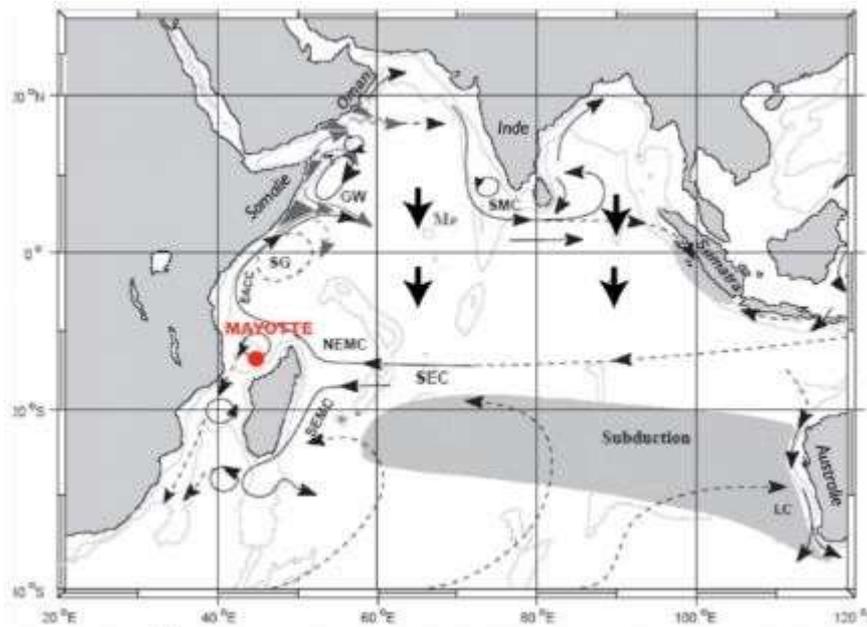


Figure 1: Circulation générale dans l'Océan Indien (Schott et al., 2009)

Cependant, les courants océaniques de grande échelle ne jouent pas un grand rôle dans la circulation intra-lagonaire vu la faible échelle temporelle de l'étude (Gourbesville and Thomassin (2000)). En effet, au vue de la pente continentale et du récif corallien, les échanges océan-lagon sont faibles et la circulation intra-lagonaire est notamment due aux marées, aux vents et au déferlement des vagues sur le récif (C. Chevalier et al. (2017)).

La marée : La marée désigne la variation périodique du niveau de la mer sur le principe de la loi de gravitation universelle de Newton sous l'effet de la position des astres. Elle joue un rôle dans la circulation intra-lagonaire car elle induit des courants alternatifs quand l'eau monte/descend. Ces courants peuvent être particulièrement forts dans les passes du récif barrière et par-dessus le récif. A Mayotte, la marée est principalement semi-diurne, avec des variations de marée de vive-eau et de morte-eau. Cela signifie que l'on observe chaque jour deux basses mers et deux pleines mers d'amplitudes différentes.

La houle : La houle est une oscillation régulière de la surface de la mer. Elle est entraînée principalement deux types de courants : les courants parallèles au récif et les courants perpendiculaires.

Les premiers concernent le phénomène de dérive littorale mais ne jouent pas un grand rôle dans la circulation intra-lagonaire (Y. De La Torre, 2008). En revanche, les courants arrivant perpendiculairement à la côte peuvent jouer un rôle important. Les vagues qui déferlent sur le récif barrière créent un courant perpendiculaire au récif vers l'intérieur du lagon (Symonds et al., 1995).

La bathymétrie : La morphologie du fond du lagon et la géométrie du récif et des passes joue beaucoup sur la circulation. Les zones peu profondes ont tendance à avoir un gros gradient de vitesse, tandis que les eaux plus profondes ont plutôt tendance à ralentir le courant.

Le lagon de Mayotte est notamment caractérisé par un double récif : environ 210 km de récif frangeant le long de l'île principale (Grande-Terre), et un récif barrière segmenté d'environ 140km qui délimite le lagon peu profond de l'océan au large (C. Chevalier et al. (2017)).

1.3 LES MODELES HYDRODYNAMIQUES

Différents modèles numériques peuvent être utilisés pour décrire la circulation hydrodynamique au sein du lagon. Parmi les modèles hydrodynamiques d'océanographie, les plus connus en France, nous pouvons citer :

- Le modèle Croco, plateforme communautaire français de modélisation hydrodynamique côtière, ce modèle aux différences finies est un des derniers modèles hydrodynamiques créés, il s'inspire des différents avantages des modèles plus traditionnels (à savoir Mars, Roms) ;
- Le modèle Mars 3D, ancien modèle de l'IFREMER, il a souvent été utilisé pour des études sur les côtes françaises. Depuis peu ce modèle aux différences finies est remplacé par Croco et ne sera plus développé à l'IFREMER
- Le modèle Télémac, modèle aux éléments finis qui permet des raffinements de maillage en certains points. Ce modèle contient aussi une boîte à outil clé en main, il est souvent le préféré des bureaux d'étude, d'une part par sa capacité de raffinement du maillage, mais aussi par ses boîtes à outils qui sont proposées et qui offrent un éventail de possibilités. Toutefois, ce type de modèle « clé en main » est complexe à modifier et n'a pas été validé (d'un point de vue recherche) pour la modélisation hydrodynamique des lagons et à ma connaissance, certains processus tels que le flux cross-récifal engendré par le déferlement de la houle n'ont pas été prévus pour le moment et pourraient nécessiter un développement.
- Nous pouvons encore citer les modèles hydrodynamique Symphonie, créé par le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse, assez proche de Croco et de Mars 3D ; le modèle hydrodynamique Némohydrodynamique, qui est plus particulièrement un modèle hydrodynamique hauturier et n'est pas complètement adapté aux situations côtières tidales...

En dehors des modèles hydrodynamiques de circulation océanique, il existe des modèles de mécanique des fluides, tels que Fluent, Ansys ... Ces modèles sont parfaits pour décrire la mécanique des fluides dans des zones petites, ne faisant pas d'hypothèse sur la nature des courants, ils s'avèrent coûteux en temps de calcul et ne peuvent pas être utilisés pour modéliser la circulation à l'échelle d'un lagon. De même les modèles océaniques côtiers cités précédemment (Croco, Mars3D ou Télémac) possèdent aussi une version non hydrostatique qui, proche des modèles de mécanique des fluides, permettrait de déterminer les flux verticaux et la dispersion issue de canalisation. Toutefois, comme précédemment, ces modèles sont trop coûteux en temps pour espérer réaliser une simulation à l'échelle du lagon.

1.4 LA VALIDATION D'UN MODELE HYDRODYNAMIQUE

Les modèles hydrodynamiques sont basés sur des équations de mécanique du fluide exactes. Toutefois, ces équations sont exactes à l'échelle moléculaire. Or nos mailles sont plus grossières et atteignent quelques mètres voire quelques centaines de mètres. Il est donc nécessaire de faire des hypothèses sur ce qui se passe à l'intérieur des mailles (mélange lié au mouvement sous maille : vent local, bateau, poissons, récif de corail...). Ceci est souvent modélisé à l'aide d'un terme appelé viscosité turbulente qui se distingue de la viscosité moléculaire par le fait qu'il correspond aux mouvements sous maille du fluide. Une autre source d'erreur est que même si les équations sont exactes, elles sont influencées par ce qui est aux frontières du domaine étudié : frontières latérales (quelle quantité d'eau pénètre dans le domaine ?) ou frontières horizontales avec le fond (frottement) ou l'atmosphère (vent, etc ...).

Sachant cela, la validation porte essentiellement sur la comparaison choisie entre données de terrain (mesures in-situ ou images satellite) et résultats du modèle en des points stratégiques, par exemple, là où s'effectue les principaux échanges : l'eau rentre, ou sort.

En outre, les données in-situ ne sont pas parfaites, les appareils ont un certain biais, des erreurs inhérentes, un bruit. Elles sont représentatives d'un point précis, alors que le modèle représente une zone. Typiquement, un courantomètre a une erreur « fournisseur » de l'ordre du centimètre par seconde, en pratique, cela peut atteindre 5 cm/s. Pour limiter les erreurs, plusieurs possibilités sont envisageables : faire des mesures dans un endroit avec un courant fort ce qui relativise cette erreur ou faire une analyse sur du long terme pour moyenniser ou analyser un signal que l'on sait périodique comme la marée. Enfin, pour compenser la variabilité locale, les résultats du modèle sont utilisés pour comprendre comment pourrait évoluer les données. Il est aussi parfois nécessaire d'utiliser le « bon sens » du physicien pour comprendre certaines variabilités ou certaines erreurs...

La validation doit se faire en deux temps, d'une part de façon qualitative puis de façon quantitative. La validation qualitative est une validation indispensable pour assurer une modélisation correcte du fonctionnement globale du système modélisé et pour cerner les points à améliorer (et ou les points où rajouter des mesures si nécessaires). La validation quantitative permettra de mesurer la validité du modèle et permettra de visualiser les progrès réalisés par l'amélioration de différents points.

Les paramètres à valider dépendent de ceux que l'on peut connaître et mesurer, et de ceux que l'on peut calculer. Par exemple, la viscosité turbulente ou les courants sous mailles sont indispensables dans les modèles hydrodynamiques, mais ils sont complexes à mesurer, difficiles à obtenir et il n'y en a pas sur le lagon de Mayotte. A contrario, vitesse et niveau d'eau sont à la fois calculés par le modèle et possibles à mesurer. Les paramètres à valider sont aussi les paramètres que l'on juge les plus caractéristiques de la circulation hydrodynamique étudiée. Dans le cas du lagon de Mayotte, les débits des fleuves sont faibles et la salinité est faiblement variable. Quant à la température, elle dépend plus des effets du réchauffement journalier que de la circulation dans le lagon. Nous ne nous focaliserons donc pas sur la validation de ces paramètres, mais nous nous concentrerons sur le niveau d'eau et le courant. Il faut toutefois souligner que, dans les lagons, la discontinuité de la topographie (récif corallien abrupte par exemple) peut fortement moduler l'orientation de la vitesse, alors que le flux le long de la trajectoire demeure constant. Nous choisirons donc de valider la vitesse d'une part, en fonction de son intensité dans la direction principale et d'autre part en fonction de son orientation afin de relativiser une orientation différente du fait de la bathymétrie.

Enfin, par manque de mesures, il est clairement complexe de valider tous les points d'un modèle. Comme les équations de bases sont exactes, si nous ne faisons pas d'hypothèse en désaccord avec la physique reproduite, nous pouvons considérer que si le modèle est bon en plusieurs points, dispersés dans le domaine, cette validité peut se généraliser à l'ensemble du modèle. Lors de cette validation, nous devons nous attacher à vérifier que le modèle reproduise les grands processus de la circulation hydrodynamique. Ici, les principaux processus sont la marée, l'effet de la houle déferlant sur le récif barrière et le vent.

Parfois les données mesurées ne sont pas simultanées avec les modélisations réalisées. Pour pouvoir utiliser les données en dehors des mesures, nous comparons statistiquement les données aux sorties de modèle, par exemple avec des ellipses de dispersion ou des courants moyens : en effet, nous considérons que même si les conditions ne sont pas identiques au jour près, leur variabilité est relativement similaire. Enfin et surtout, même avec un décalage dans le temps, nous pouvons valider le signal de marée qui est un phénomène reproductible. Si nous avons un signal (courant, niveau d'eau) suffisamment long, nous pouvons déconvoluer les différents signaux issus des ondes de marées (les plus classiques étant les ondes semi-diurnes issues de l'effet de la lune (M2), du soleil (S2) ou des ondes diurnes telles que K1. L'étude de ces ondes fournissent la phase et l'amplitude.

Un mois minimum est nécessaire pour déterminer les principales ondes de marée, plus longtemps permet d'affiner cette connaissance. Tandis qu'avec les données du modèle, ces ondes peuvent être précisément déterminées, si les signaux mesurés sont un peu courts pour faire précisément une telle analyse, nous devons trouver une autre stratégie. Ici, nous nous appuyons sur les données du marégraphe du SHOM, pour déterminer plus précisément les ondes en considérant 1) que le rapport des amplitudes entre les différentes ondes sont similaires dans tout le domaine et 2) que le déphasage avec le marégraphe est constant pour toutes les ondes. Bien que cela donne une bonne idée des composantes principales de marée, il s'agit d'une hypothèse relativement forte et est à l'origine d'erreur dans le calcul de ces paramètres dans les mesures.

Ainsi, pour valider le modèle, nous portons une grande attention aux amplitudes et déphasage des ondes M2 et S2 de marée pour le niveau d'eau et les vitesses et cherchons à approcher au mieux les résultats du modèle avec l'ensemble des données de toutes les campagnes, tout en sachant les erreurs inévitables à une telle étude. Nous comparerons les valeurs moyennes et les ellipses de dispersion.

Fréquemment, les validations proposées sont qualitatives, plus rarement, une étude quantitative des erreurs est réalisée. ... Lorsqu'elle existe, la validation repose sur quelques mouillages : généralement entre 5 et 6 mouillages qui ont été choisis spécifiquement pour le modèle en des points clefs de la circulation (et réalisés par des spécialistes du domaine). Il s'agit alors généralement de réaliser des comparaisons mesures/modèle au mêmes instants.

Ici, nous tentons d'assurer une validation qualitative et quantitative, malgré la grande diversité des mesures (dans le temps, l'espace et le traitement). Les écarts modèle/mesure dépendent à la fois de la qualité du modèle et de la qualité des mesures et de leur positionnement. Il est réellement difficile de donner une gamme de valeur pour caractériser finement les qualités du modèle.

2. MATERIEL ET METHODES :

2.1 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU LAGON DE MAYOTTE AVEC LA PLATEFORME CROCO (COASTAL AND REGIONAL OCEAN COMMUNITY MODEL)

Dans le cadre de ce projet, nous utiliserons le modèle Croco qui dispose d'une version adaptée à la modélisation des lagons.

CROCO est un modèle hydrodynamique côtier qui est construit sur la base du modèle ROMS (Regional Oceanic Model System) et qui possède un module « lagon ». L'objectif principal de CROCO est de résoudre les équations de base de la mécanique des fluides sur de très petites échelles (surtout dans les zones côtières), et de modéliser les interactions avec de plus grandes échelles. Il est bien adapté pour notre problème car il permet de modéliser précisément la circulation au sein du lagon tout en prenant en compte au bord du domaine des données de marée, houle, vents... qui sont calculés à l'échelle de la planète entière.

2.1.1 Equations

Pour cela, ce modèle considère que les écoulements océaniques répondent au principe de la dynamique et sont régis par les équations de Navier Stokes. Les équations primitives qui sont résolues par le code CROCO sont des simplifications des équations de base de Navier-Stokes basées sur les hypothèses suivantes (S.Jullien and Theetten (2022)) :

- L'hypothèse d'hydrostaticité : On suppose que les mouvements verticaux sont négligeables devant les mouvements horizontaux. Cette approximation permet la simplification des équations de mouvement car on ne calcule pas explicitement les accélérations verticales dont les échelles temporelles et spatiales sont petites. La vitesse verticale se déduit simplement de l'équation de continuité.
- L'hypothèse d'incompressibilité : On suppose que la masse volumique du fluide ne varie pas avec la pression. On a donc $\nabla \cdot \vec{v} = 0$.
- L'approximation de Boussinesq : On suppose que la densité de l'eau varie peu dans le temps et l'espace autour d'une valeur moyenne. On a donc $\rho(x, y, z, t) = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t)$. Cela implique que les variations de densité pourront être négligées dans les équations de Navier-Stokes à l'exception de la force de gravité.

2.1.2 Schémas numériques

Ces équations sont résolues selon un schéma de résolution numérique de différences finies, dont les maillages de discrétisation en temps et en espace sont décrits ci-dessous.

Discrétisation spatiale

Horizontalement, les équations sont discrétisées sur une grille d'Arakawa de type C (AKIO Arakawa (1977)). Sur ce type de maillage, les vitesses horizontales (points v) sont calculées au centre des faces verticales, les vitesses verticales (points u) sont calculées au centre des faces horizontales et les quantités physiques (traceurs) telles que la température ou la salinité (points t) sont calculées au centre de chaque cellule, comme

décrit sur la Figure 5.

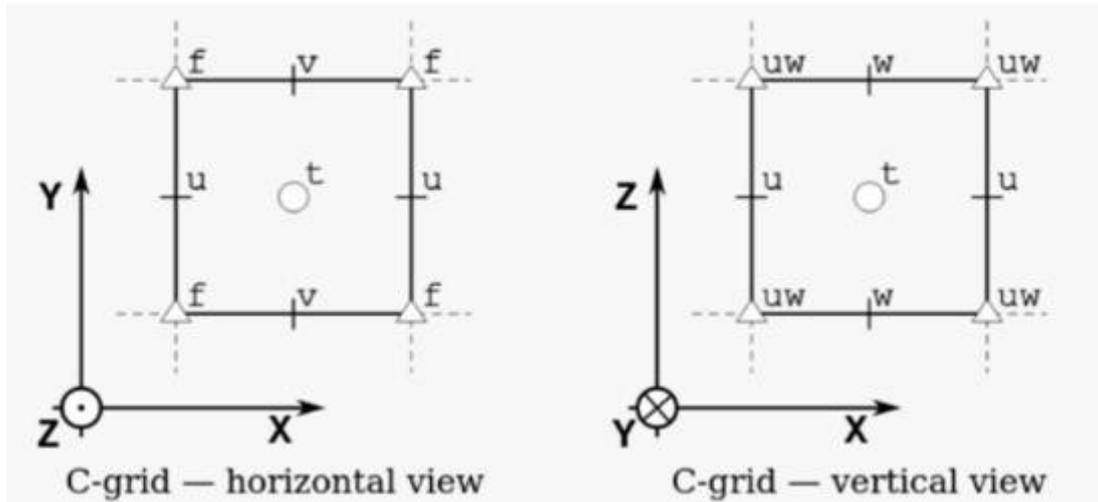


Figure 2: Grille Arakawa (Rajpoot et al. (2012))

Sur la verticale, le modèle CROCO utilise des coordonnées de type sigma généralisées. La différence avec des coordonnées cartésiennes classiques est que les coordonnées sigma permettent de suivre la bathymétrie qui n'est pas toujours régulière. Le 0 correspond à la surface de l'eau, puis on a les différents niveaux de profondeur comptés positivement. Ces coordonnées sont illustrées dans la Figure 6.

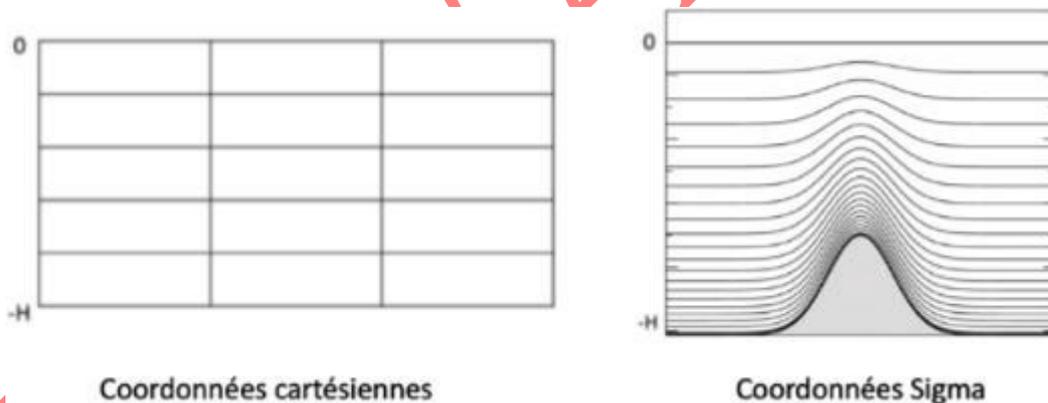


Figure 3: Différence entre les coordonnées cartésiennes et les coordonnées sigma

Discrétisation temporelle

Le code CROCO est discrétisé en temps selon un schéma prédicteur-correcteur du troisième ordre (que l'on appelle LFAM3 (S.Jullien and Theetten (2022))). Les modes barotrope (dynamique 2D rapide) et barocline (dynamique 3D lente) sont calculés séparément. Entre deux modes barocline, le 2D (barotrope) s'exécute un certain nombre de fois égal au rapport entre le pas de temps du mode 3D et le pas de temps du mode 2D. Les vitesses moyennées sur la verticale (donc en 2D) sont moyennées entre chaque pas de temps barocline et injectées dans le modèle 3D. Pour assurer la stabilité de ce calcul, le schéma temporel est basé sur la condition CFL (Courant-Friedrick-Levy). Ce schéma stipule qu'un processus physique (une onde longue de gravité) ne se déplace pas de plus d'une maille d'espace à chaque pas de temps. Cette discrétisation en temps, qui permet de gagner en temps de calcul, est détaillé dans Shchepetkin and McWilliams (2005).

2.1.3 Choix numériques

Pour limiter l'impact des conditions aux frontières, le domaine s'étend de 44.9 à -45.35 Est et de -12.6 à -13.7 Sud. Le domaine est discrétisé avec des mailles carrées de 250m, ce qui fait un maillage 281 par 213. La bathymétrie provient des données Lidar fournies par le Parc Naturel Marin de Mayotte. Sur la verticale, il a été décidé 12 mailles avec un raffinement en surface et au fond.

Le récif corallien peut alternativement être couvert (marée haute) et se découvrir à marée basse. Pour le modèle spécifique du lagon de Mayotte, les forçages de marée (onde M2 et S2) et de vent ont été pris en compte ainsi que l'impact de la houle déferlant sur le récif barrière sur le flux entrant. Ainsi, aux frontières sont imposées la marée et une contrainte de radiation modélisant le déferlement au niveau du récif barrière et en surface. Le stress lié au vent est représenté par un frottement de surface. Les fleuves et leur débit ont été introduits. L'année 2006 (vent, houle, débits des fleuves de 2006) a été modélisée pour la validation.

Plusieurs tests de sensibilité ont été réalisés pour déterminer le choix du modèle de turbulence et de diffusivité. Les tests présentés ici sont basés sur un modèle de longueur de mélange à une équation.

2.2 LE MODELE DE HOULE : SWAN

Pour déterminer la houle dans le lagon, nous devons utiliser un modèle de propagation. Nous optons pour le modèle Swan, développé par l'Université Technique de Delft (TU Delft). Nous l'utiliserons pour propager dans le lagon les houles du large qui servent de condition aux limites.

Swan est un modèle de houle dit de troisième génération, permettant de propager des houles en zones côtières, lacs et estuaires à partir de conditions de vent, de houles au large et de la bathymétrie. Il prend en compte (Table 1) :

- La génération par le vent
- Les principaux processus de propagation de la houle :
 - Propagation
 - Réfraction due aux variations spatiales des fonds et des courants
 - Shoaling (gonflement des vagues dû aux variation spatiales des fonds et des courants)
- Les principaux processus de dissipation de la houle :
 - Moutonnement
 - Déferlement

Pour cela, ce modèle, se base sur un maillage aux éléments finis destructurés qui permet de représenter correctement la bathymétrie et le trait de côte. Il se base sur des conditions aux limites au bords du domaine et sur les conditions de vent. Puis, il détermine sur le domaine d'étude :

- Le spectre d'état de mer

- La hauteur significative, période de pic, période moyenne
- La direction de la houle et la dispersion directionnelle ;
- Le pourcentage de déferlement

Table 1 : Configuration du modèle Swan pour l'étude du lagon de Mayotte.

| | |
|-----------------------------|---|
| Version du modèle | SWAN 41.20 |
| Quadruplets | excluded |
| Bottom Friction | (Variable roughness length scale of the bottom) |
| Whitecapping | Komen et al., 1984 |
| Boundary wave spectra shape | JONSWAP |
| Breaking | constant breaker index, $\gamma = 0.73$ |
| Directional grid | 0° to 360° , 36 directions |
| Wave frequency grid | 0.04 to 1.00 Hz, 24 frequencies |
| Triads | included |
| Diffraction | excluded |
| Computational domain | 281x213 computational nodes |
| | LON: 44.7 °E, 45.5 °E |
| | LAT: 12.4 °S, 13° S |
| Bathymetry | SHOM |
| Time and Spatial mode | Stationary 2-dimensional |
| Boundary conditions | Jonswap |
| provided by NOAA WW3 | NNW boundary, Copernicus, ERA5 |

2.3 LES DONNEES

A Mayotte, les campagnes de mesures s'étalent sur près de 40 ans de 1985 à 2023. Elles ont été réalisées par différents acteurs, notamment, le SHOM, le BRGM, l'IRD, Cassagec et Exail pour les dernières, en cours. Nous disposons de la plupart des données en format numérique, seules les données du BRGM en 2007 n'ont pas pu être récupérées en format numérique et nous ne disposons pas de leur rapport. Excepté pour les données de Exail, la plupart de ces données sont de courtes durées (souvent entre 10 et 15 jours).

Parmi ces données, 4 séries (MN1, MN2, MS, MC) ont été réalisés de façon simultanée sur une quinzaine de jours en 2006. Il s'agit des données provenant de courantomètres ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) mouillés lors de la campagne réalisée par l'équipe CYROCO de l'IRD en novembre 2006. Cette campagne avait comme objectif de caractériser la qualité et la dynamique des eaux lagunaires. Ainsi, des mesures physiques et biologiques avait été réalisées pour déterminer la structure verticale d'une colonne d'eau,

analyser la diversité phytoplanctonique, estimer le flux échangé à l'interface eau-sédiment et caractériser la circulation. Bien que ces mouillages soient positionnés dans le lagon Nord-Est, ils ont l'intérêt majeur d'être simultanés et bien positionnés (au niveau des principaux échanges océan-lagon). Ils donc sont importants pour la validation. En attendant les données de Exail de 2023, nous avons donc choisi de modéliser l'année 2006 pour valider le modèle.

NON VALIDÉ

Table 2 : Tableau récapitulatif des données historiques

| Année | Auteur | Période et durée | | | POSITION GPS | | Point de Mouillage | Paramètres mesurés | Remarques |
|-------|----------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|---|--------------------------|
| | | Début | fin | Nombre de jours | Latitude (Sud) | Longitude (Est) | Mouillage | | |
| 2022 | Cassagec | 4/3/22 09:00 | 19/3/22 08:00 | 15.0 | -12.8578 | 45.2083 | station 1 (C1) | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C | |
| | | 8/2/22 09:00 | 24/2/22 10:00 | 16.0 | -12.7185 | 45.1365 | station 1 (C2) | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C | |
| | | 30/11/21 | 29/12/21 | 30.0 | -12.7820 | 45.2582 | | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | Données perdues/absentes |
| 2020 | | 12/03/2020 12:00:00 | 28/04/2020 13:20:00 | 47.1 | | | Houle | Données erronées | |
| 2017 | SHOM | 30/6/17 00:00 | 42919 | 3.0 | -12.0388 | 45.1418 | | Elévation de la surface libre Wave cycle pressure measurements Wave cycle AST measurements wave energy frequency-direction spectra computed from AST. U. V measurements wave energy frequency-direction spectra computed P. U. V measurements wave energy frequency spectra computed from free surface AST measurements wave energy frequency spectra computed from bottom pressure measurements Hm0.Tp. PeakDirSpr. MeanDir. PeakDir.PeakDirAST | |
| | | 30/06/2017 | 06/07/2017 | 7.0 | -12.9964 | 45.1778 | | Elévation de la surface libre Wave cycle pressure measurements Wave cycle AST measurements wave energy frequency-direction spectra computed from AST. U. V measurements wave energy frequency-direction spectra computed P. U. V measurements wave energy frequency spectra computed from free surface AST measurements wave energy frequency spectra computed from bottom pressure measurements Hm0.Tp. PeakDirSpr. MeanDir. PeakDir.PeakDirAST | |

| | | | | | | | | |
|------|--------|----------------|----------------|------|-----------|----------|-----|---|
| 2007 | BRGM | 17/4/07 10:22 | 18/5/07 15:42 | 31.2 | -12.77156 | 45.08299 | MT | courant intensité (cm/s) courant direction température °C turbidité (NTU) oxygène (micromol/l) oxygène saturation % profondeur sonde (m) salinité (PSU) Profondeur totale 20 m (marée basse vives eaux) |
| | | 2/5/07 14:42 | 18/5/07 10:02 | 15.8 | -12.8347 | 45.09927 | CH | Profondeur courant intensité courant direction température turbidité oxygène (comp sal) profondeur salinité vrai Profondeur 22 m (marée basse vives eaux) |
| 2006 | CYROCO | 11/11/06 07:00 | 23/11/06 08:00 | 12.0 | -12.6423 | 45.1223 | MN1 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C |
| | | 11/11/06 09:00 | 23/11/06 09:00 | 12.0 | -12.6373 | 45.1401 | MN2 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C |
| | | 12/11/06 10:00 | 23/11/06 09:00 | 11.0 | -12.779 | 45.2461 | MS | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C |
| | | 13/11/06 09:00 | 21/11/06 09:00 | 8.0 | -12.6658 | 45.2031 | MC | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction température °C |
| 2005 | BRGM | 19/2/05 11:10 | 5/3/05 11:39 | 14.0 | -12.76227 | 45.27158 | BA | Vitesse courant Direction courant Température Conductivité Pression Turbidité Oxygène Salinité Pression atm Profondeur |
| | | 5/3/05 16:00 | 23/3/05 10:30 | 17.8 | -12.82089 | 45.29581 | PA | Vitesse courant Direction courant Température Conductivité Pression Salinité Pression atm Profondeur |

| | | | | | | | | | |
|------|------|---------------|---------------|------|-----------|----------|----|---|--|
| 2005 | BRGM | 19/2/05 11:10 | 5/3/05 11:39 | 14.0 | -12.76227 | 45.27158 | BA | Vitesse courant Direction courant Température Conductivité Pression Turbidité Oxygène Salinité Pression atm Profondeur | |
| | | 5/3/05 16:00 | 23/3/05 10:30 | 17.8 | -12.82089 | 45.29581 | PA | Vitesse courant Direction courant Température Conductivité Pression Salinité Pression atm Profondeur | |
| 1991 | SHOM | 11/3/91 11:40 | 28/3/91 04:00 | 16.7 | -12.6053 | 45.1170 | M5 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | |
| 1985 | SHOM | 9/5/85 10:31 | 31/5/85 09:21 | 22.0 | -12.6198 | 45.1167 | M1 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | |
| | | 9/5/85 12:13 | 1/6/85 00:43 | 22.5 | -12.6893 | 45.1590 | M2 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | |
| | | 11/5/85 08:10 | 4/6/85 10:40 | 24.1 | -12.7232 | 45.2252 | M3 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | |
| 1985 | SHOM | 10/5/85 09:20 | 27/5/85 03:10 | 16.7 | -12.7727 | 45.2413 | M4 | Elévation de la surface libre courant intensité (cm/s) courant direction | |

NON

Toutes les données ont suivi la même procédure de traitement : nettoyage des données aberrantes, estimation des ondes de marée en supprimant le signal lent, estimation de la marée via un modèle de Foreman, calibrage avec les données du marégraphe du SHOM. L'ellipse de dispersion des vitesses a été calculée, l'axe principale de l'ellipse a été déterminée et les vitesses ont été projetées sur cet axe. La vitesse moyenne au cours de la campagne a été déterminée.

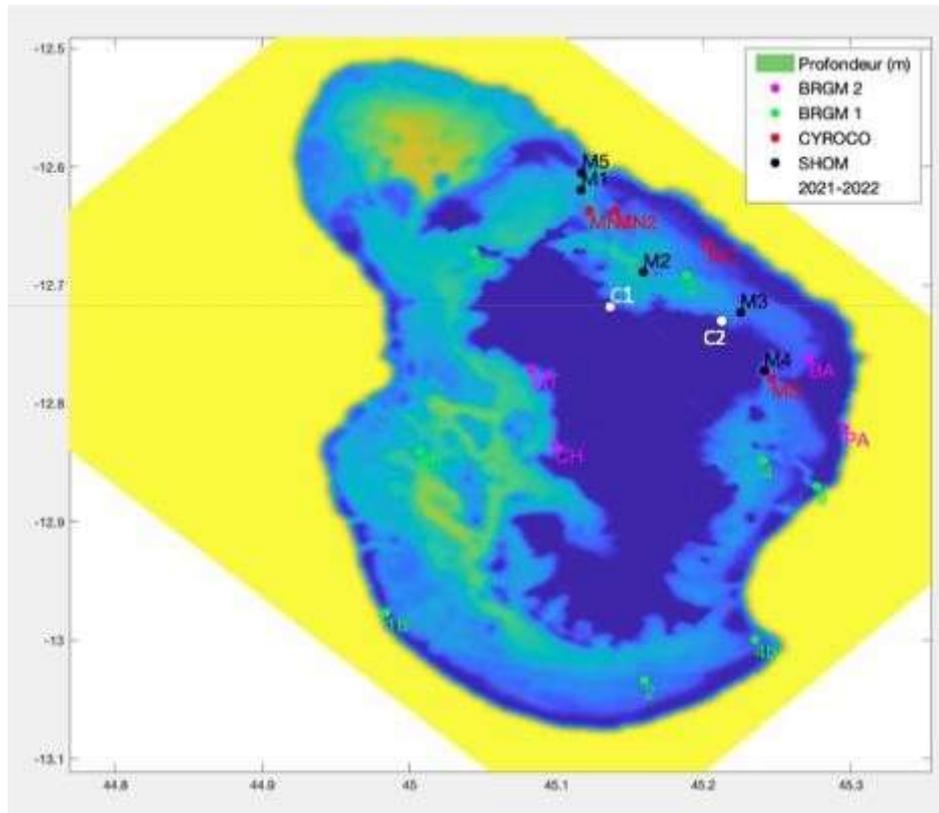


Figure 4: Campagnes utilisées pour la validation du modèle et mouillages associés

Tableau 2 : Les principales ondes de marée mesurées et corrigées pour les niveaux d'eau :

| Mouillage | Données Brutes | | | | Données "corrigées" | | | |
|-----------|----------------|-------|-----------|-------|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | M2 | | S2 | | M2 | | S2 | |
| | Amplitude | Phase | Amplitude | Phase | Amplitude | Déphasage | Amplitude | Déphasage |
| MN2 | 0.83 | 56.6 | 0.47 | 54.2 | 0.97 | -22.8 | 0.48 | -4.6 |
| MN1 | 0.83 | 58.2 | 0.46 | 56.0 | 0.97 | -24.4 | 0.47 | -6.3 |
| MS | 0.76 | 53.7 | 0.43 | 61.6 | 0.89 | -19.5 | 0.43 | -12.0 |
| MC | 0.79 | 27.2 | 0.49 | 27.9 | 0.98 | 6.5 | 0.49 | 24.2 |
| C1 | 1.01 | 7.9 | 0.63 | 20.3 | 1.00 | -4.1 | 0.50 | -2.1 |
| C2 | 0.98 | 117.3 | 0.64 | 12.1 | 1.04 | -3.1 | 0.51 | 0.2 |
| CH | 1.04 | 149.7 | 0.50 | 41.9 | 1.02 | -5.0 | 0.53 | -6.2 |
| MT | 1.11 | 128.8 | 0.72 | 31.9 | 1.09 | 8.1 | 0.70 | 2.6 |
| PA | 0.87 | 299.3 | 0.39 | 39.1 | 0.85 | -8.3 | 0.31 | -21.1 |
| BA | 0.89 | 300.9 | 0.78 | 10.9 | 0.97 | 0.7 | 0.58 | -0.4 |

Tableau 3 : Les principales ondes de marée mesurées et corrigées pour les vitesses dans la direction principale :

| Mouillage | Données Brutes | | | | Données "corrigées" | | | |
|-----------|----------------|-------|-----------|-------|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | M2 | | S2 | | M2 | | S2 | |
| | Amplitude | Phase | Amplitude | Phase | Amplitude | Déphasage | Amplitude | Déphasage |
| MN2 | 0.26 | 112.6 | 0.10 | 135.4 | 0.30 | -78.8 | 0.11 | -86.4 |
| MN1 | 0.24 | 277.7 | 0.14 | 272.8 | 0.28 | -244.2 | 0.15 | -223.5 |
| MS | 0.20 | 222.1 | 0.07 | 185.1 | 0.24 | -187.0 | 0.07 | -137.1 |
| MC | 0.18 | 13.0 | 0.11 | 3.1 | 0.23 | 20.7 | 0.11 | 49.0 |
| C1 | 0.15 | 344.1 | 0.17 | 351.2 | 0.15 | -340.2 | 0.13 | -333.1 |
| C2 | 0.05 | 109.1 | 0.04 | 145.7 | 0.05 | 5.1 | 0.03 | -133.4 |
| CH | 0.03 | 81.0 | 0.01 | 320.2 | 0.03 | 63.7 | 0.02 | -284.5 |
| MT | 0.02 | 60.7 | 0.01 | 328.6 | 0.02 | 76.2 | 0.01 | -294.2 |
| PA | 0.10 | 182.8 | 0.11 | 245.0 | 0.10 | 108.2 | 0.09 | -227.1 |
| BA | 0.05 | 105.0 | 0.10 | 165.1 | 0.06 | 196.6 | 0.07 | -154.7 |

Concernant la houle, les résultats du modèle sont comparés aux mesures réalisées au point IBL (Large de Ironi Baie).

3. VALIDATION

A Mayotte, nous avons des mesures en de nombreux endroits ce qui est l'idéal pour la validation. Toutefois, ces campagnes s'étalent sur 40 ans. Or, il n'est donc pas possible de modéliser ces 40 années pour valider le domaine. Nous avons donc choisi de ne modéliser que quelques années 2006, 2022 et 2023. Actuellement seule l'année 2006 a été utilisée pour la validation.

Tels que décrit précédemment, nous utiliserons deux stratégies distinctes. En dehors des années modélisées, nous validerons selon la stratégie décrite précédemment. Ceci concerne plus particulièrement les mouillages : BRGM1, BRGM2, CYROCO, SHOM, CASAGEC 2021-2022. Pour la campagne de 2006, nous comparons les résultats du modèle avec les données instantanées. Cela sera également fait avec l'année 2023 et les données actuellement récupérées. De plus, avec les données de 2023, nos ondes de marée issues des mesures pourront être calculé très précisément et améliorera nettement cette validation.

Dans cette partie, nous validerons donc, qualitativement et graphiquement, le fonctionnement global de la circulation hydrodynamique, les ellipses de dispersion et la vitesse moyenne dans la direction principale de l'écoulement pour tous les mouillages dont nous disposons les données. Quantitativement, nous validerons la variabilité tidale, qui demeure approximative du fait de la durée des mouillages. Pour 2006, nous estimerons en plus l'écart entre les sorties instantanées du modèle et les mesures.

Une validation en se basant sur les mesures en cours d'acquisition sera faite ultérieurement.

3.1 VARIABILITE DU NIVEAU D'EAU

La variabilité du niveau d'eau dépend principalement de la marée. Son action sur le niveau d'eau est relativement bien modélisée avec une très faible erreur tant sur l'amplitude de la marée que sur le déphasage de la marée entre le point de mouillage et le mouillage du Shom (inférieur à 10min). Une légère différence de phase au niveau du récif barrière (Point MC) nécessitera un travail supplémentaire pour affiner ce point. Enfin, l'écart modele/mesure fourni ici par la RMSE n'a pu être déterminée que pour les mouillages de 2006 puisqu'il s'agit des seules mesures simultanées. On observe une bonne adéquation tant pour l'amplitude et la phase des ondes de marée mesurées ou modélisées, excepté en PA (Est de Petite Terre) pour lequel le modèle surestime l'intensité par rapport aux mesures.

Puisqu'il s'agit d'un paramètre qui oscille de façon périodique, l'écart modele/mesure (RMSE) obtenu aux mouillages MN2, MN1, MC et MS est aussi liée à un certain décalage temporel de l'onde de marée (cf. Figure 5).

Tableau 4: Amplitude et Phase de la variabilité du niveau d'eau

| Mouillage | M2 | | | | | | S2 | | | | | | Erreur (RMSE) |
|-----------|--------------------|--------|-------------------|--------|---------------------|-----------------|--------------------|--------|-----------|--------|----------------------|-----------------|---------------|
| | Amplitude Corrigée | | DePhasage (degré) | | Erreur (%) Amplitud | Déphasage (min) | Amplitude Corrigée | | DePhasage | | Erreur (%) Amplitude | Déphasage (min) | |
| | Mesure | Modele | Mesure | Modele | | | Mesure | Modele | Mesure | Modele | | | |
| MN2 | 0.97 | 1.04 | -22.84 | -1.85 | 6.89 | 11.12 | 0.48 | 0.53 | -4.58 | -2.12 | 10.62 | 1.34 | 0.19 |
| MN1 | 0.97 | 1.04 | -24.35 | -1.72 | 7.54 | 11.99 | 0.47 | 0.53 | -6.33 | -1.92 | 13.81 | 2.41 | 0.20 |
| MS | 0.89 | 1.03 | -19.54 | 0.38 | 15.82 | 10.55 | 0.43 | 0.53 | -11.97 | 0.61 | 21.70 | 6.90 | 0.21 |
| MC | 0.98 | 1.04 | 6.47 | -1.41 | 6.09 | -4.18 | 0.49 | 0.53 | 24.21 | -1.75 | 7.80 | -14.23 | 0.26 |
| C1 | 1.00 | 1.04 | -4.05 | -1.47 | 4.57 | 1.37 | 0.50 | 0.53 | -2.14 | -1.75 | 6.36 | 0.22 | |
| C2 | 1.04 | 1.05 | -3.14 | -1.08 | 0.96 | 1.09 | 0.51 | 0.53 | 0.23 | -1.39 | 3.70 | -0.89 | |
| CH | 1.02 | 1.07 | -5.04 | 11.28 | 4.62 | 8.65 | 0.53 | 0.55 | -6.24 | 14.99 | 4.52 | 11.64 | |
| MT | 1.09 | 1.06 | 8.14 | 10.63 | 3.08 | 1.32 | 0.70 | 0.54 | 2.57 | 14.12 | 22.72 | 6.33 | |
| PA | 0.85 | 1.03 | -8.35 | -4.69 | 21.76 | 1.94 | 0.31 | 0.53 | -21.14 | -5.68 | 69.33 | 8.48 | |
| BA | 0.97 | 1.04 | 0.65 | -0.18 | 7.36 | -0.44 | 0.58 | 0.53 | -0.39 | -0.29 | 8.24 | 0.06 | |

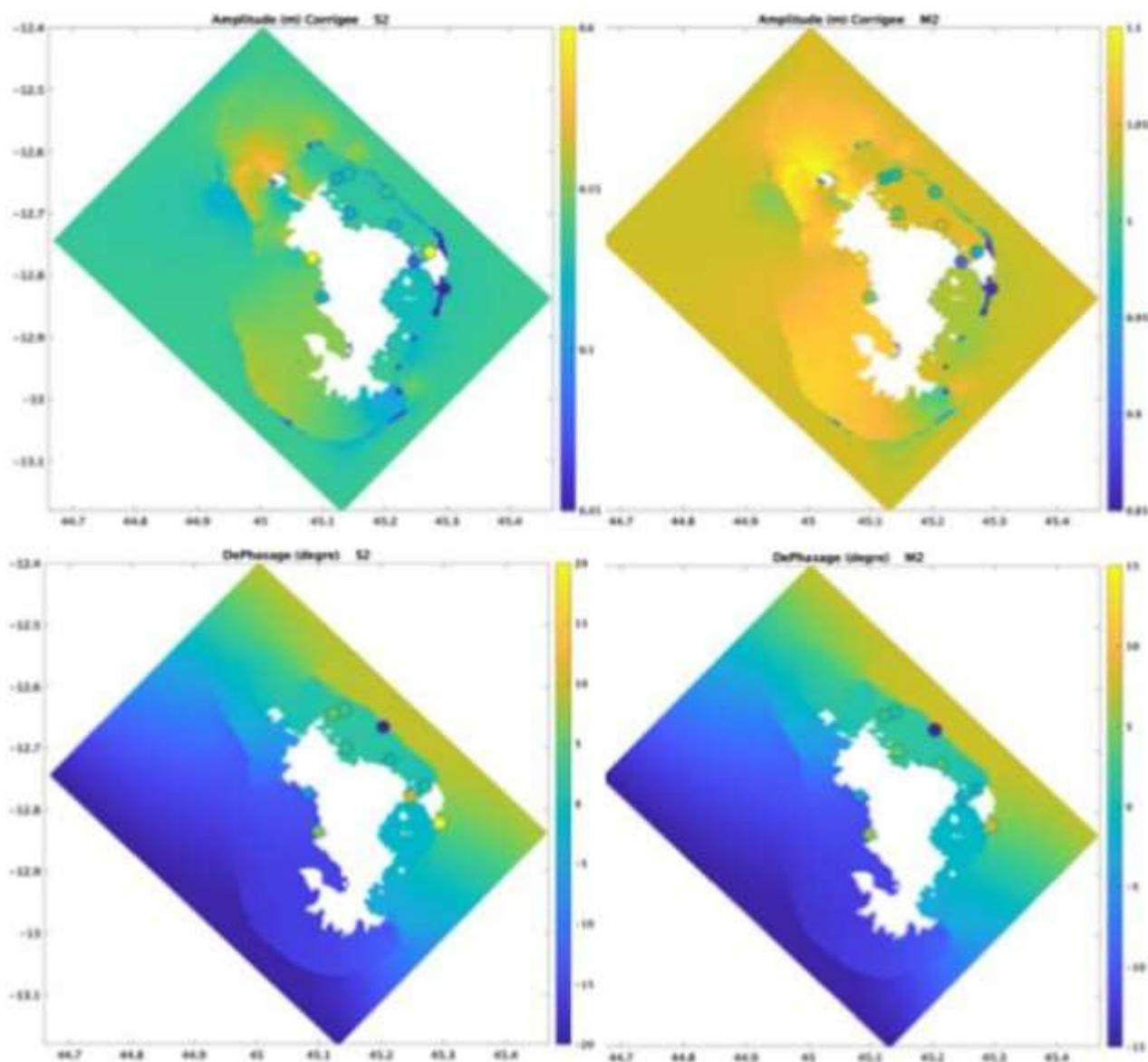


Figure 5: Représentation de l'amplitude et de la phase des ondes M2 et S2. La couleur des cercles indiquent les valeurs obtenues par les données in-situ mesurées en ces points, les couleurs sur la carte sont les résultats du modèle.

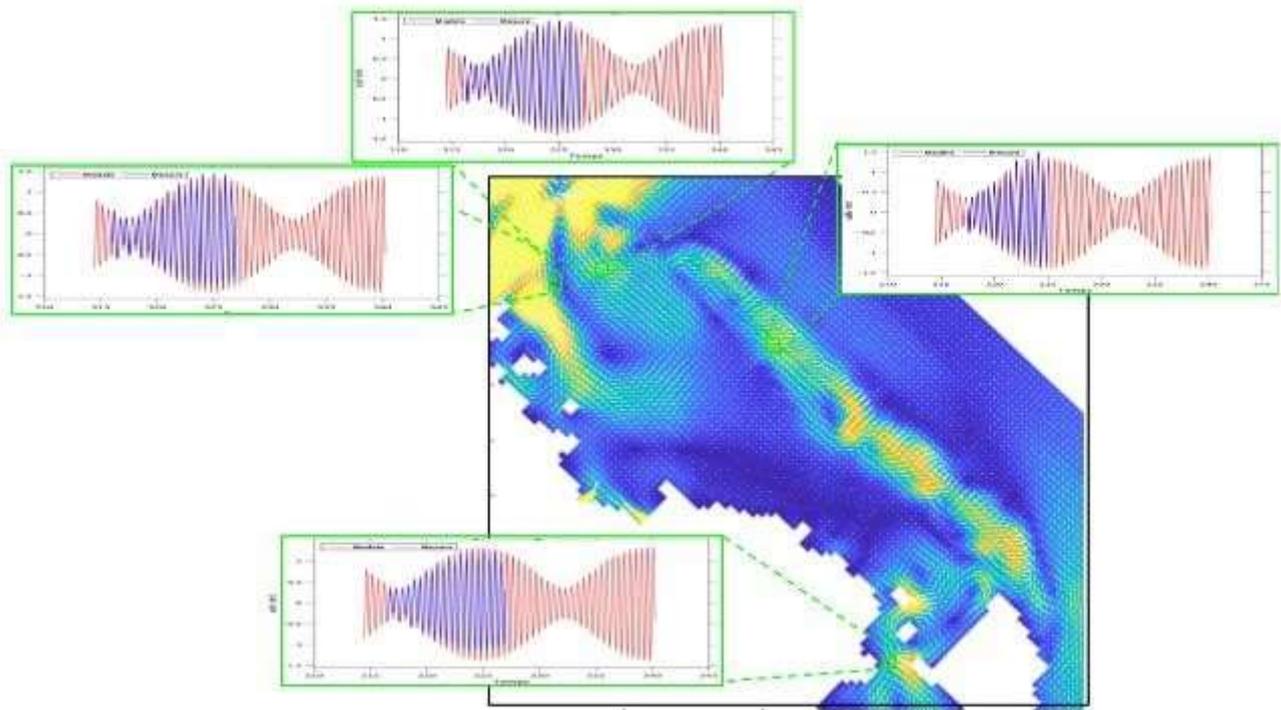


Figure 6: Comparaison de l'évolution du niveau d'eau mesuré et modélisé

3.2 ELLIPSES DE DISPERSION DES COURANTS MARINS

Les ellipses de dispersions modélisées sont en bonne adéquation avec les mesures. Elles ont des orientations et des intensités relativement proches.

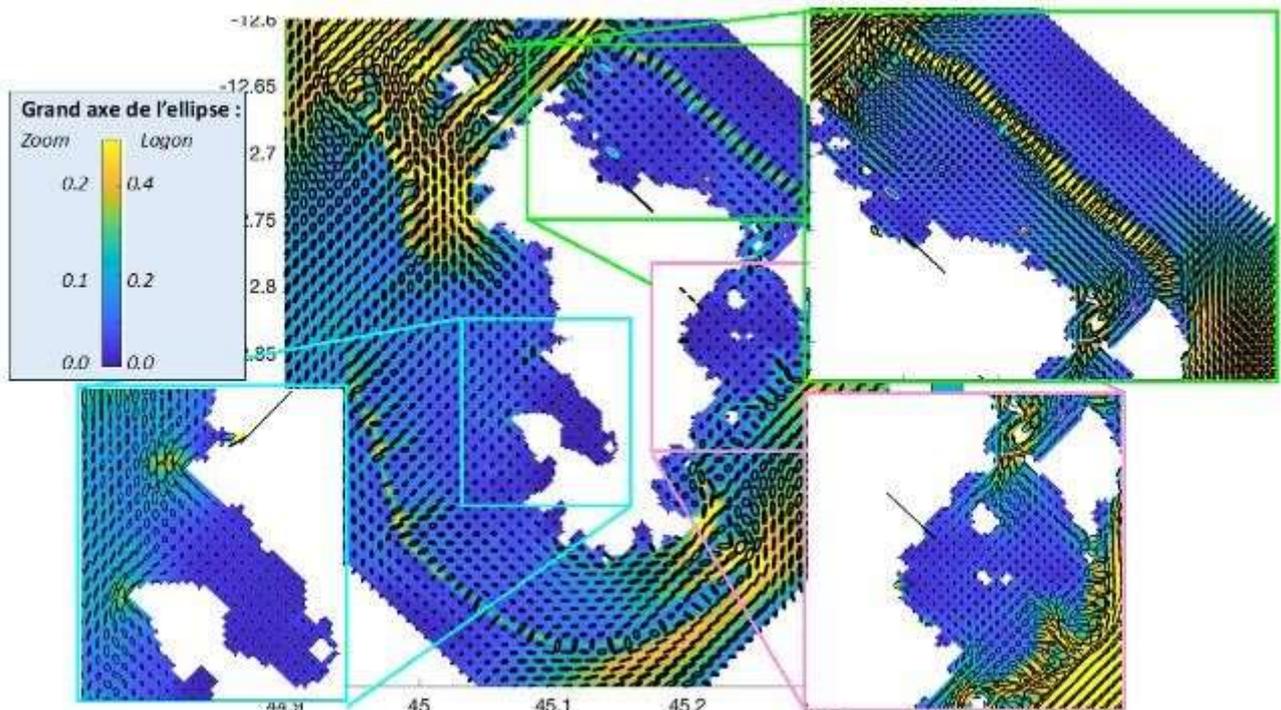


Figure 7: Ellipses de dispersions des vitesses modélisée (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues).

On peut, toutefois, observer un certain décalage spatial en certains mouillages tels que dans la passe Sud du lagon Sud-Est (Figures 7 et 8). En effet, à proximité de ce mouillage, plusieurs tourbillons sont visibles et le moindre décalage spatial dans la modélisation des courants implique une différence d'orientation des vitesses.

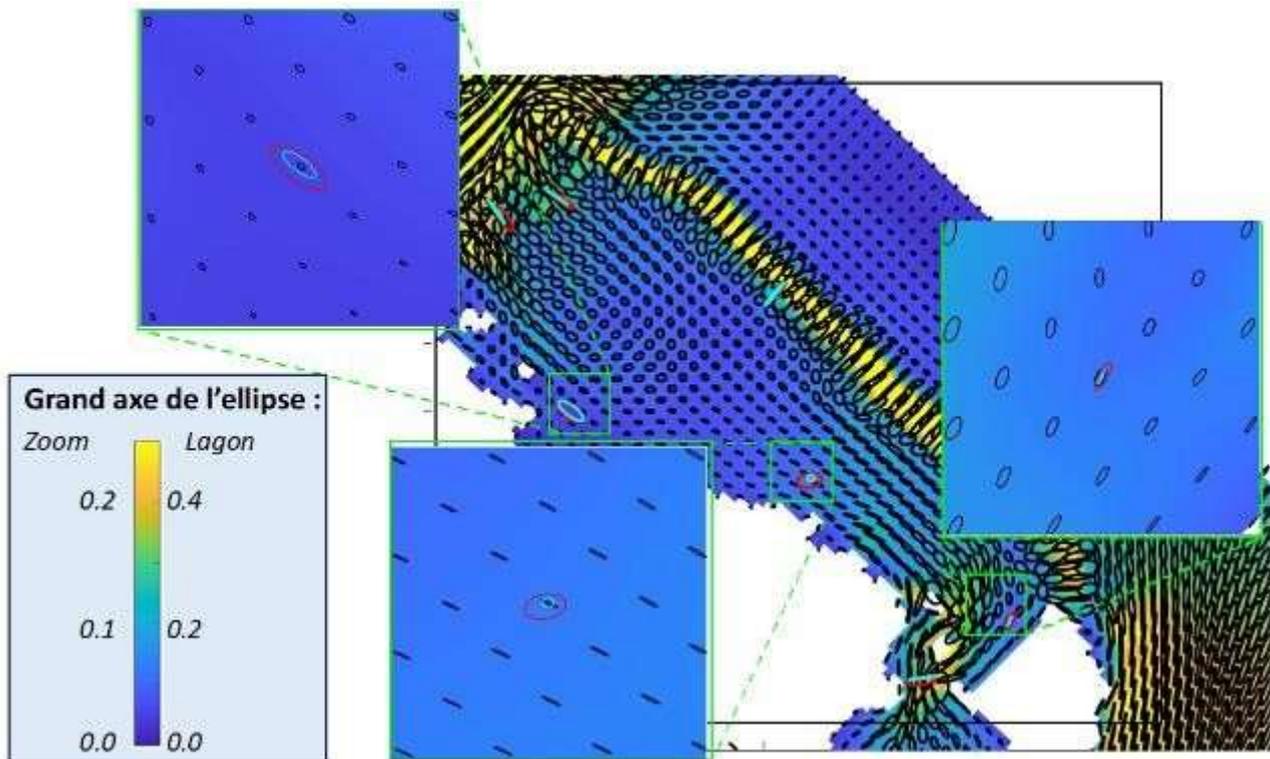


Figure 8: Zoom spatial (Nord-Est) sur les ellipses de dispersion des vitesses modélisées (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues).

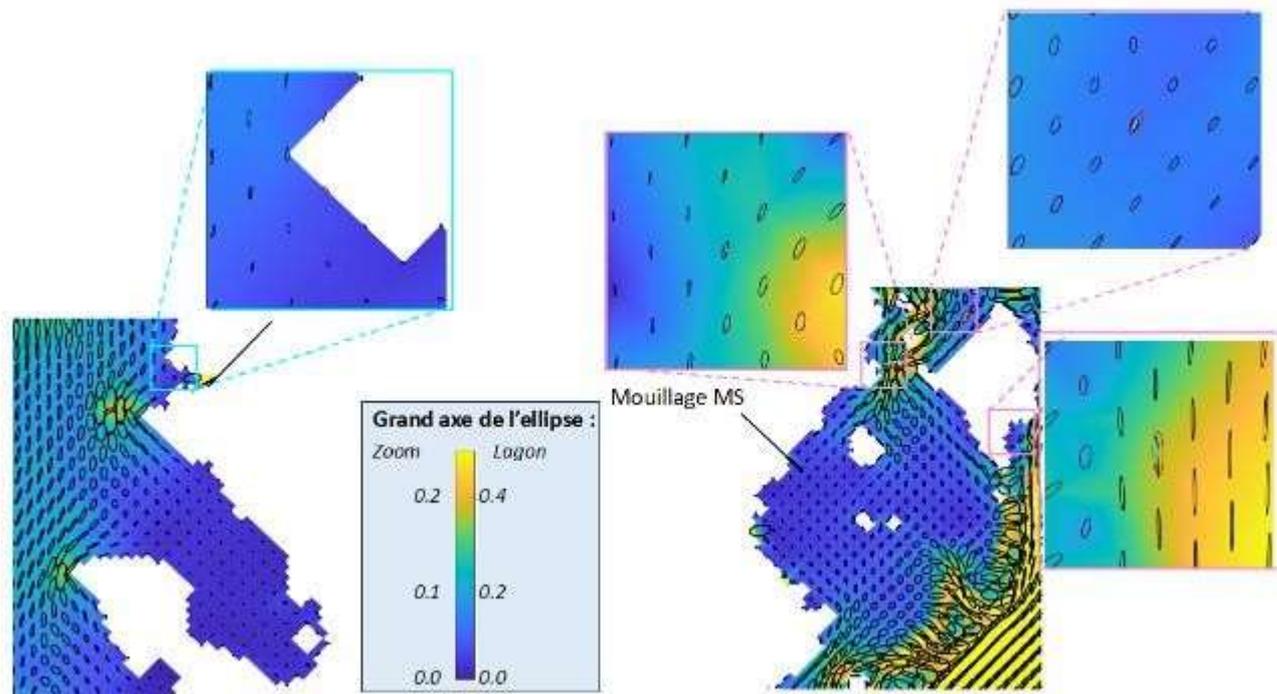


Figure 9: Zooms spatiaux (Sud) sur les ellipses de dispersion des vitesses modélisées (ellipses noires), comparées aux mesures (ellipses rouges) et aux ellipses de dispersion des vitesses tidales (ellipses bleues)

3.3 COURANT MOYEN

Le courant moyen modélisé qui correspond au courant moyenné sur le mois de novembre 2006 est comparé aux mesures in-situ, moyennées durant l'ensemble des campagnes (Figures 10, 12, 13). Une telle comparaison s'avère plus complexe car les mesures ne sont pas toujours simultanées au modèle. Toutefois, une telle analyse nous donne les ordres de grandeurs et nous permet de nous assurer que le modèle donne des valeurs de courant moyen cohérentes.

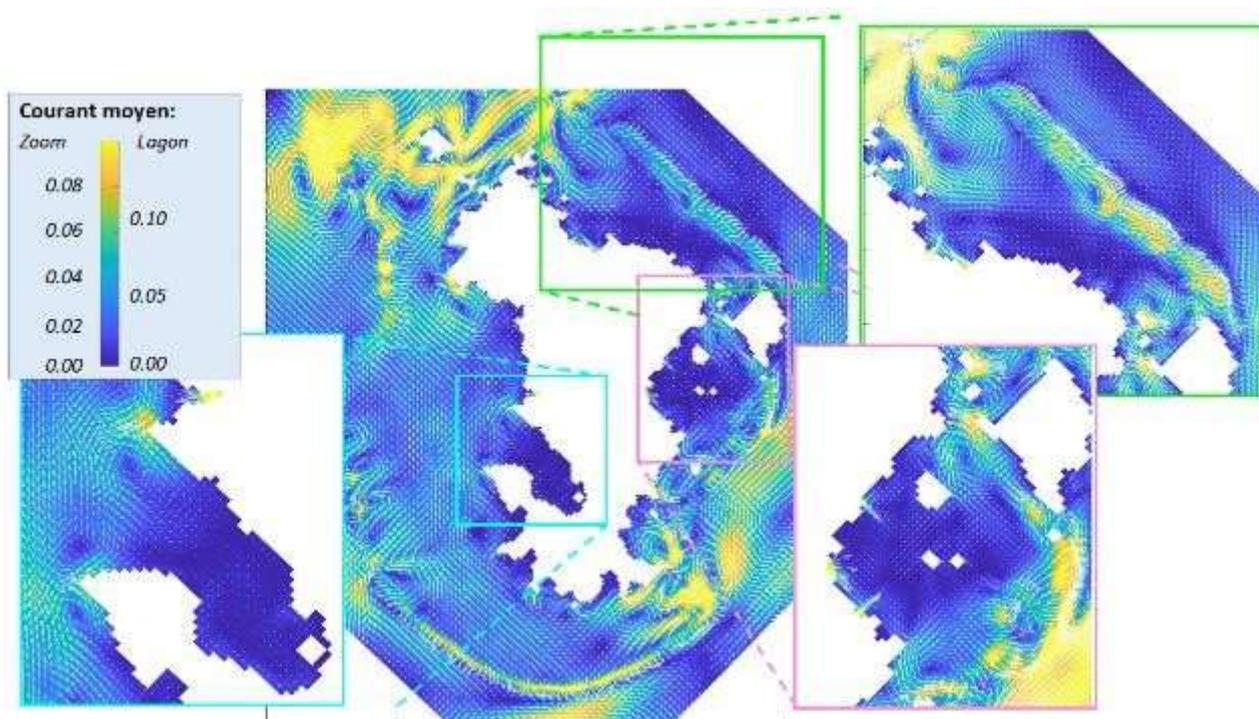


Figure 10: Courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparées aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la vitesse maximale (couleur « jaune »)

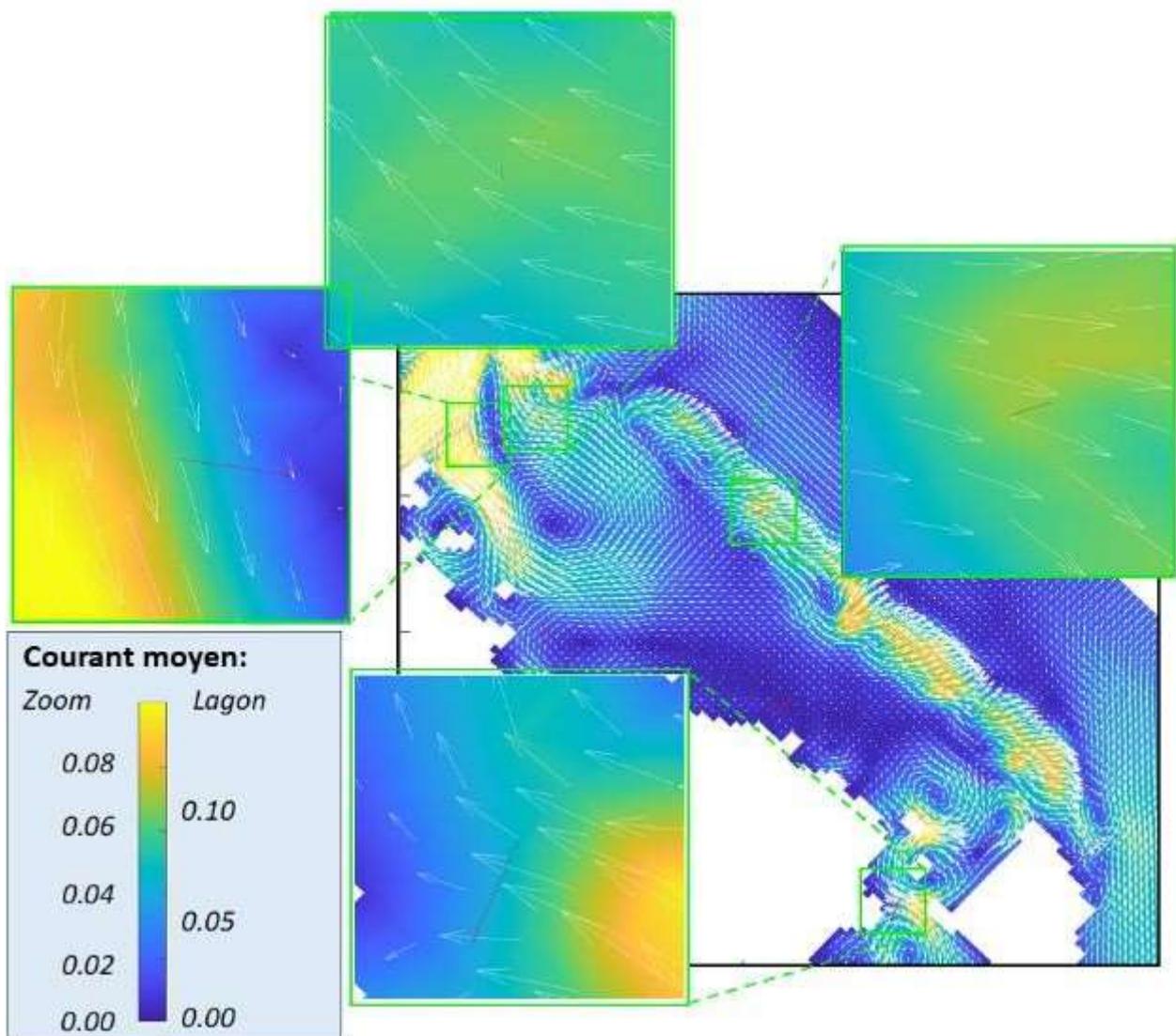


Figure 11: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la v

Dans le lagon Nord-Est (Figure 10), les courants des mouillages Nord sont bien orientés. L'intensité semble légèrement surestimée au niveau de la petite passe Nord. Quant à la grande passe Nord, on constate une orientation de la mesure légèrement décalée avec le chenal principal, probablement liée à la présence d'une patate de corail. Au niveau du récif, le courant moyen est en adéquation avec les mesures. Ceci est un point important de la modélisation, même si des progrès doivent encore être réalisés sur la modélisation instantanée. Enfin, dans la passe Sud de ce lagon Nord-Est, les tourbillons et un léger décalage spatial entre le modèle et les mesures induisent une orientation biaisée de ce courant moyen.

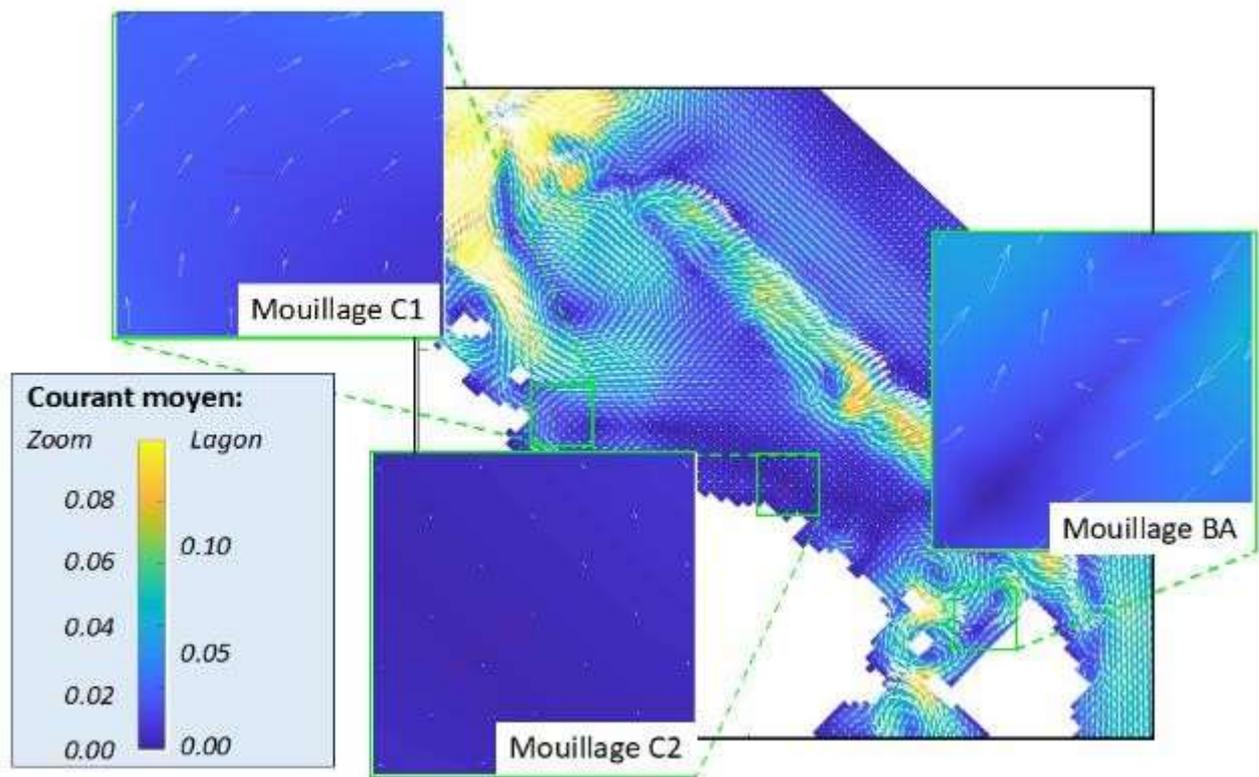


Figure 12: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues). Remarque : pour visualiser plus précisément, la v

Quant aux mouillages C1 et C2, ils ont été réalisés entre 2020 et 2021 sont dans des zones avec très peu de courants, à la limite des capacités de mesures (quelques centimètres par seconde). En outre, les mesures n'ont pas été réalisées pendant la période modélisée. Les différences sont probablement liées à un tel décalage.

Pour le mouillage BA, comme précédemment, il s'agit d'une zone très tourbillonnaire : le moindre décalage implique un changement de sens sur les vitesses moyennes.

Dans la partie Sud, comme précédemment, à l'Est, nous constatons que les 3 mouillages sont dans des zones fortement tourbillonnaires. Un léger décalage de la zone de front, induit une orientation différente des courants moyens, mais, en prenant en compte ce décalage, les vitesses modélisées sont en accord avec les mesures. A l'Ouest, nous constatons que l'intensité est respectée (mouillage CH), mais que la direction est différente probablement du fait de la terre mal discrétisée : en effet, le modèle est en accord avec les principes de frontières fermées.

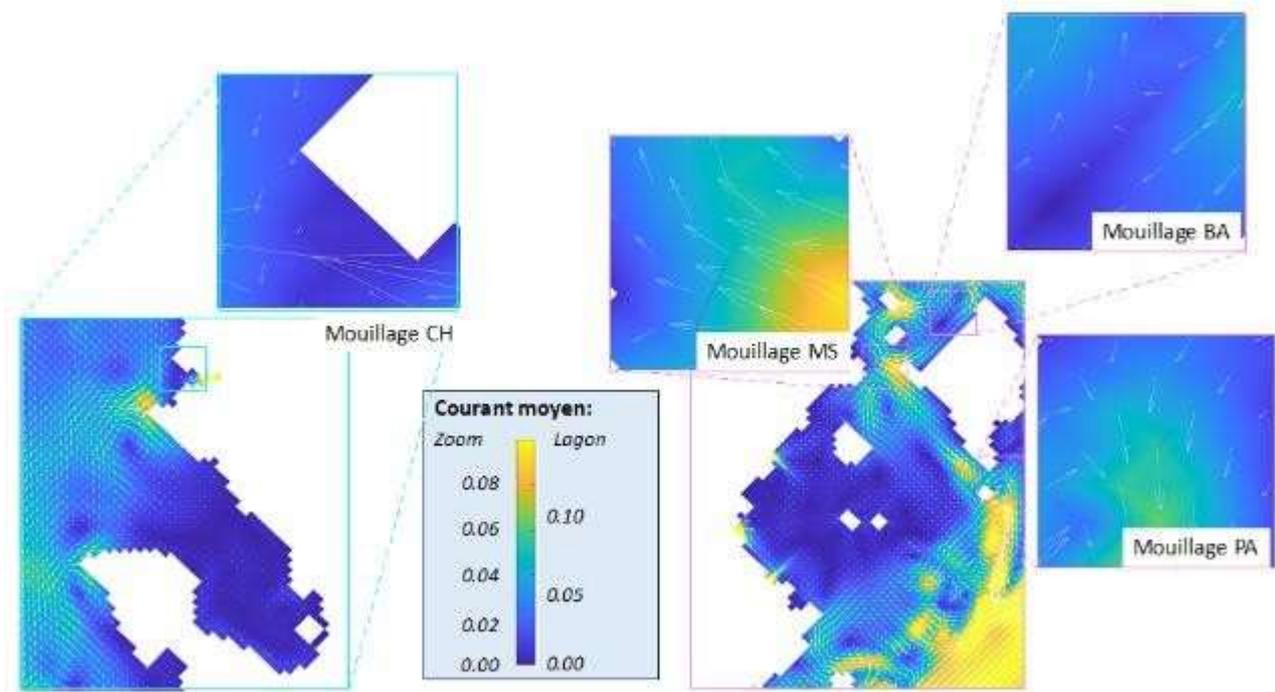


Figure 13: Zoom spatial (Lagon Nord-Est) des courants moyens des vitesses modélisée (flèches blanches), comparés aux mesures (flèches rouges) et aux courants moyens associés aux vitesses tidales (flèches bleues).
Remarque : pour visualiser plus précisément, la vitesse maximale (couleur « jaune ») correspond à des vitesses supérieures à 0.1m/s pour les zooms et 0.15m/s pour le lagon.

Globalement les courants moyens modélisés sont en adéquation avec ceux mesurés, avec une bonne corrélation en intensité et en orientation. Toutefois, dans le détail, on peut s'apercevoir de léger décalage spatial.

3.4 VARIABILITE TEMPORELLE DES VITESSES

Les courants marins sont principalement contraints par la marée qui induit une variabilité diurne et semi-diurne. Le flux cross-récifal dépend fortement de la houle et associé au vent module ce courant. Le modèle reproduit correctement phase et amplitude des ondes M2 et S2 de la vitesse (Figure 14, Tableau 5).

Tableau 5: Amplitude et Phase de la variabilité du niveau d'eau

| Mouillage | M2 | | | | | | S2 | | | | | | Erreur (RMSE) |
|-----------|--------------------------|--------|-------------------|--------|----------------------|---------------|--------------------|--------|-----------|--------|----------------------|---------------|---------------|
| | Amplitude Corrigée (m/s) | | DePhasage (degré) | | Erreur (%) Amplitude | Déphase (min) | Amplitude Corrigée | | DePhasage | | Erreur (%) Amplitude | Déphase (min) | |
| | Mesure | Modele | Mesure | Modele | | | Mesure | Modele | Mesure | Modele | | | |
| MN2 | 0.30 | 0.13 | -79 | -89 | 55 | -5 | 0.11 | 0.06 | -86 | -112 | 41 | -14 | 0.18 |
| MN1 | 0.28 | 0.16 | -244 | -235 | 43 | 5 | 0.15 | 0.07 | -224 | -262 | 51 | -21 | 0.22 |
| MS | 0.24 | 0.19 | -187 | -190 | 20 | -1 | 0.07 | 0.13 | -137 | -202 | 77 | -36 | 0.15 |
| MC | 0.23 | 0.03 | 21 | -222 | 86 | -129 | 0.11 | 0.01 | 49 | -202 | 92 | -138 | 0.20 |
| C1 | 0.15 | 0.04 | -340 | -8 | 74 | 176 | 0.13 | 0.02 | -333 | -3 | 86 | 181 | |
| C2 | 0.05 | 0.09 | 5 | -195 | 85 | -106 | 0.03 | 0.05 | -133 | -194 | 51 | -33 | |
| CH | 0.03 | 0.02 | 64 | 83 | 47 | 10 | 0.02 | 0.01 | -284 | -277 | 44 | 4 | |
| MT | 0.02 | 0.03 | 76 | 68 | 84 | -4 | 0.01 | 0.02 | -294 | -293 | 44 | 1 | |
| PA | 0.10 | 0.14 | 108 | 109 | 42 | 0 | 0.09 | 0.10 | -227 | -265 | 10 | -21 | |
| BA | 0.06 | 0.08 | 197 | 164 | 41 | -17 | 0.07 | 0.04 | -155 | -183 | 37 | -15 | |

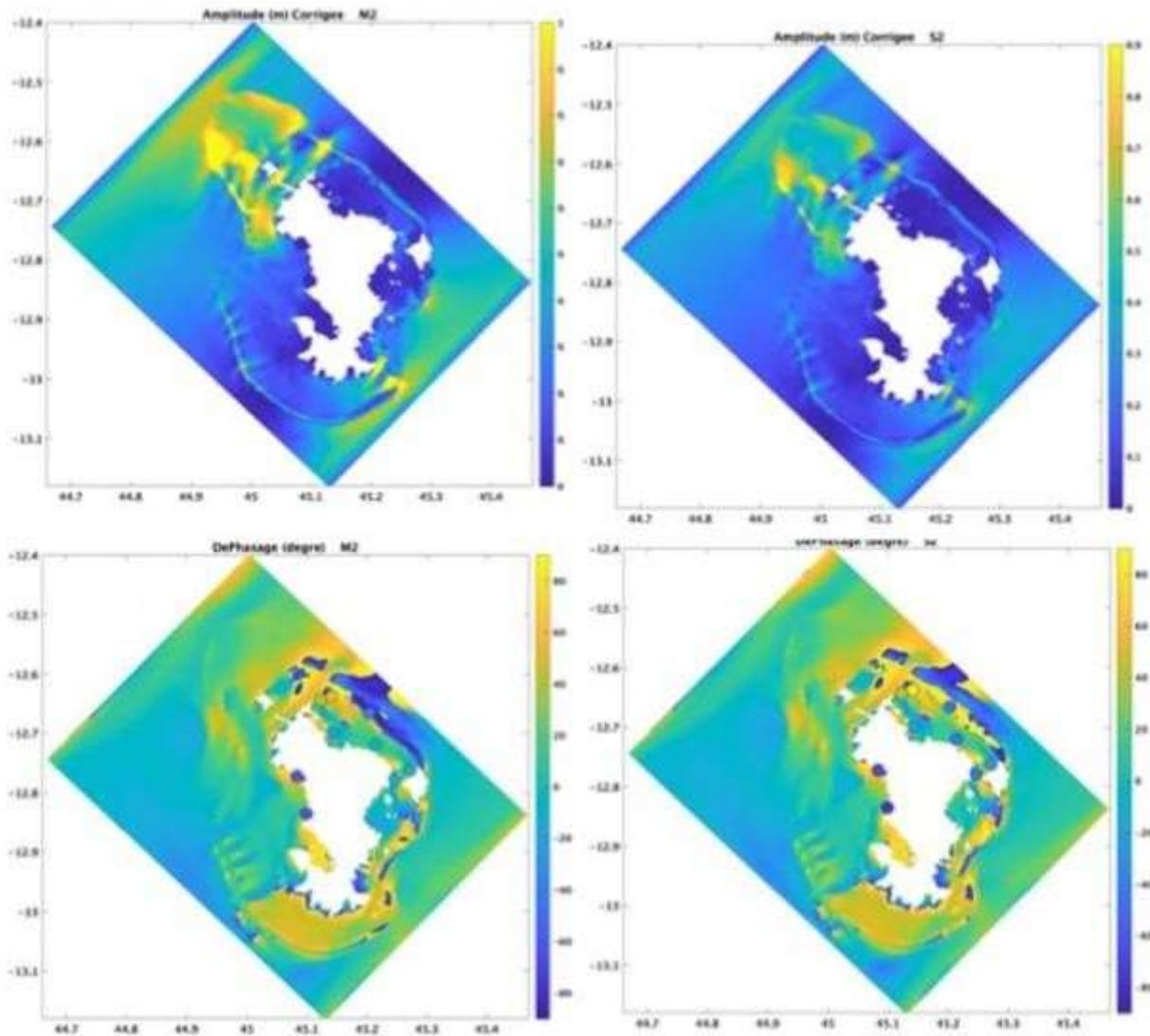


Figure 14: Amplitude et Phase des ondes M2 et S2 de la vitesse : La couleur des cercles indiquent les valeurs obtenues par les données in-situ mesurées en ces points, les couleurs sur la cartes sont les résultats du modèle.

Ainsi, comme nous pouvons le voir sur les Figures 15, 16 et 17 qui représentent l'évolution temporelle des vitesses modélisées et reconstituées à partir des mesures lors des campagnes, un bon accord modèle/mesure est observé. Toutefois, en C2 (figure 16), un fort déphasage existe entre le modèle et les mesures. Ceci est sans aucun doute lié aux signal mesurés, trop courts et trop bruités pour déterminer de façon certaine les phases et amplitudes du courant. En C1, il semblerait que le signal mesuré est sous-estimé, probablement du fait de particularités locales. La figure 15, met en évidence que la variabilité du flux moyen semble reproduit, par exemple, l'effet d'une forte houle le jour 316-317 se traduit par une augmentation du flux cross-récifal en MC et un flux vers le Sud en MS.

Toutefois, en MC, des signaux tidaux du courant instantané semble être sous-évaluée dans le modèle.

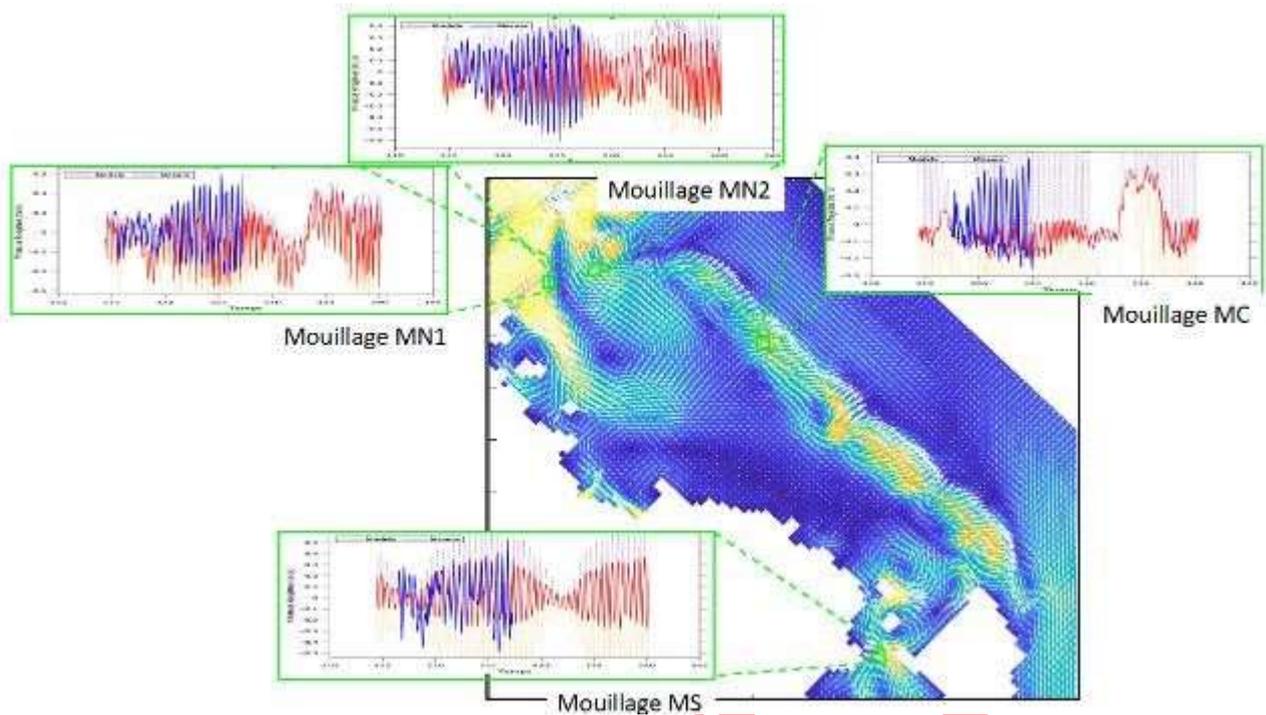


Figure 15: Evolution de la vitesse aux mouillages MN1, MN2, MS et MC dans le lagon Nord-Est

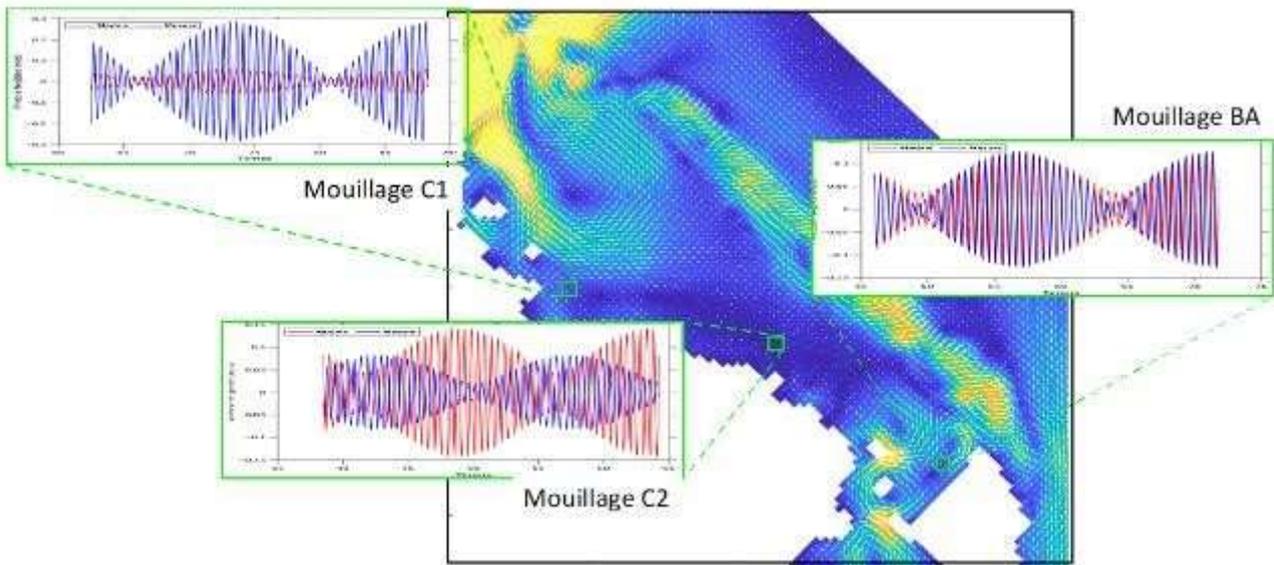


Figure 16: Evolution de la vitesse tidale aux mouillages C1, C2 et BA dans le lagon Nord-Est

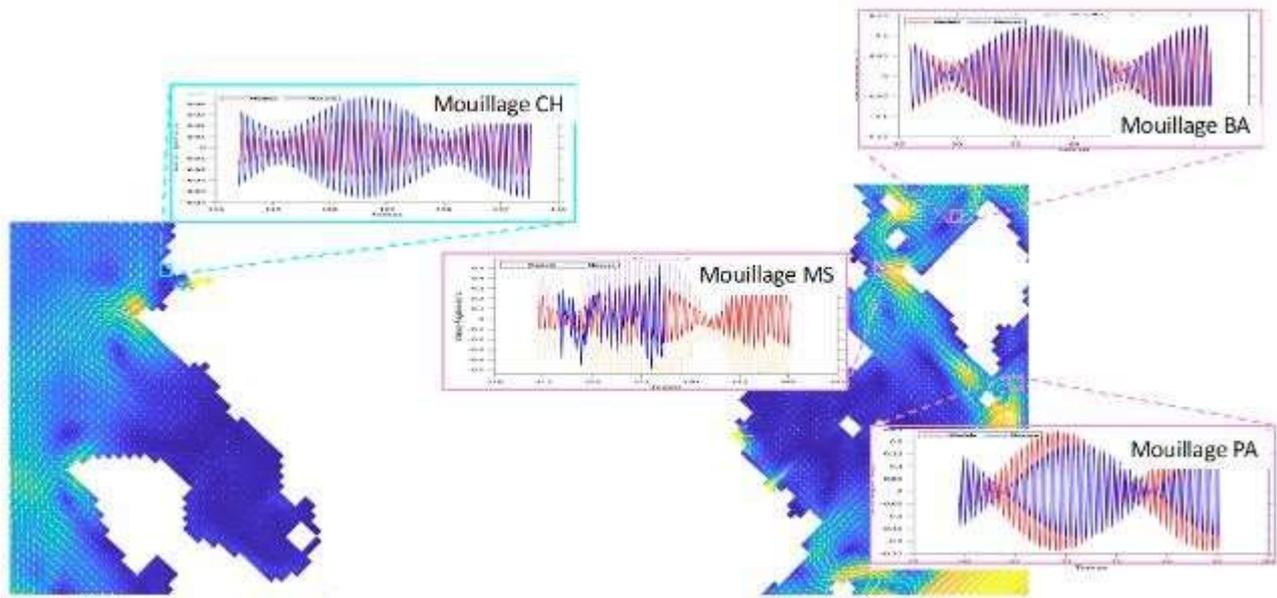


Figure 17: Evolution de la vitesse aux mouillages MN1, MN2, MS et MC dans le lagon Nord-Est

3.5 LES RAFFINEMENTS

Le modèle de raffiné sur les zones d'étude accroît la similitude entre mesures et résultats du modèles comme nous pouvons le voir Figure

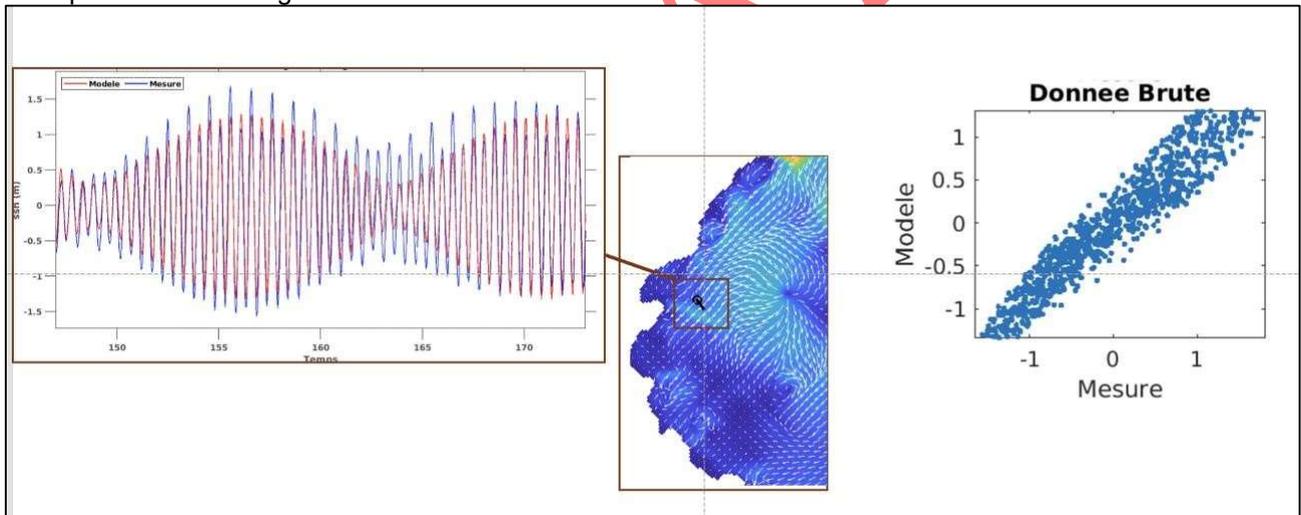


Figure 18 : Validation du niveau d'eau sur le zoom réalisé à Ironi Bé

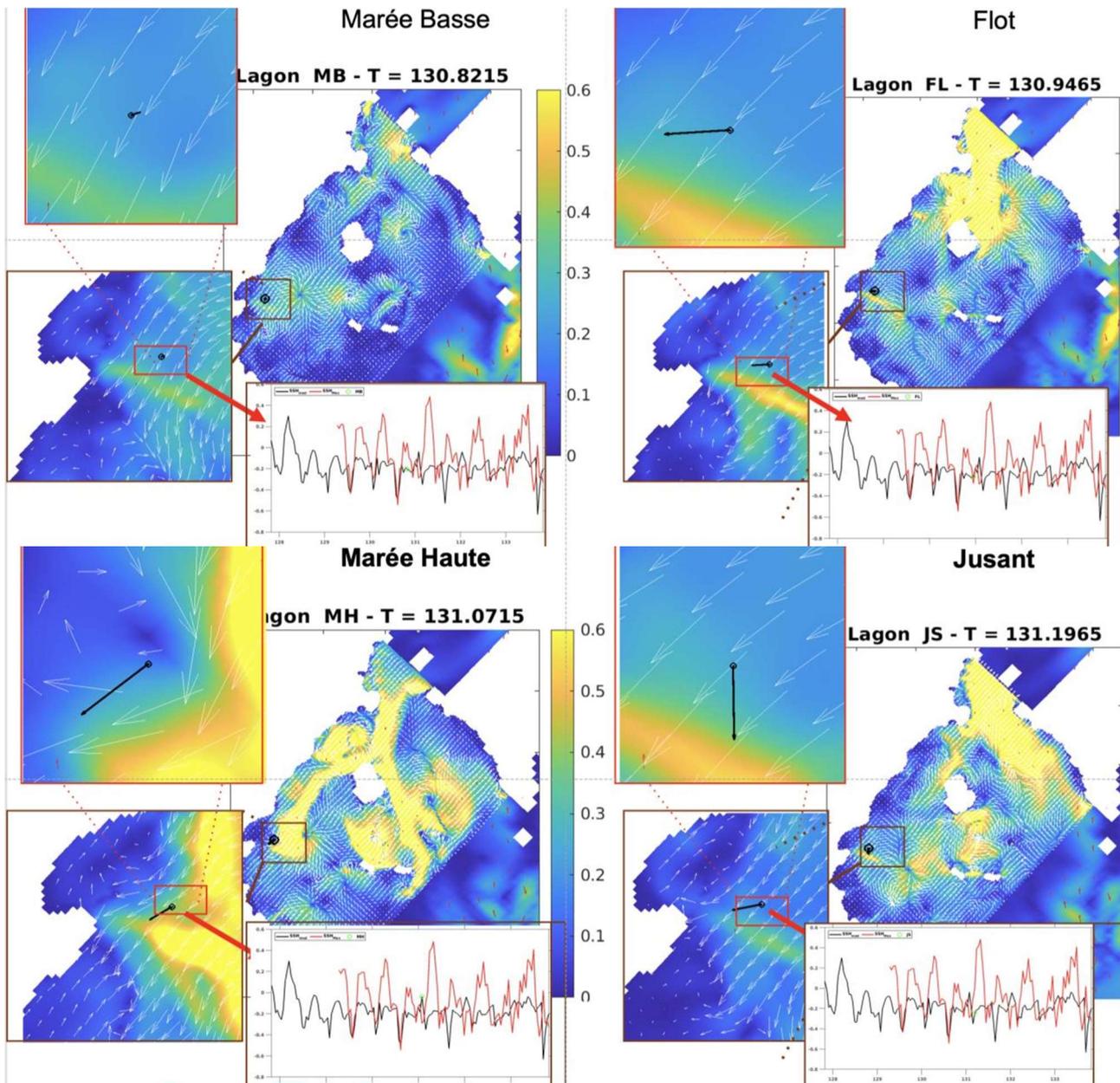


Figure 19: Validation du modèle raffiné au niveau de Ironi Bé

3.6 LA HOULE

La houle, tant la hauteur significative que la période, présente une excellente concordance avec les mesures réalisées au large de Longoni telle que le révèle la figure 18.

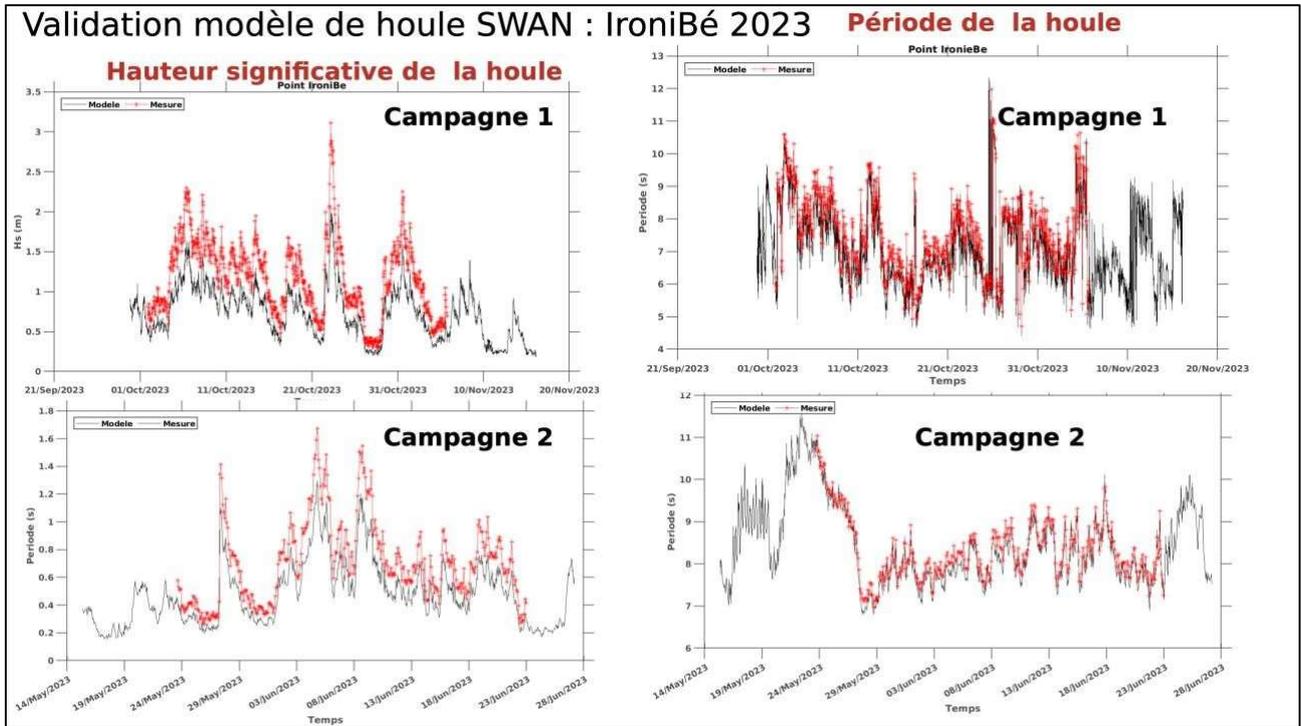


Figure 20: Validation du modèle de houle Swan

NON VALABLE

4. DESCRIPTION DE LA CIRCULATION HYDRODYNAMIQUE DANS LE LAGON DE MAYOTTE

4.1 VITESSE INSTANTANÉE AU COURS DU CYCLE DE MAREE

Dans le lagon de Mayotte, la marée a un caractère propagatif. Globalement, le courant est maximal durant les moments d'étales et minimal au flot et jusant. Au jusant et à marée Basse, la marée vient du Nord-Ouest, tandis qu'au flot et à marée haute, le courant vient du Sud-Est.

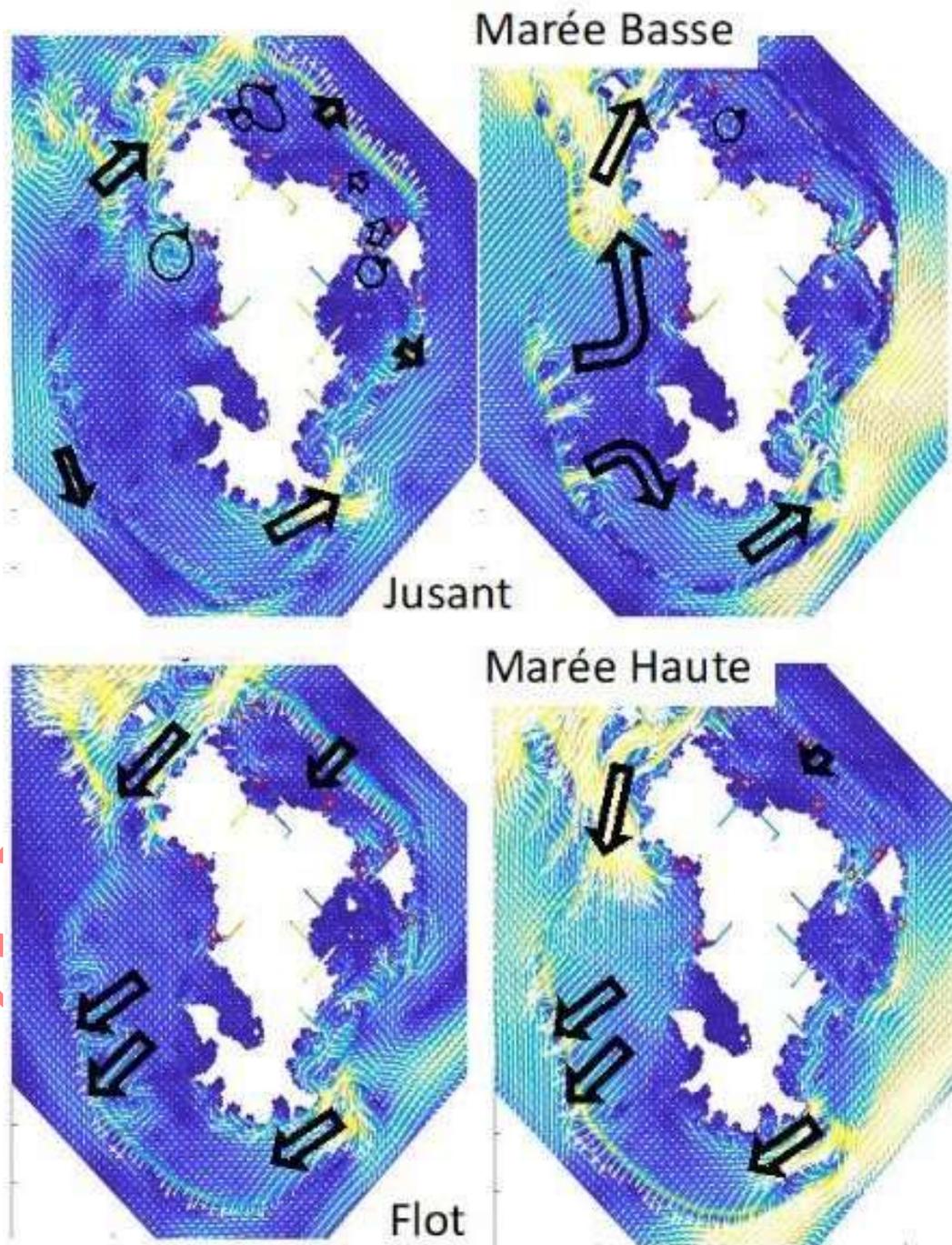


Figure 21: Variabilité de la circulation hydrodynamique au cours du cycle tidal

4.2 VITESSE MOYENNE

Moyenné sur le mois de novembre 2006, le courant va essentiellement du Nord vers le Sud. Dans ce modèle l'eau rentre par la grande passe au Nord et le récif effondré du Nord-Ouest, puis ressort par le Sud et le récif. Dans la baie d'Ironie Be, le courant est extrêmement faible et il est complexe d'estimer une direction prédominante.

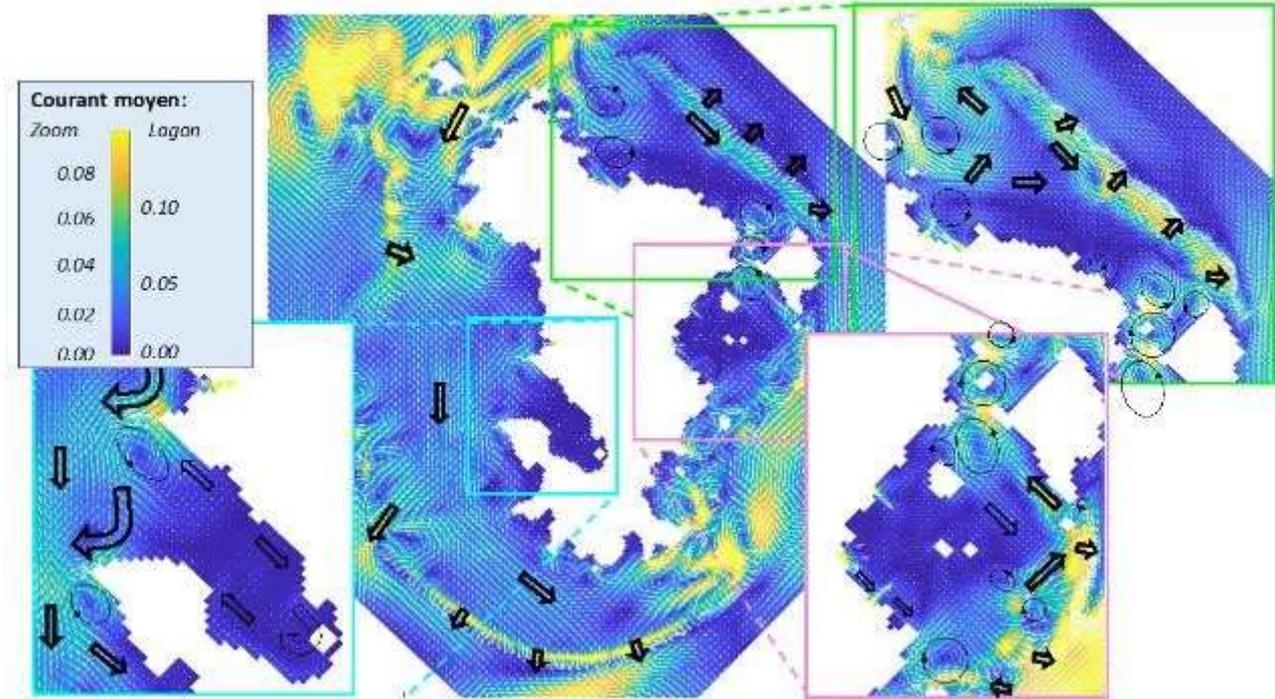


Figure 22: Variabilité de la circulation hydrodynamique moyenne

4.3 HOULE

Sur les mois modélisés, la hauteur de houle varie entre 0 et 2m. La houle la plus forte se situe au Nord du lagon, tandis qu'elle est faible au Sud-Est (Figure 21).

NOTA

Modélisation de la houle avec le modèle Swan. Année 2023

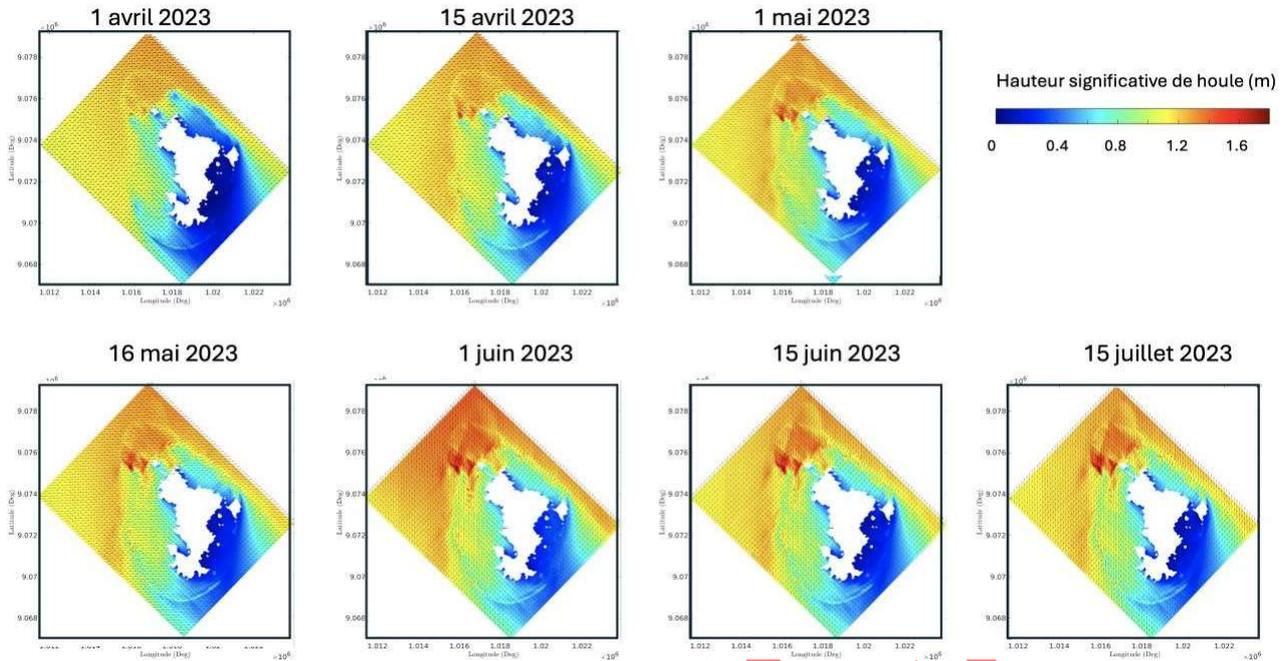


Figure 23: Variabilité de la houle entre Avril et Juillet 2023

4.4 LES SCENARI

12 scenarii ont été réalisés en Mortes-eaux et en Vives-Eaux :

- Houle 1m, Vent 5m/s, Direction : 45°
- Houle 1m, Vent 5m/s, Direction : 150°
- Houle 1m, Vent 5m/s, Direction : 210°
- Houle 1m, Vent 5m/s, Direction : 330°
- Houle 2m, Vent 10m/s, Direction : 45°
- Houle 2m, Vent 10m/s, Direction : 150°
- Houle 2m, Vent 10m/s, Direction : 210°
- Houle 2m, Vent 10m/s, Direction : 330°
- Houle 3m, Vent 15m/s, Direction : 45°
- Houle 3m, Vent 15m/s, Direction : 150°
- Houle 3m, Vent 15m/s, Direction : 210°
- Houle 3m, Vent 15m/s, Direction : 330°

Ces 24 scenarii explorent précisément la circulation du lagon sous les différents forçages. Les résultats sont présentés sur les planches scenarii, en annexe.

5. CONCLUSION

Le modèle hydrodynamique a été validé avec les données antérieures ainsi qu'avec les données de Exail. Les simulations illustre l'influence de la marée, du vent, mais aussi de la houle qui se brise sur le récif barrière. Tous ces paramètres doivent être pris avec une grande précision afin de reproduire correctement la dispersion. La conformité des résultats du modèle hydrodynamique avec les mesures nous assure que la dispersion peut être déterminé avec grande fiabilité.

NON VALIDÉ

6. BIBLIOGRAPHIE

Chevalier C., Devenon JL., Pagano M., Rougier G., Blanchot J., Arfi R., 2017, The atypical hydrodynamics of the Mayotte Lagoon (Indian Ocean): Effects on water age and potential impact on plankton productivity, Estuarine, Coastal and Shelf Science , S0272-7714(16)30635-7, DOI: 10.1016/j.ecss.2017.06.027

Chevalier C., Sous D., Devenon JL., Pagano M., Rougier G., Blanchot J., 2015, Impact of cross-reef fluxes on lagoon dynamics : a simple parameterization for coral lagoon circulation model, application to the Ouano lagoon, New Caledonia, Ocean Dynamics, doi:10.1007/s10236-015-0879-x

Chevalier C., Devenon JL., Rougier G., Blanchot J., 2015, Hydrodynamics of the Toliara Reef Lagoon (Madagascar): Example of a Lagoon Influenced by Waves and Tides. Journal of Coastal Research: Volume 31, Issue 6: pp. 1403 – 1416. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00077.1>

De La Torre Y., Lecacheux, S., Pedreros R., Baloui, Y., 2008, Modélisation de la houle cyclonique dans le lagon de Mayotte, Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis

GOURBESVILLE Ph., et THOMASSIN B.A. (2000), Coastal environment assessment procedure for sustainable wastewater management in tropical islands: the Mayotte example, Ocean and Coastal Management, 43, 997-1014.

7. ANNEXES

7.1 VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

7.1.1 Validation du modèle global

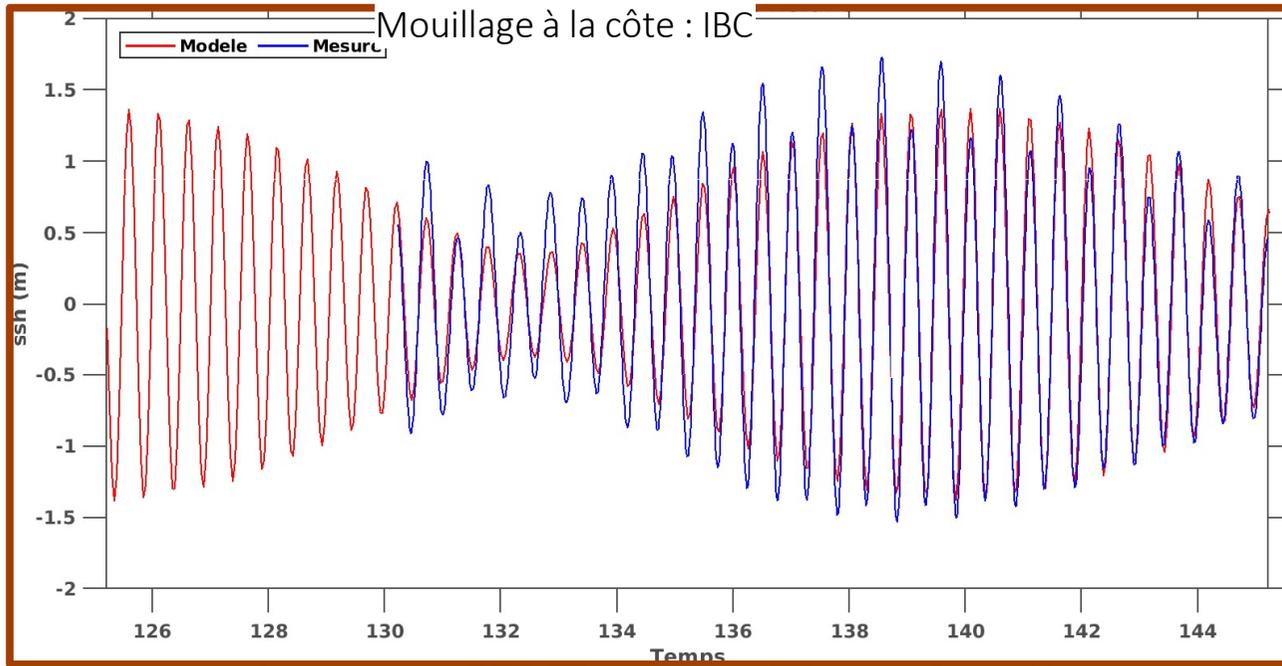
NON VALIDE

Validation des niveaux d'eau

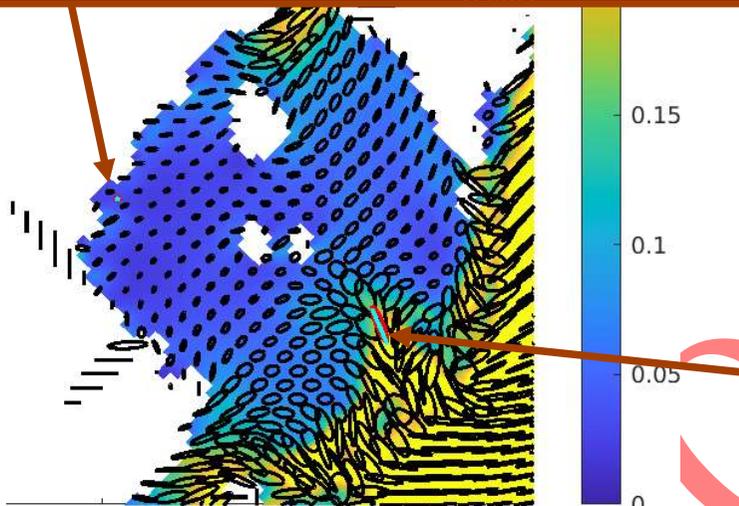
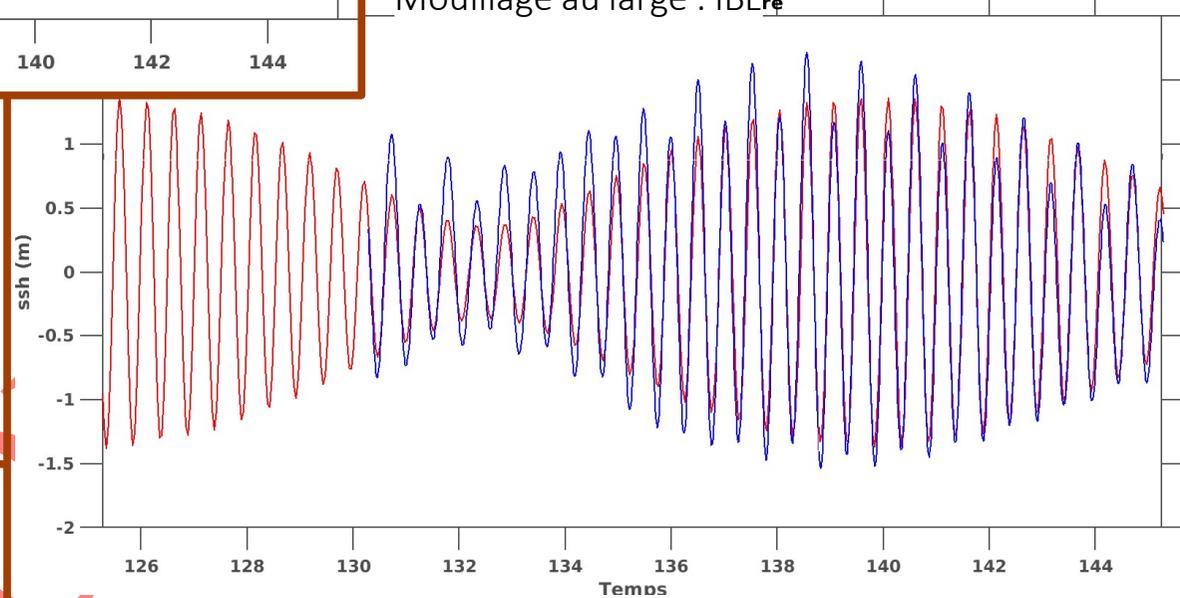
Zoom sur 15 jours de mesures pour plus de visibilité

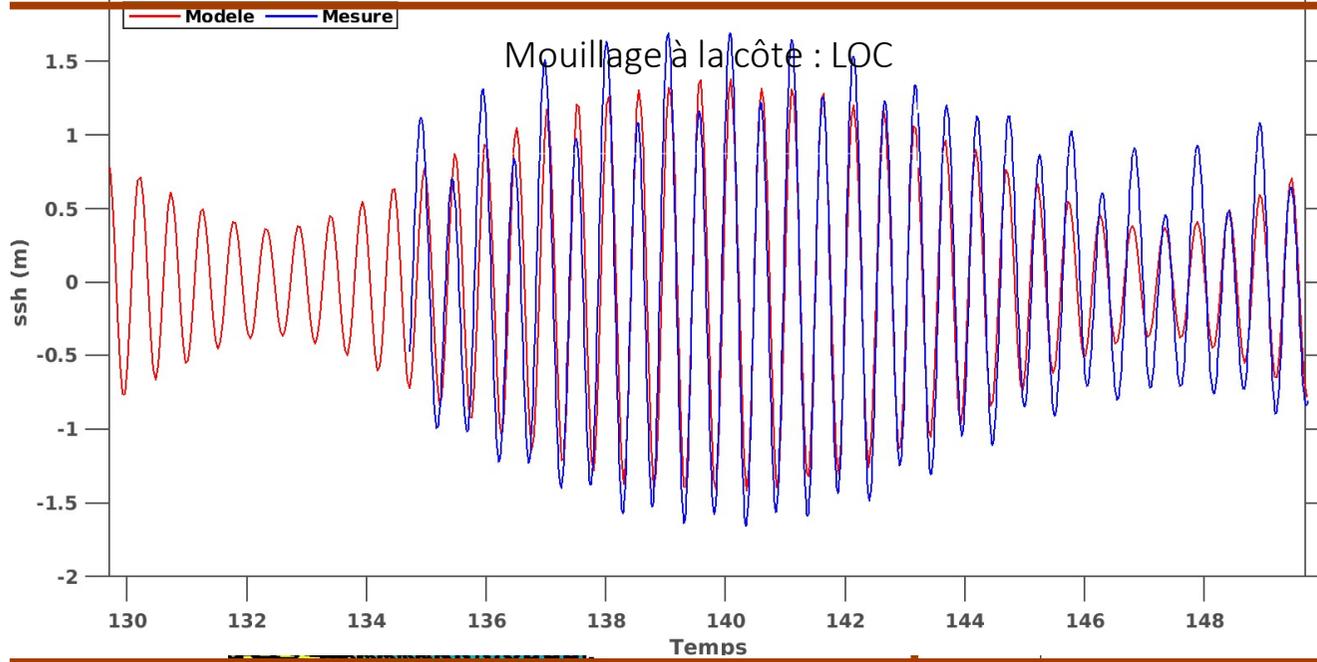
NON VALIDÉ

Validation Niveau Ironibé

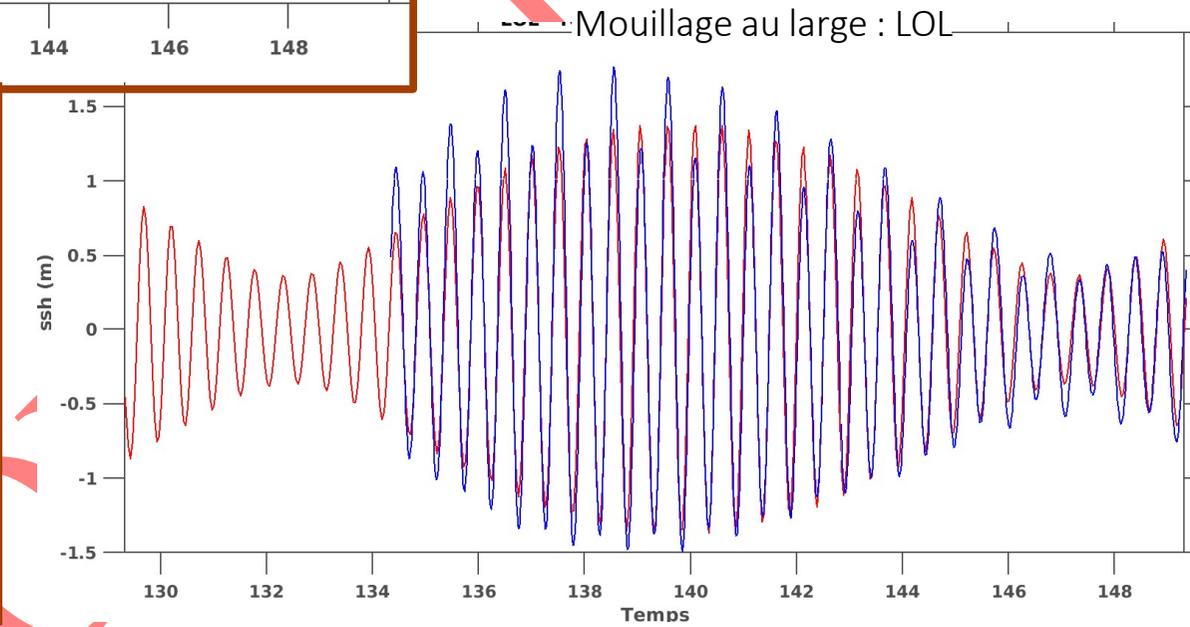
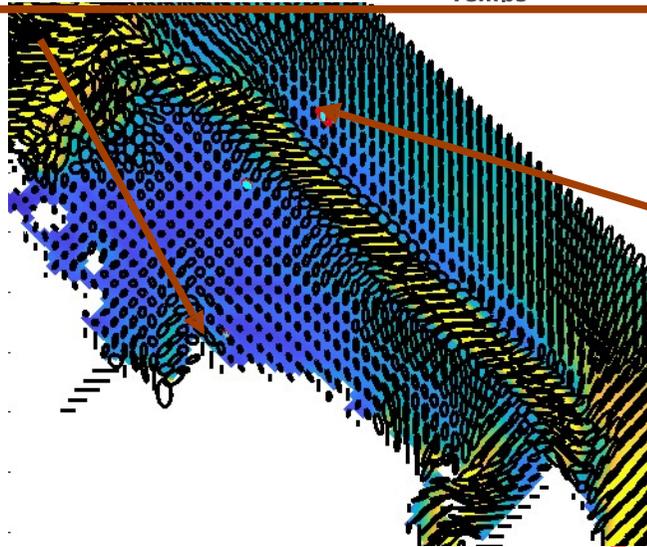


Mouillage au large : IBLrè

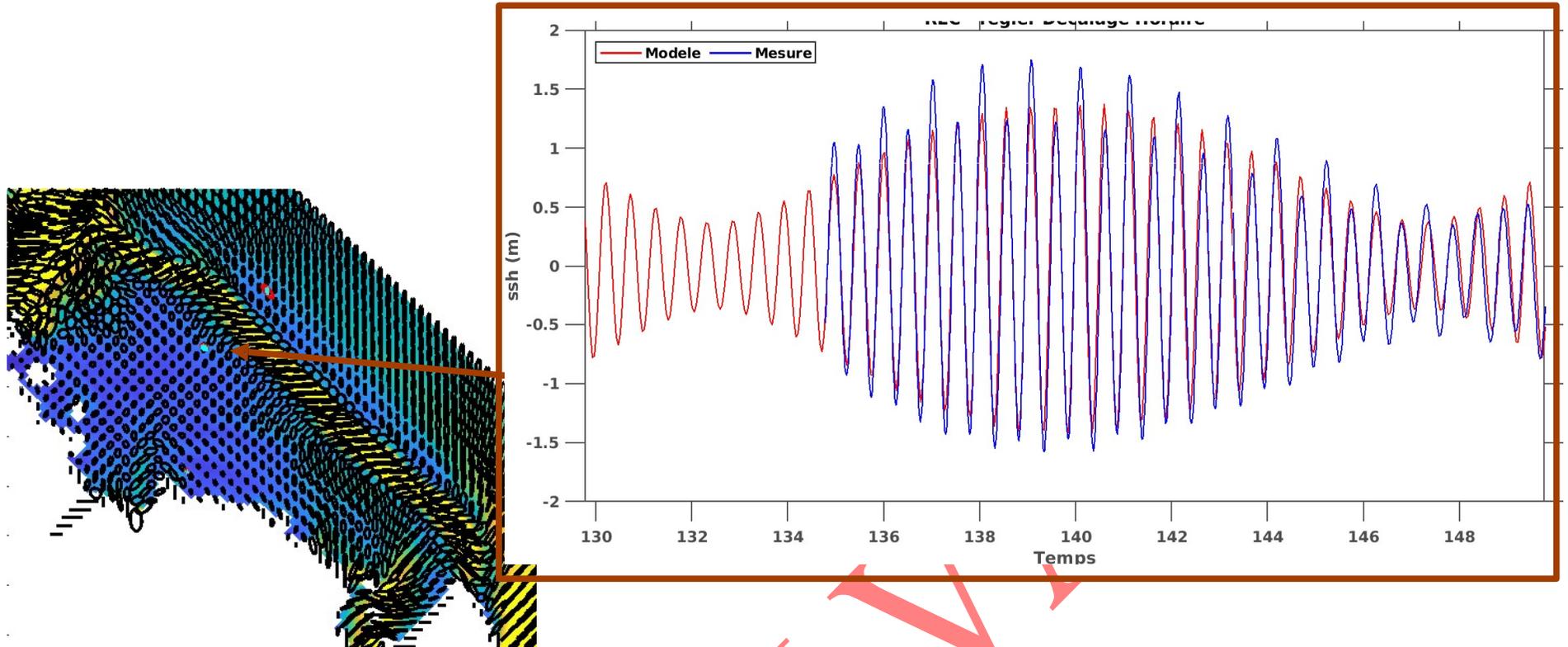




Validation Niveau Longonie



Validation niveau d'eau au-dessus récif



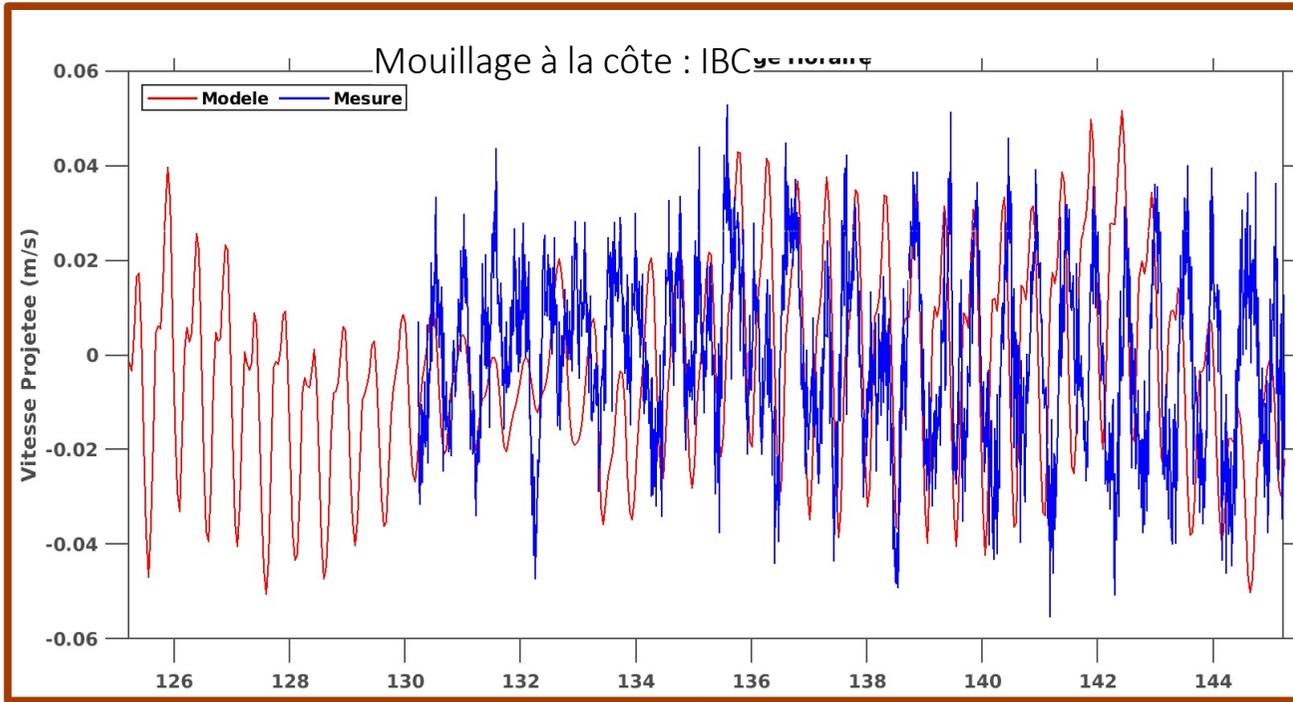
Pas de niveau d'eau à Sada : mouillage SAC et SAL

NON

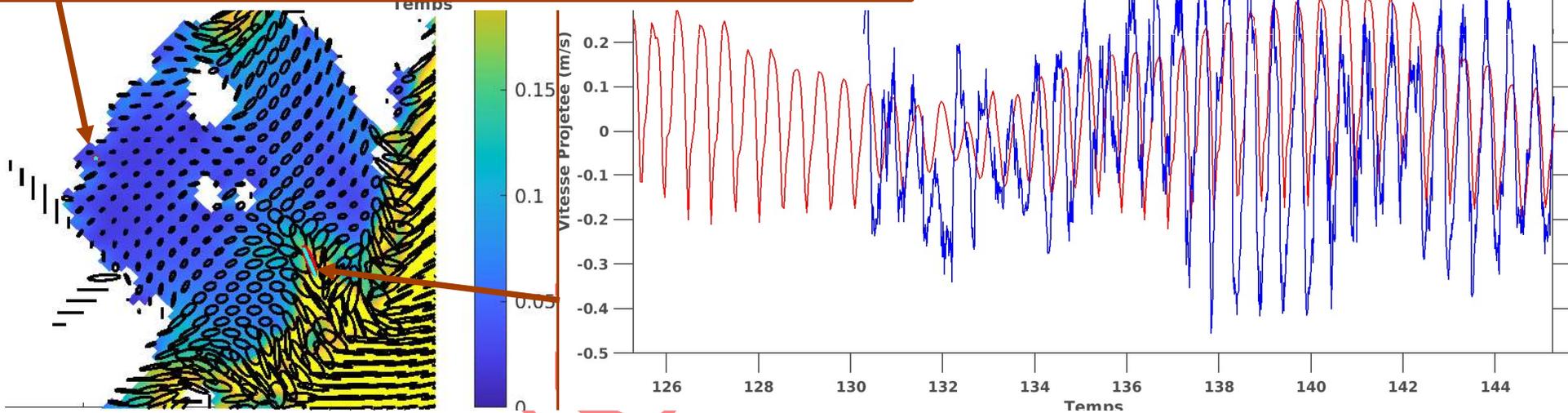
Validation des vitesses

NON VALIDE

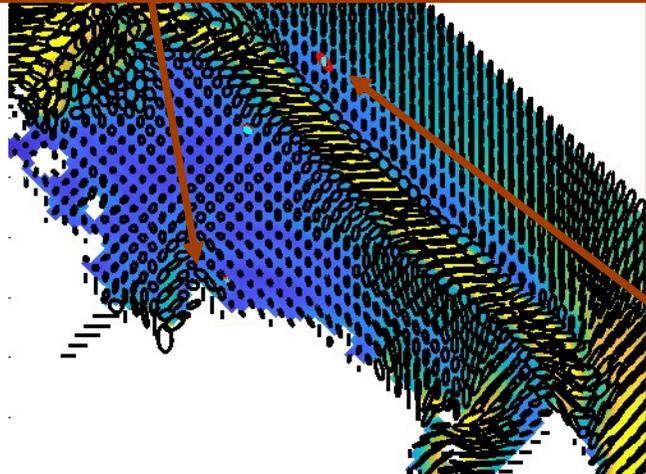
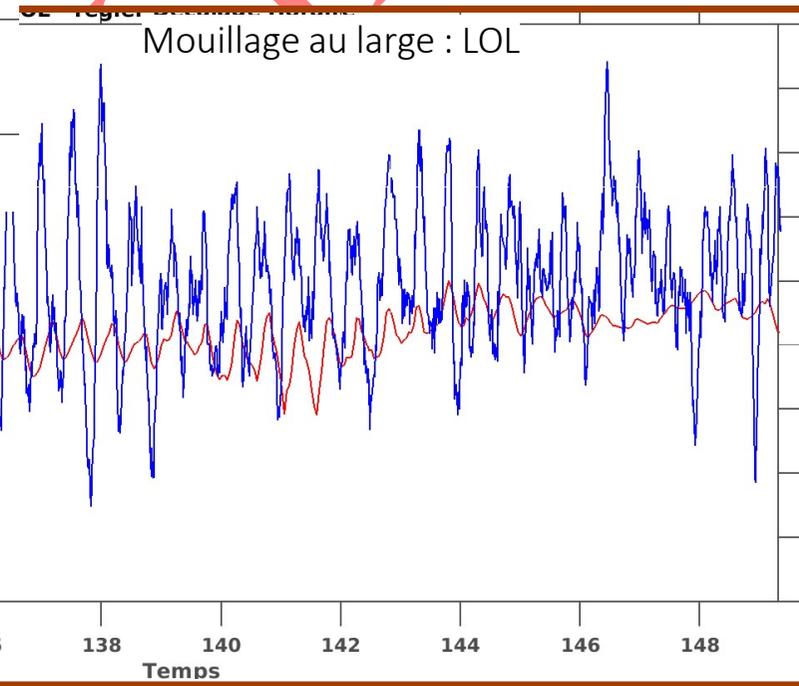
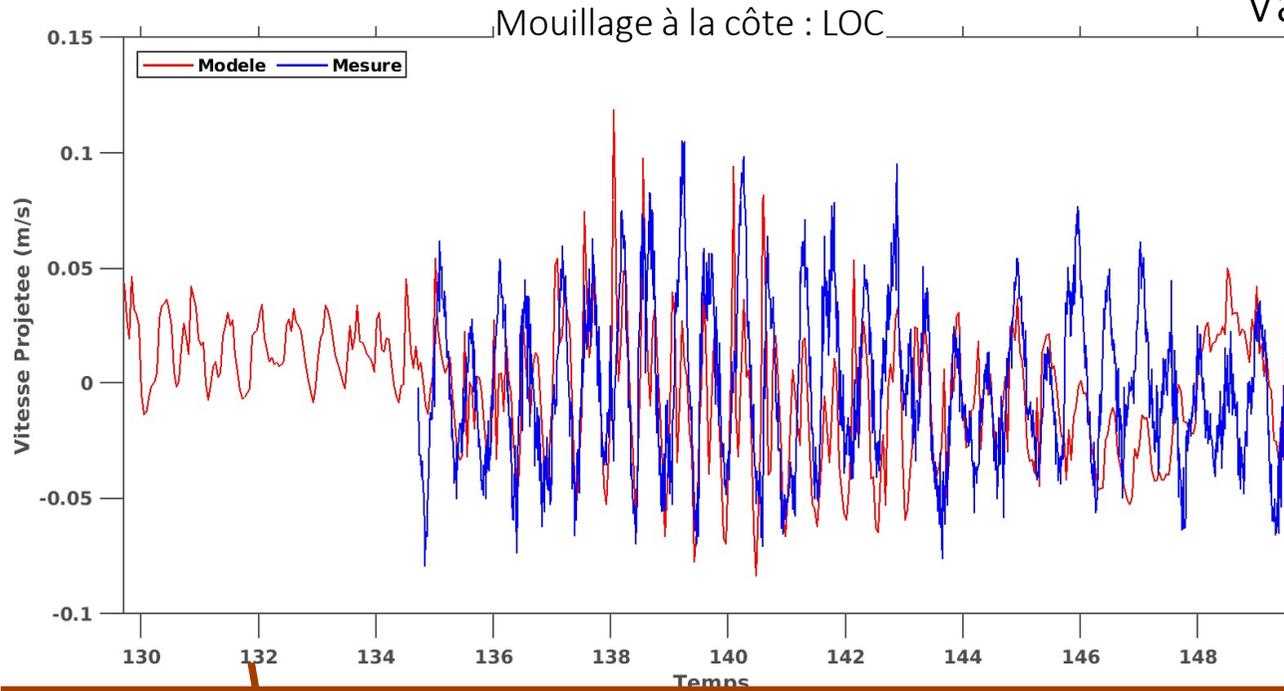
Validation des vitesses : Ironibé



Mouillage au large : IBL

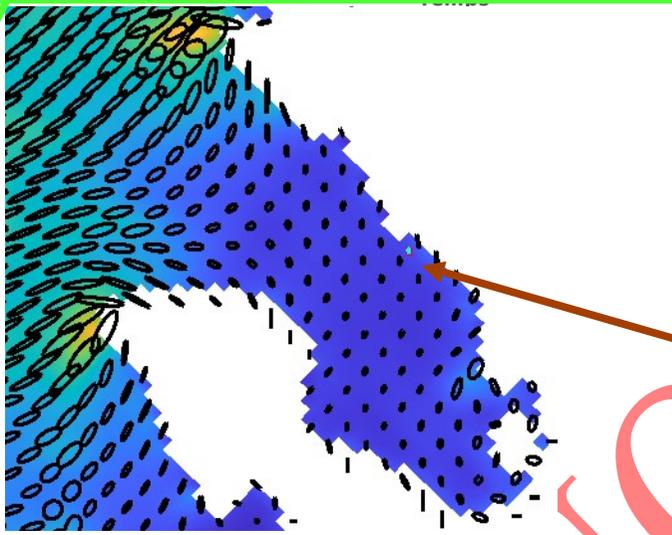
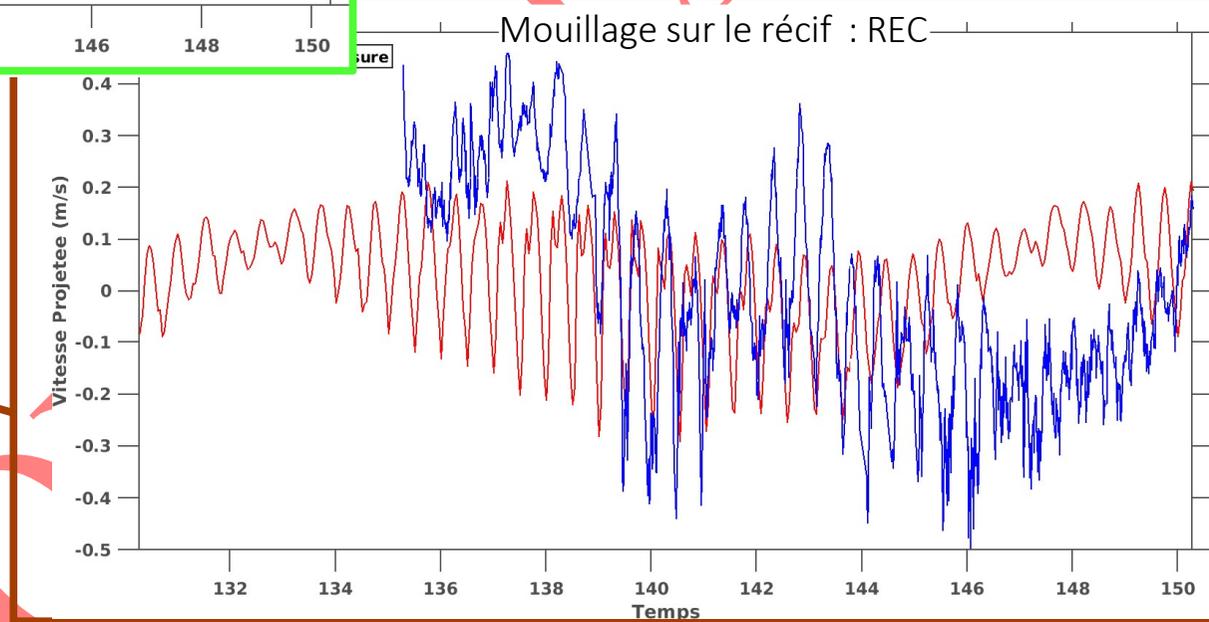
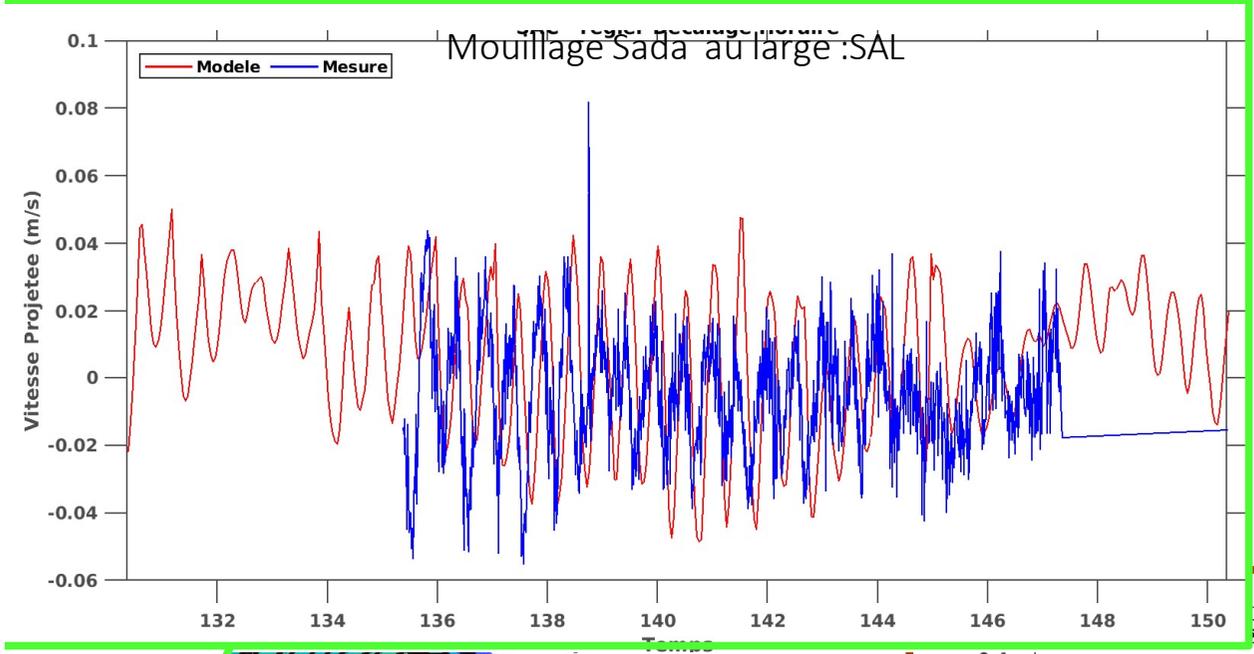


Validation des Vitesses à Longonie



NO

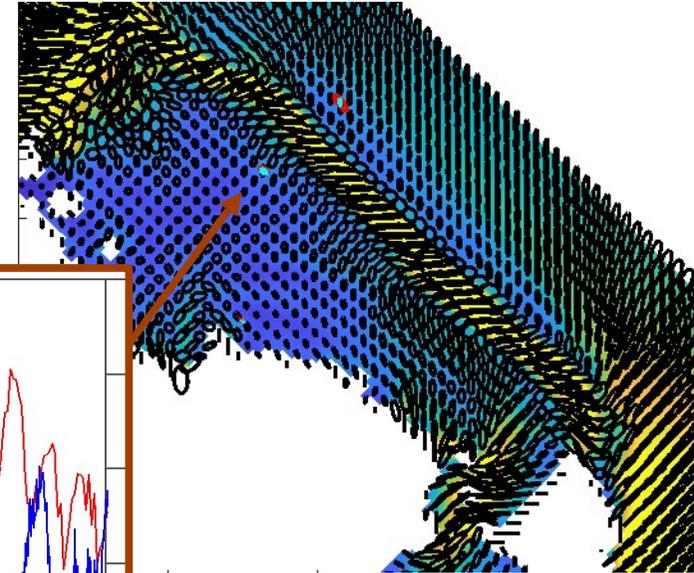
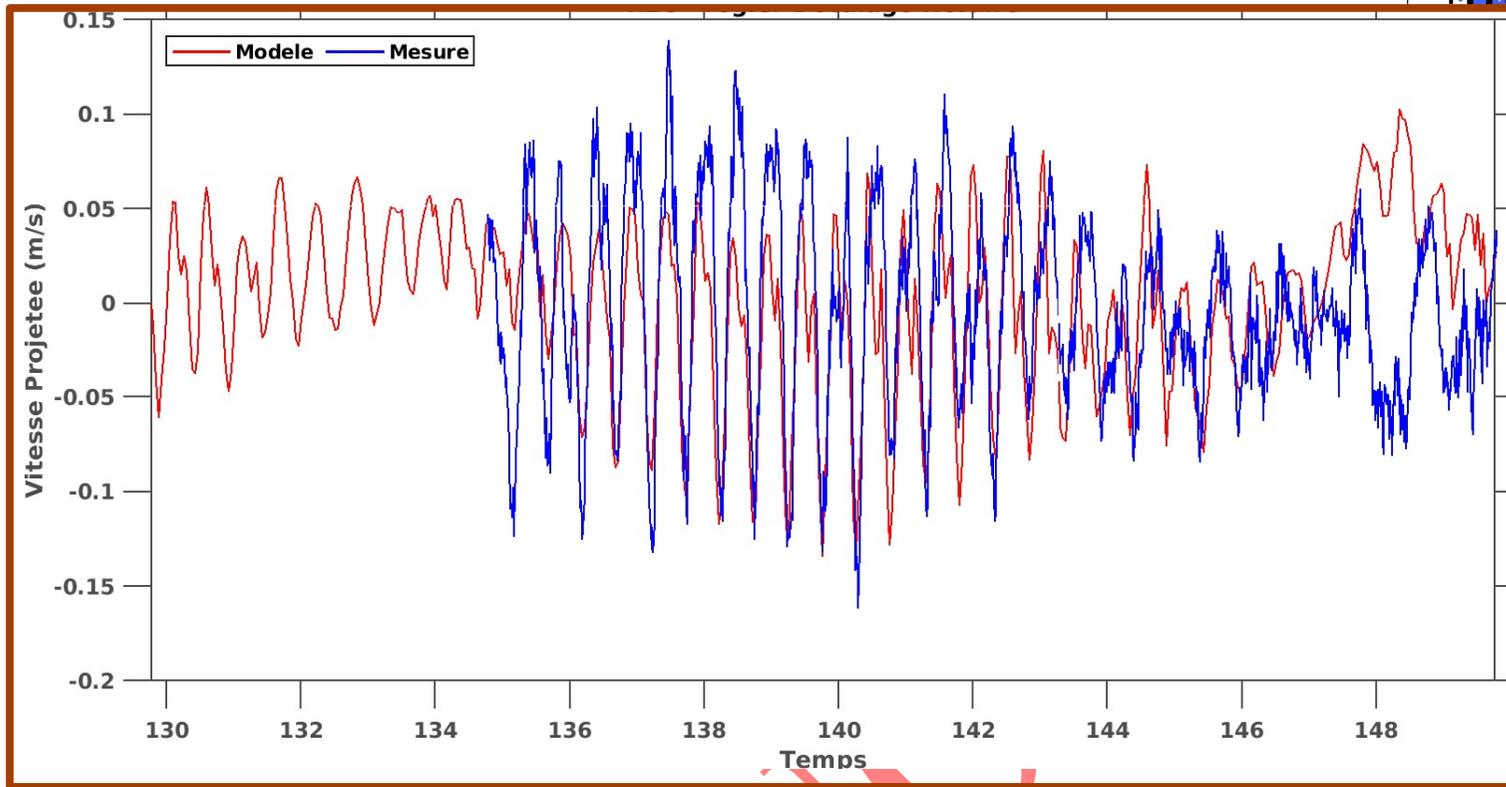
Validation des vitesses à Sada



MADE

NG

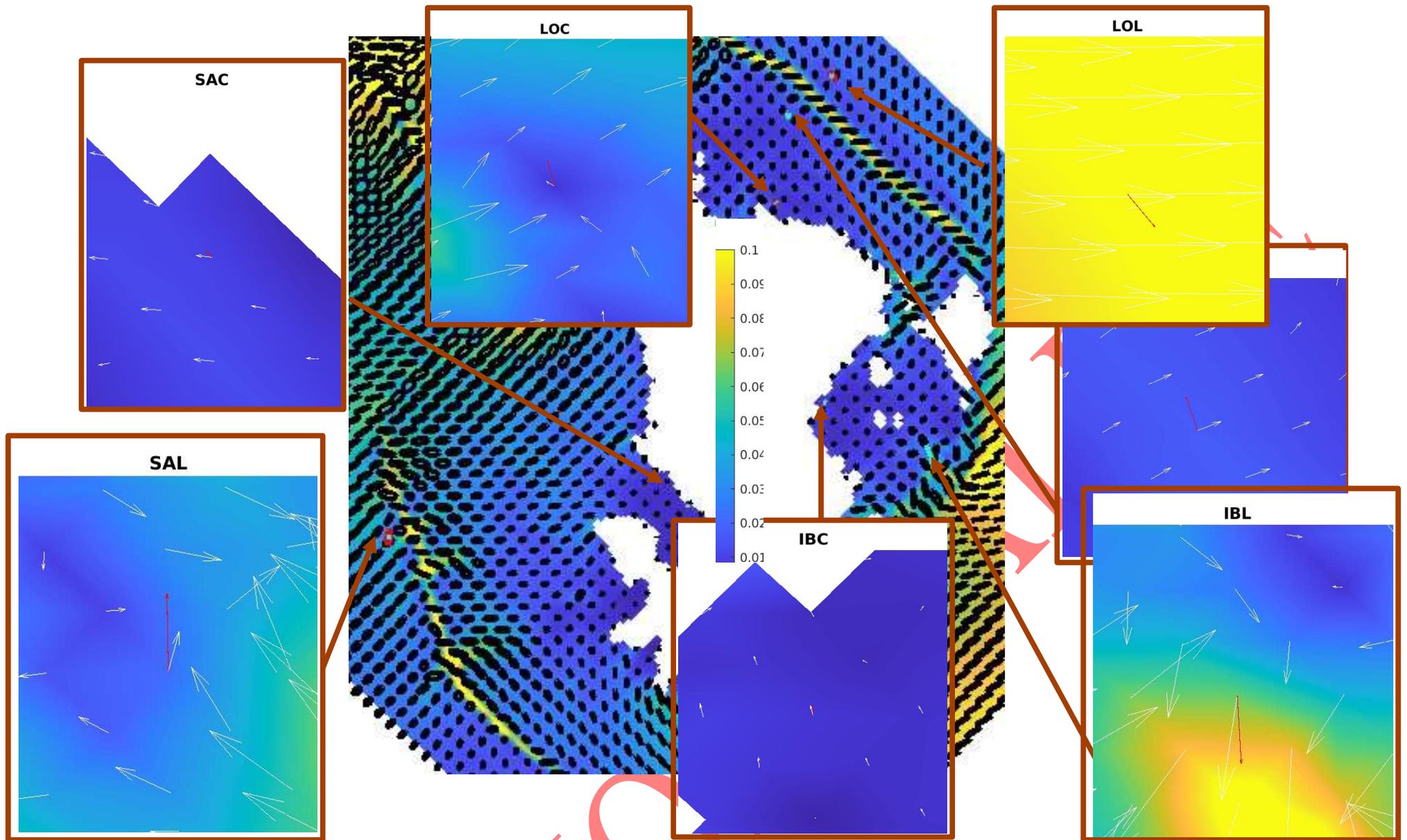
Validation des vitesses au-dessus du récif de Longonie

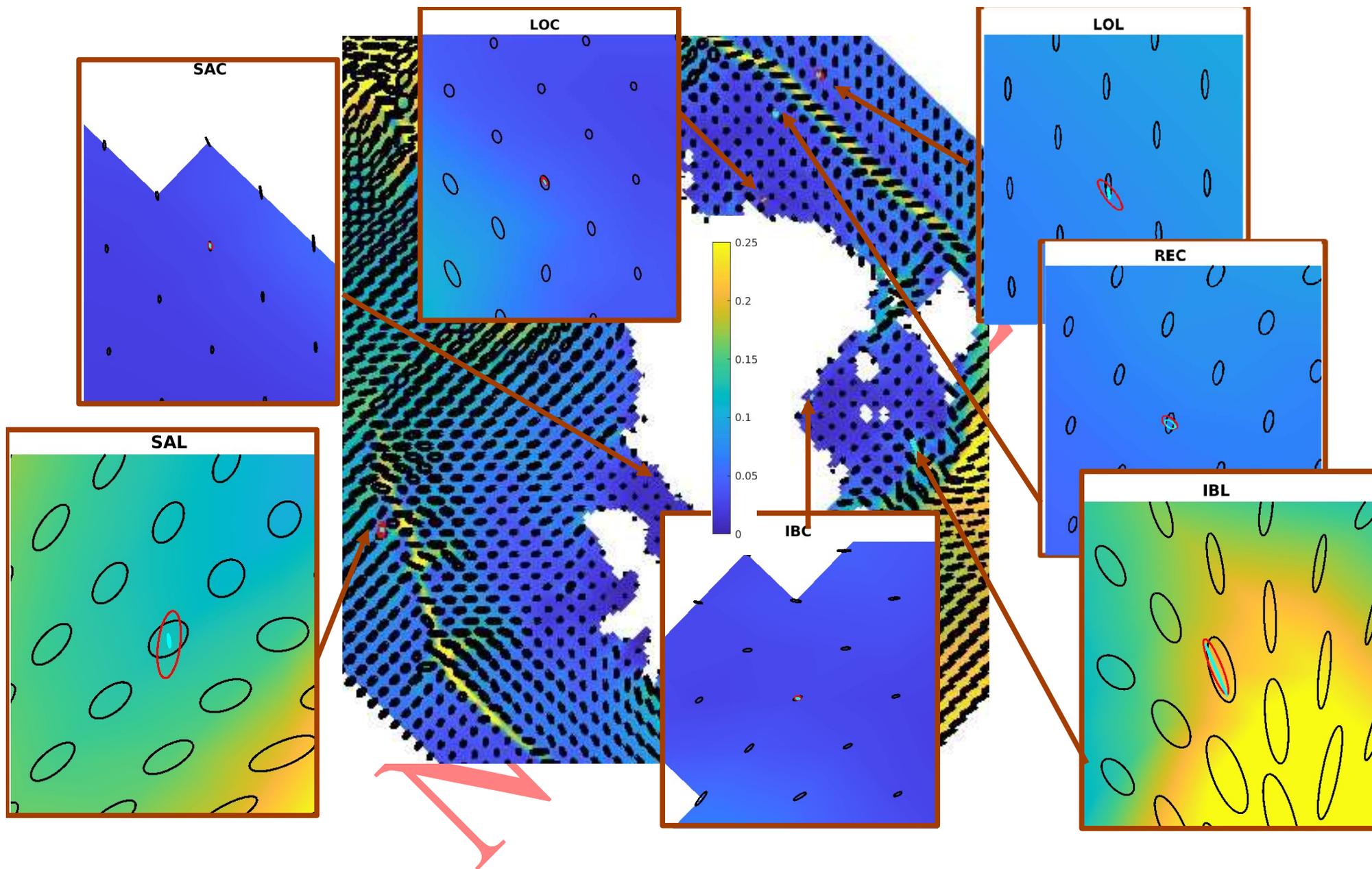


ND

Directions et ellipses des courants

NON VALIDE

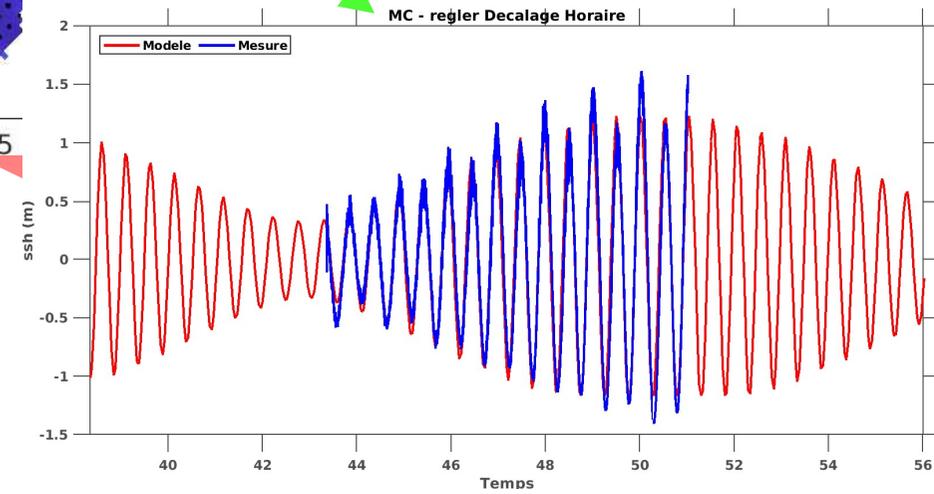
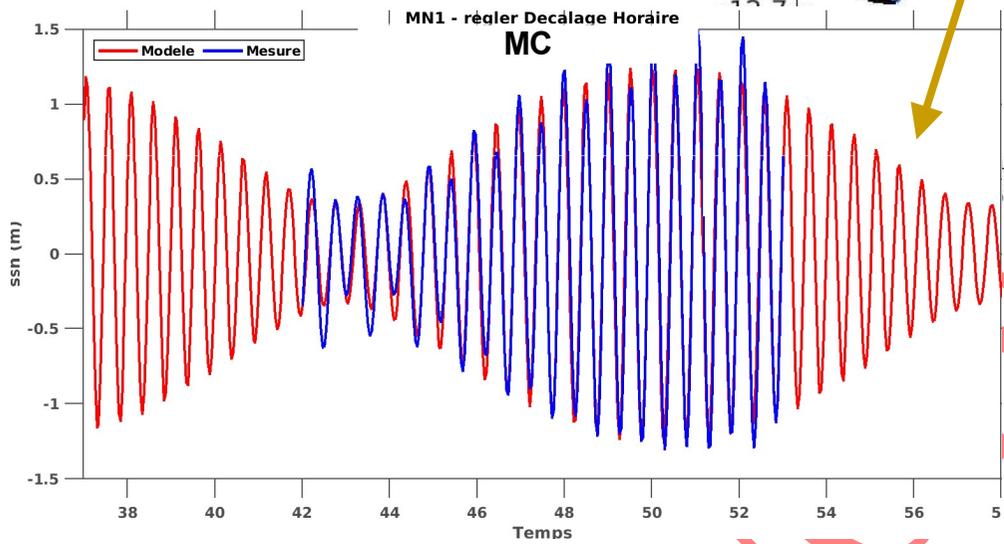
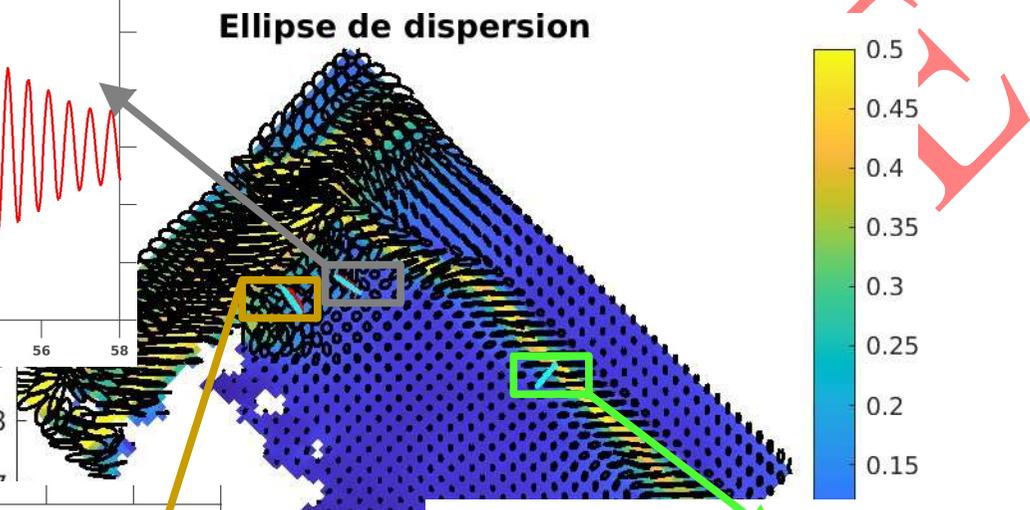
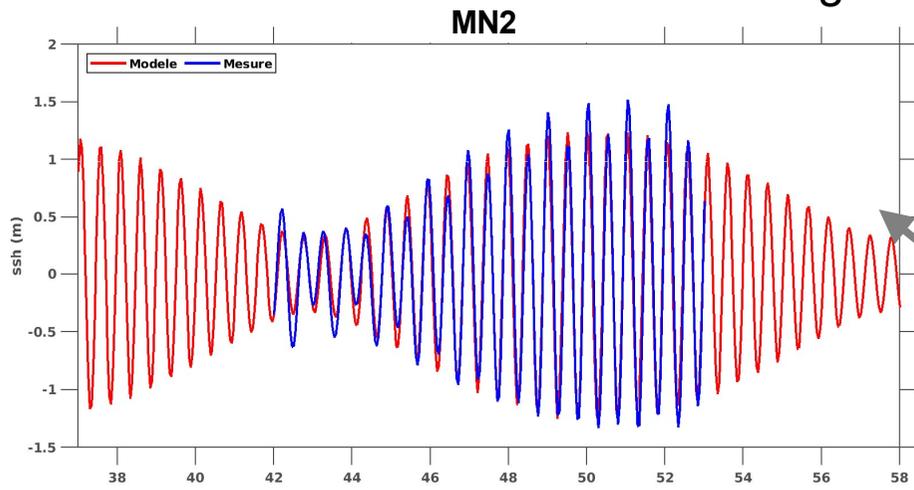




7.1.2 Validation Des modèles Raffinés

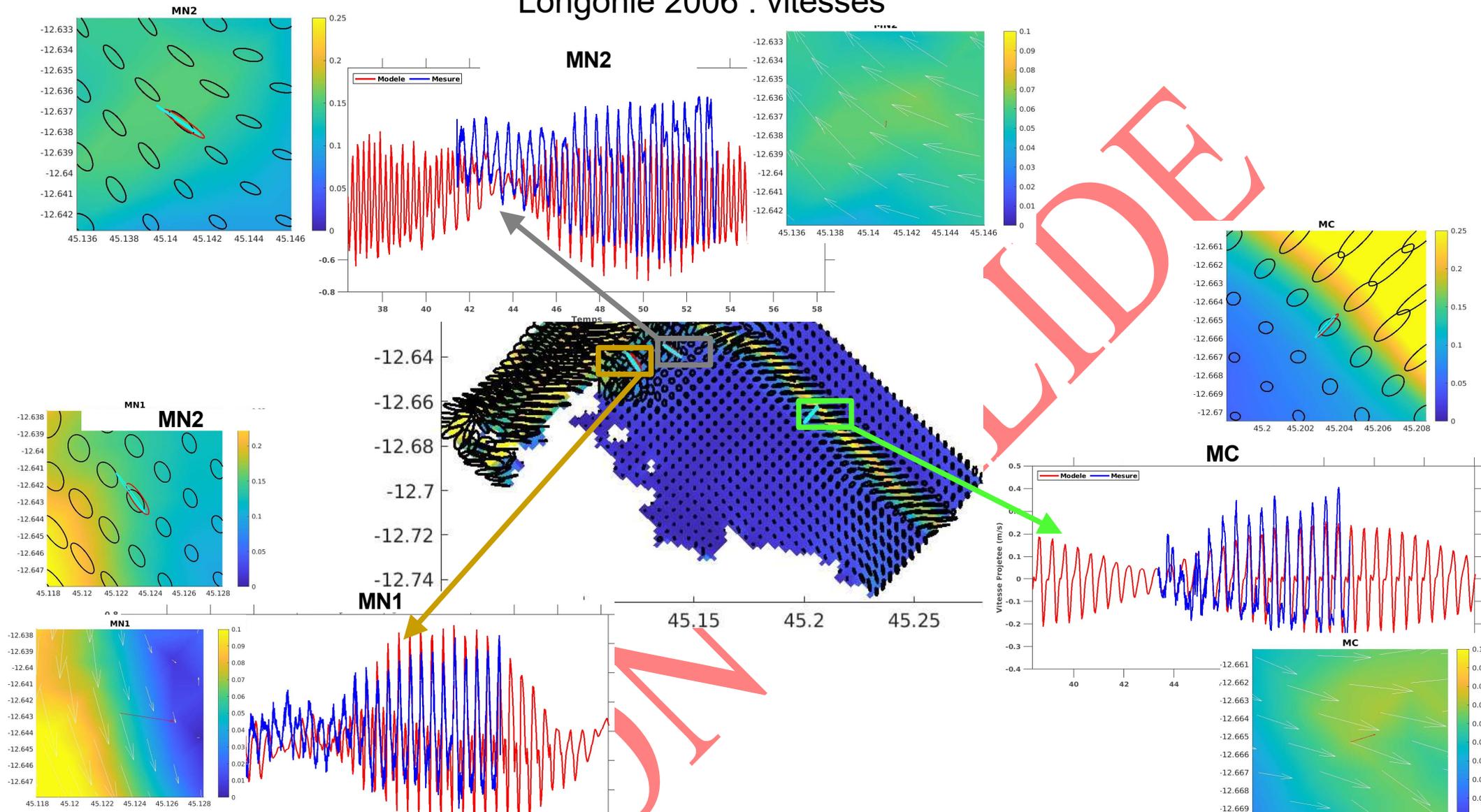
NON VALIDE

Longonie 2006 : Niveau



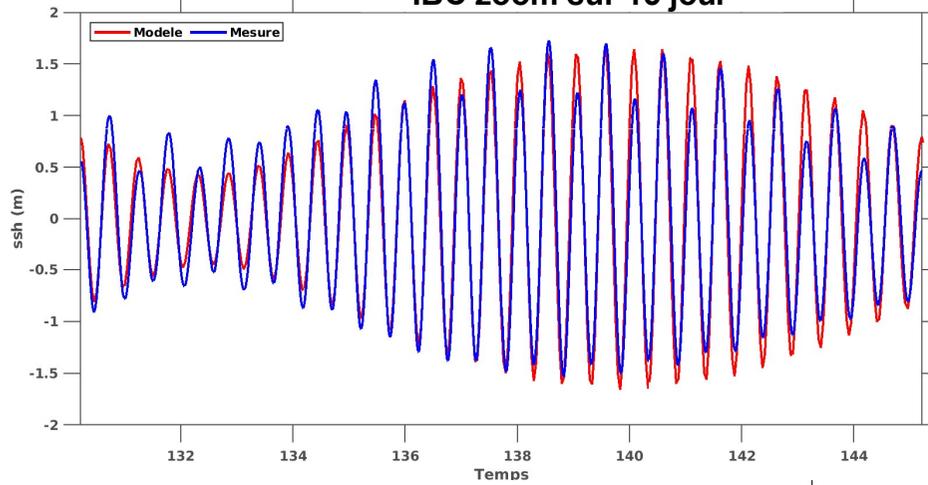
N

Longonie 2006 : vitesses

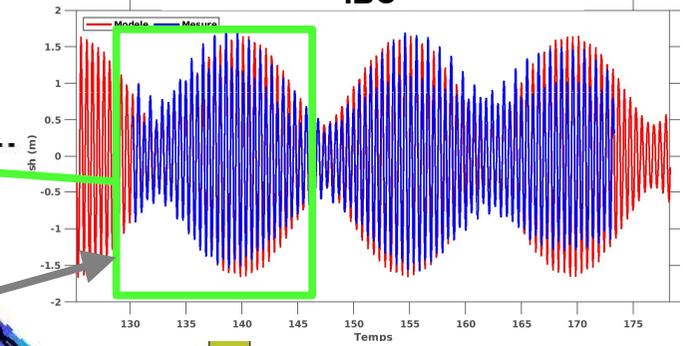


Ironibe 2023 : Niveau

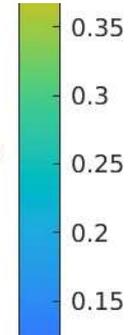
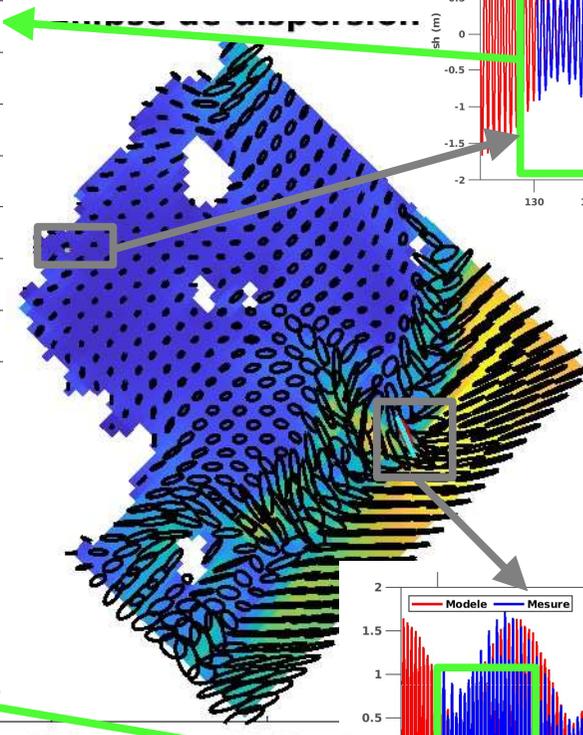
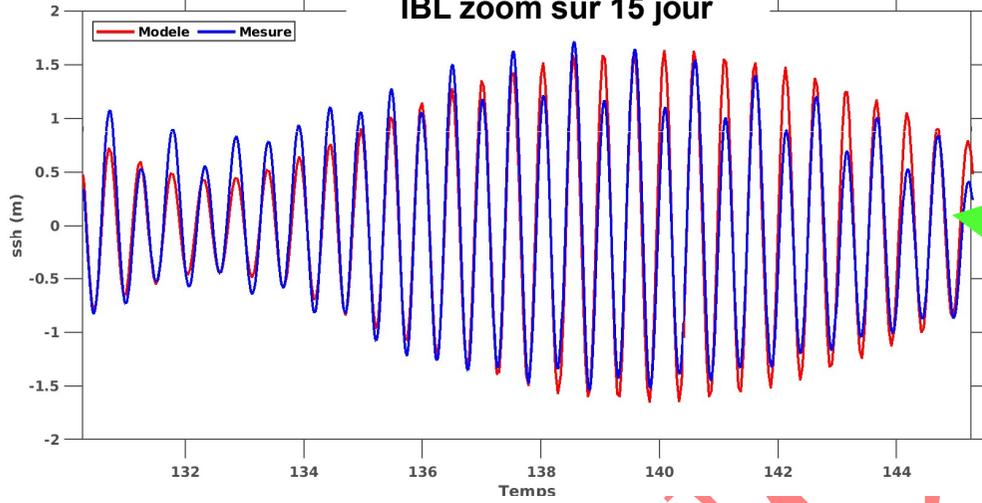
IBC zoom sur 15 jour



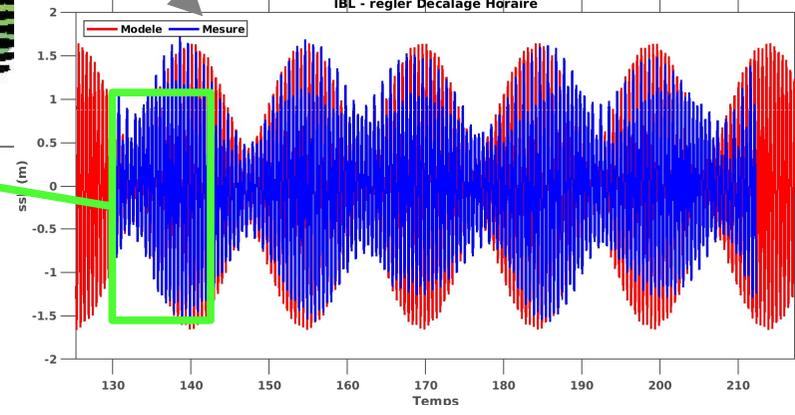
IBC



IBL zoom sur 15 jour

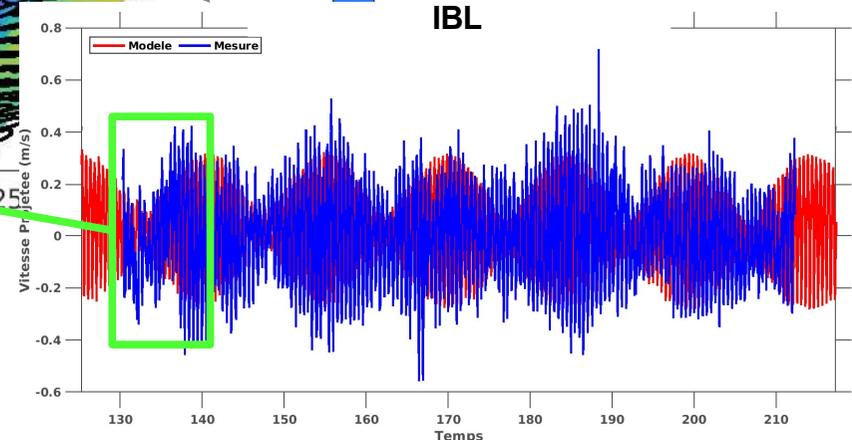
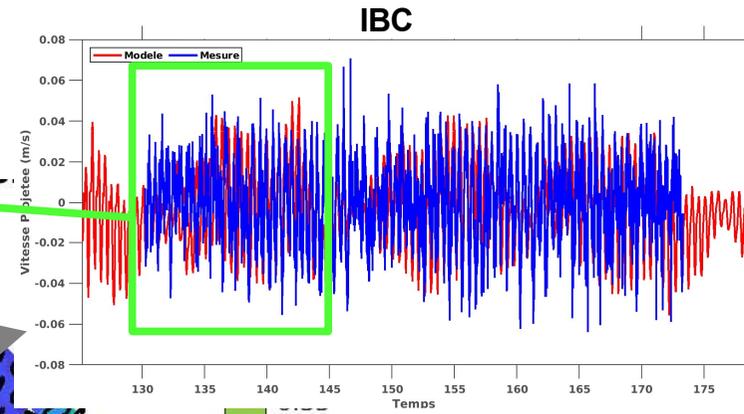
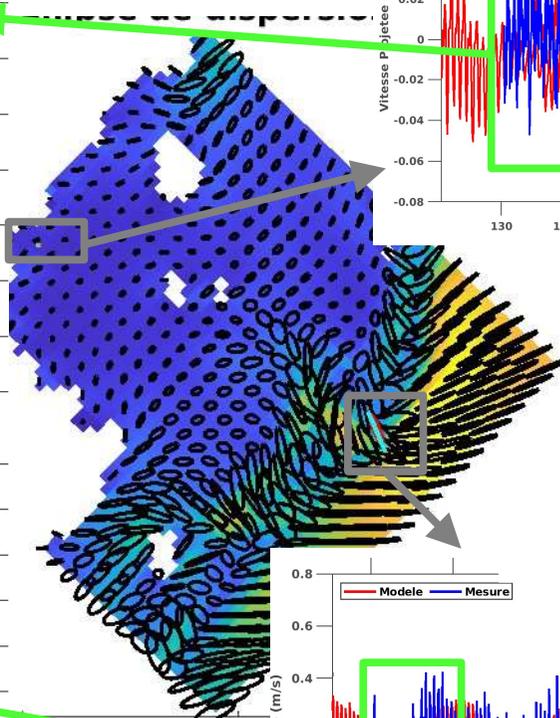
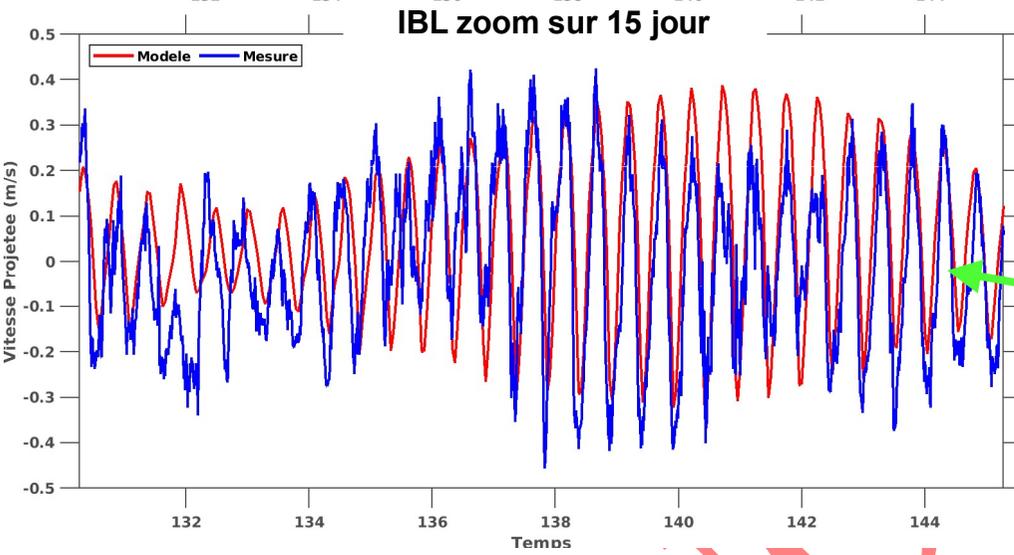
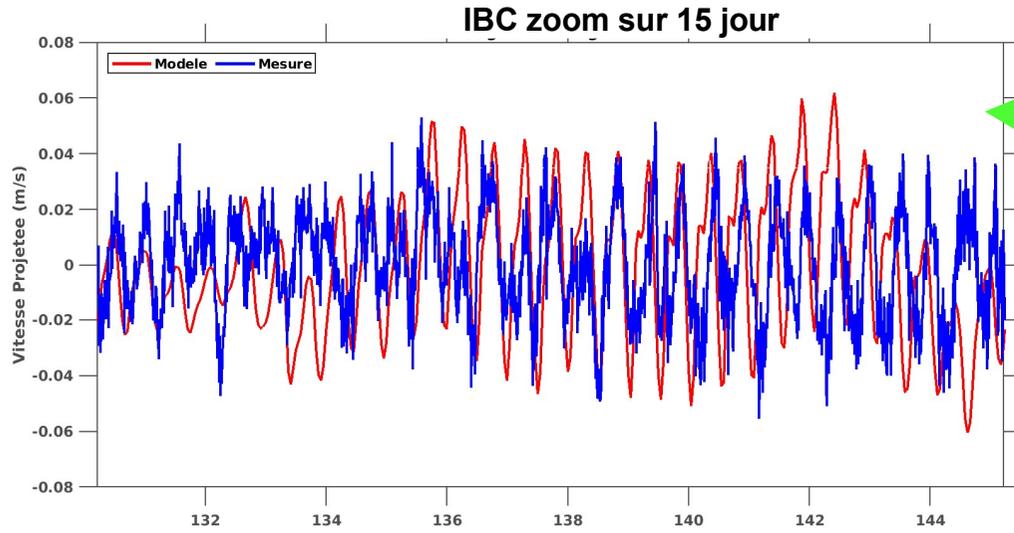


IBL - regler Decalage Horaire



ND

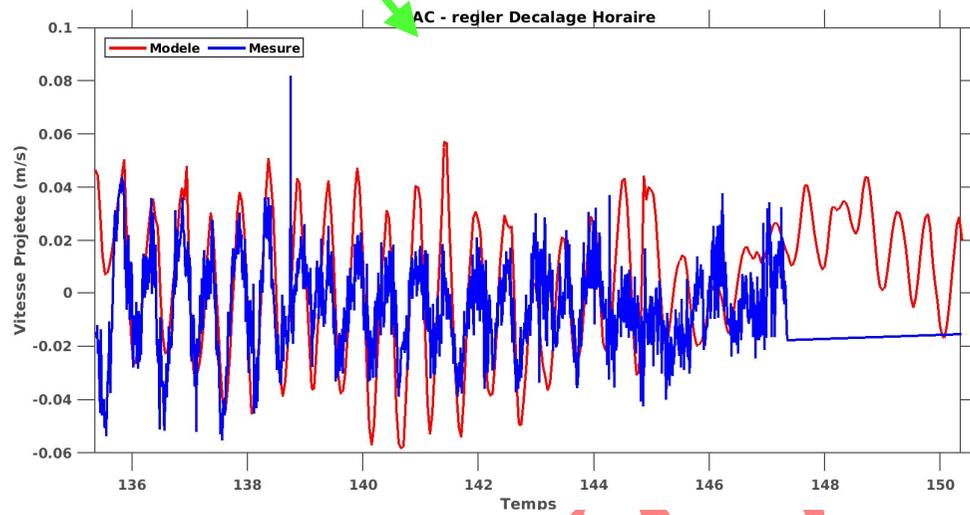
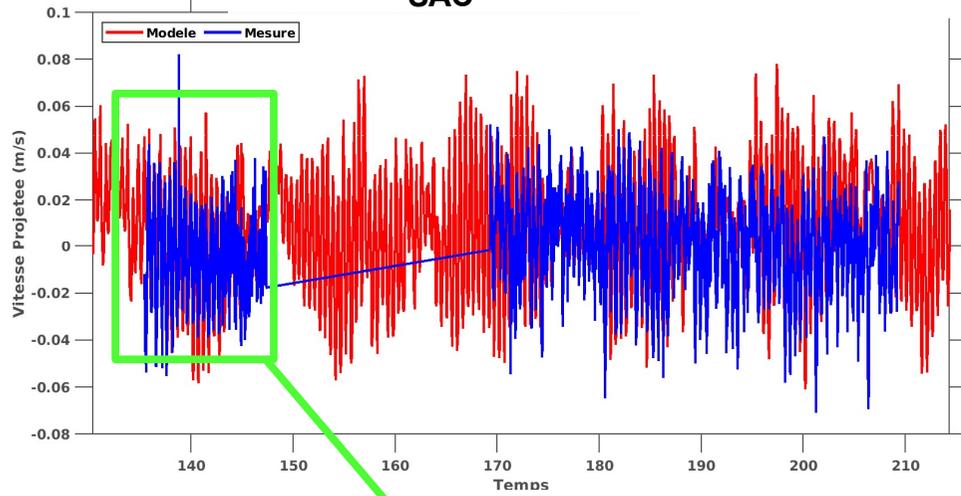
Ironibe 2023



NR

Sada 2023 : vitesses

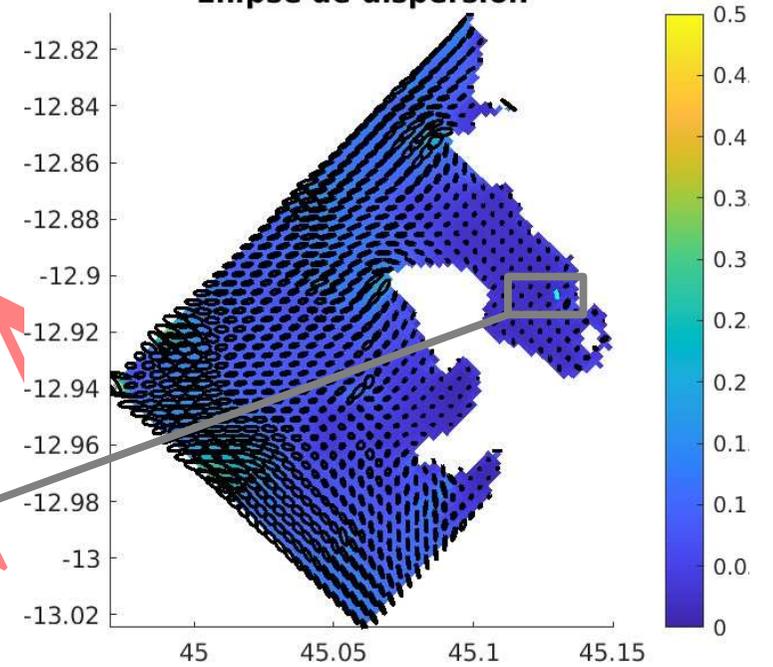
SAC



AC - regler Decalage Horaire

Un seul DACP dans la zone de zoom et pas de niveau d'eau

Ellipse de dispersion



NC

7.2 RESULTATS DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

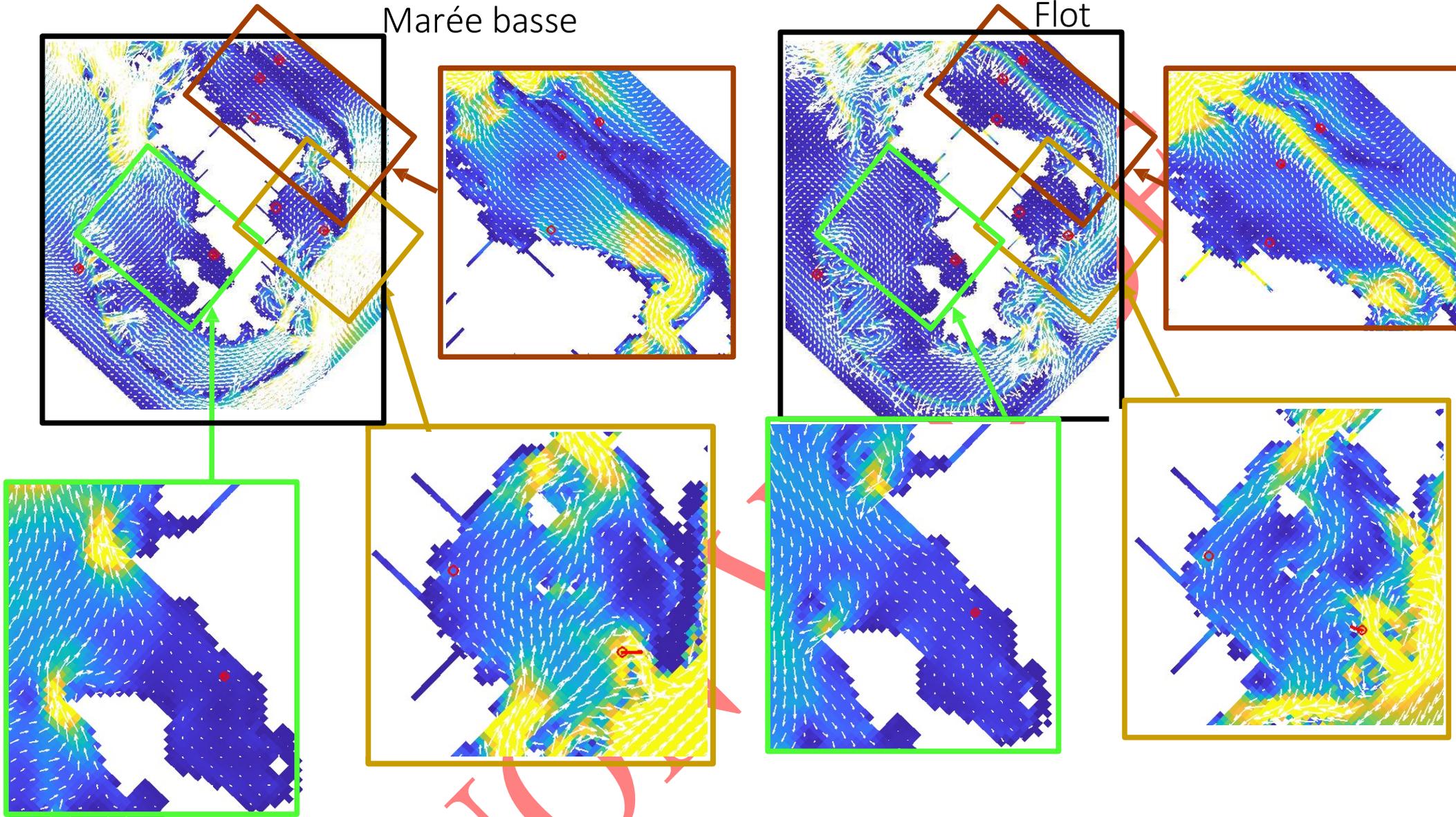
NON VALIDE

Exemple de Circulation au cours
d'un cycle de marée

NON VALIDE

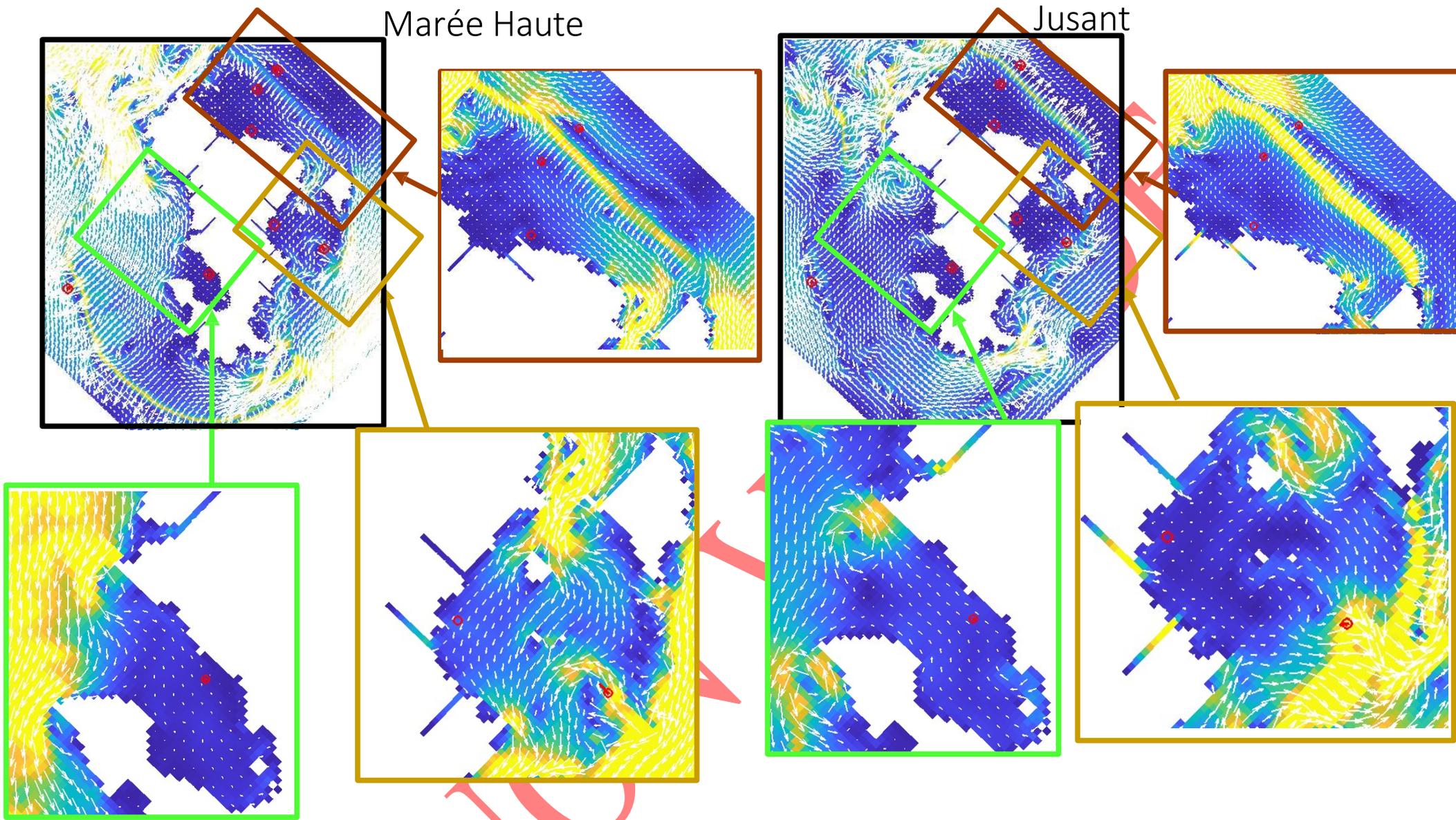
Marée basse

Flot



Marée Haute

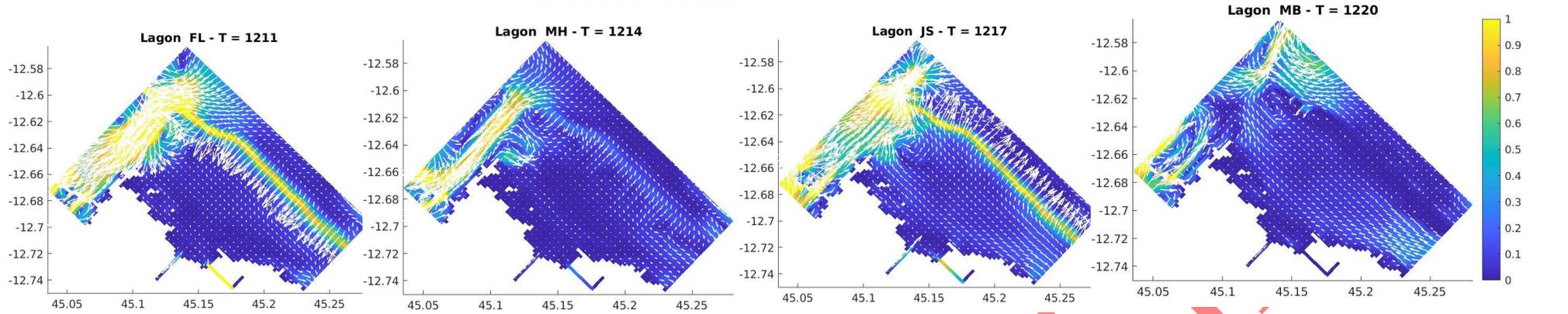
Jusant



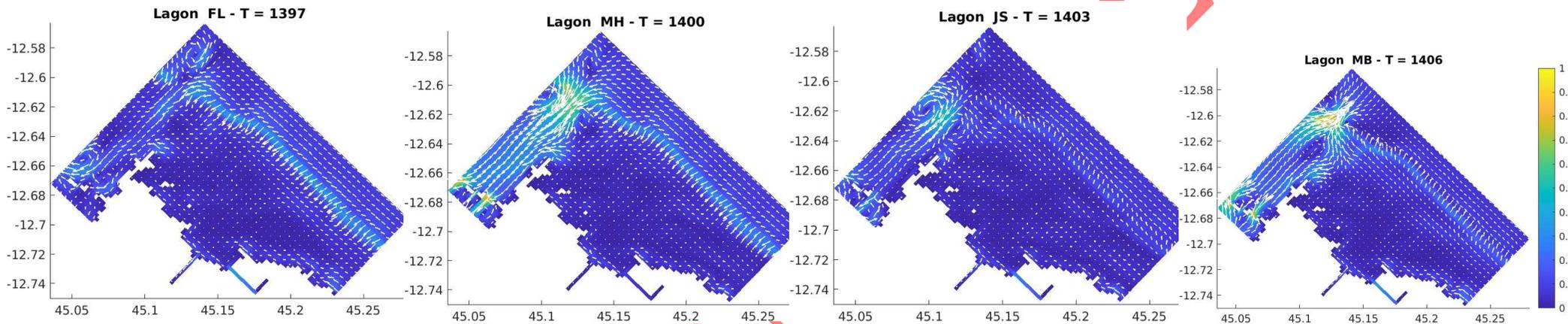
ND

Longonie 2006

Mortes-eaux



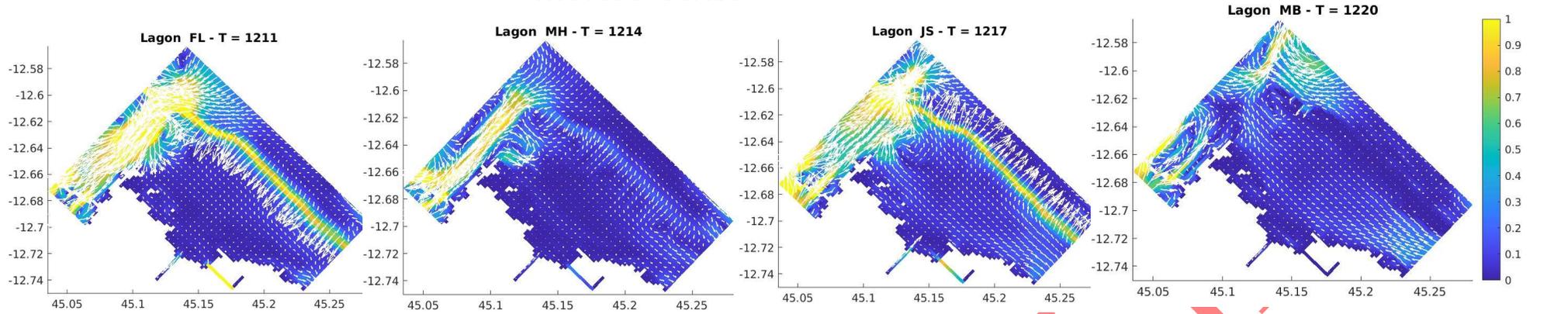
Mortes-eaux



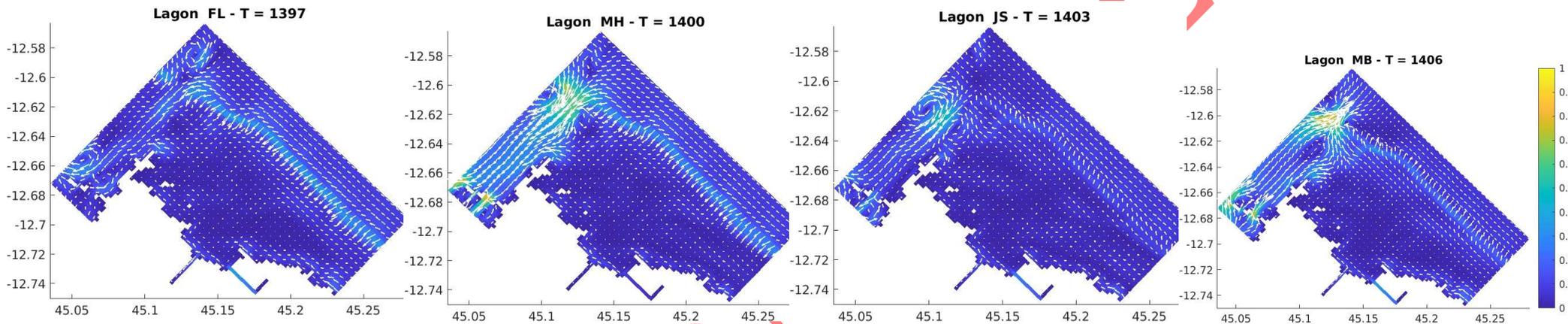
NOI

Longonie 2006

Mortes-eaux



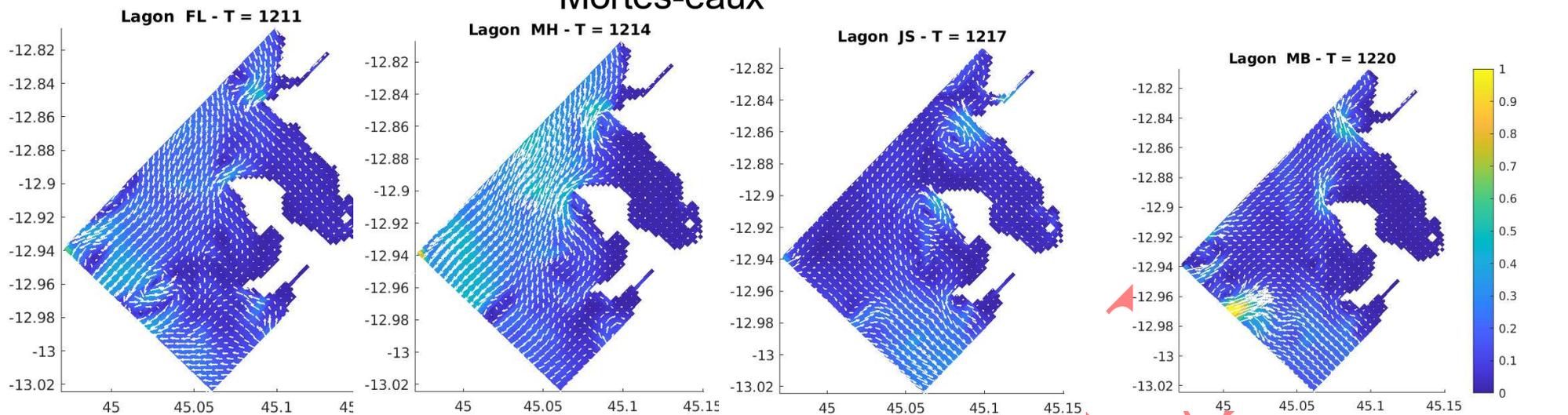
Mortes-eaux



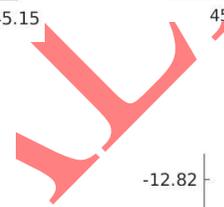
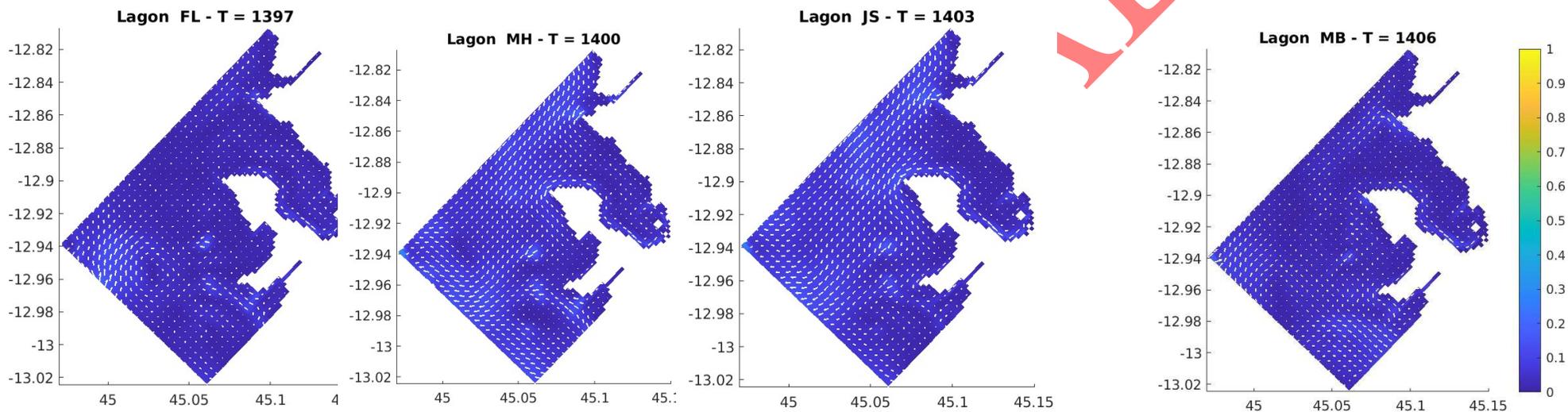
NOI

Sada 2023

Mortes-eaux



Mortes-eaux



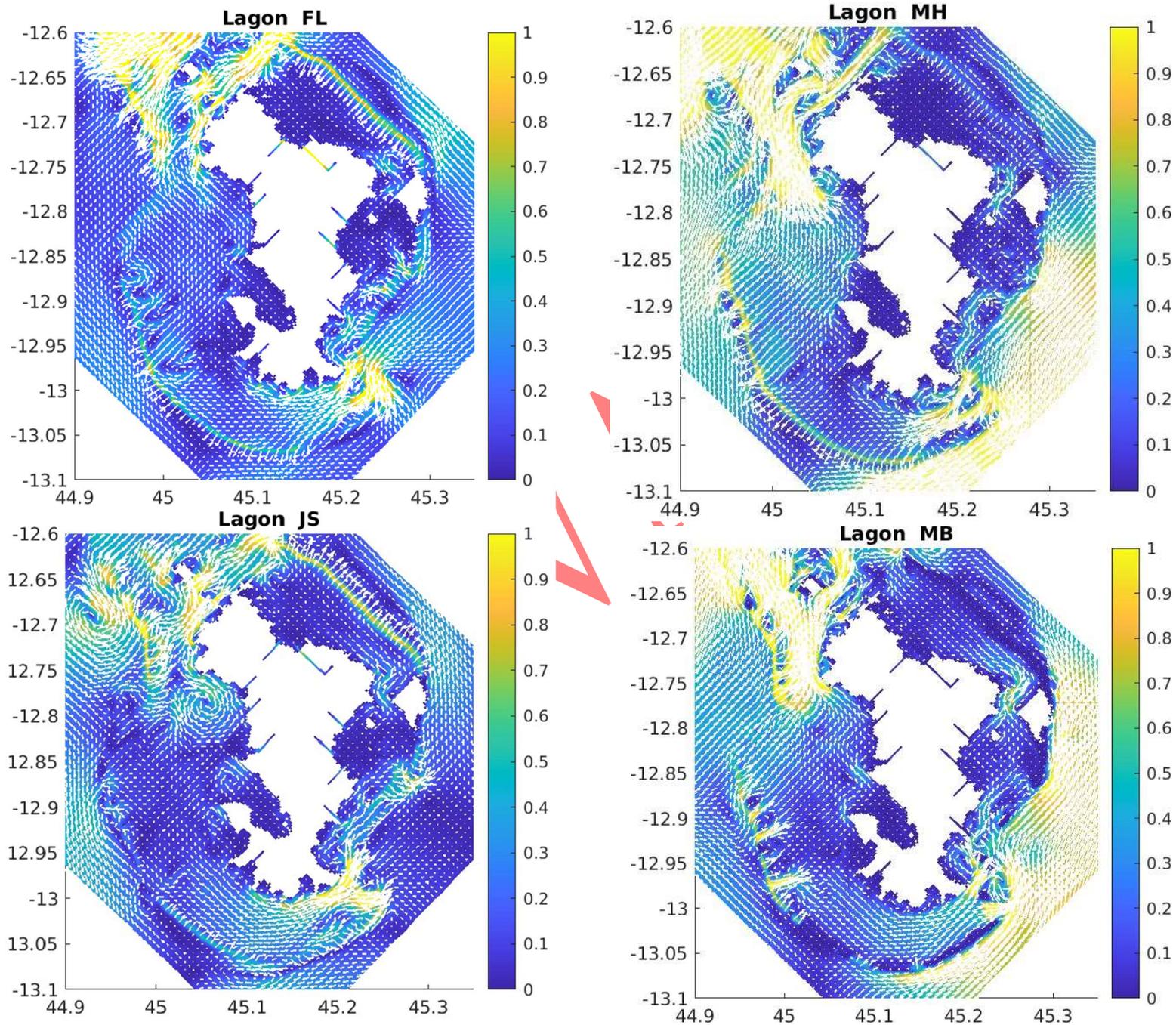
Scénario Vives-eaux

NON VALIDE

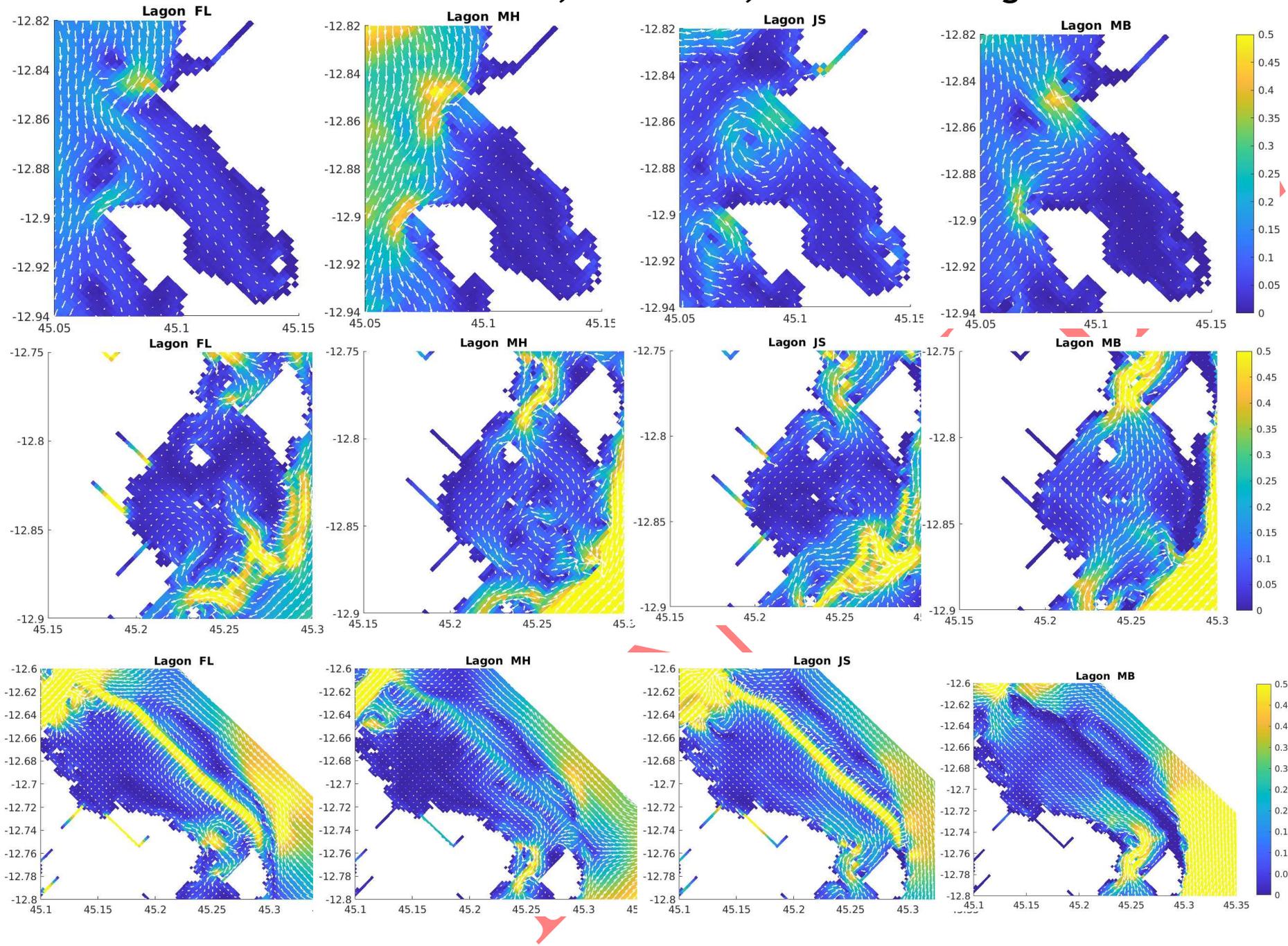
NON VALIDE

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré



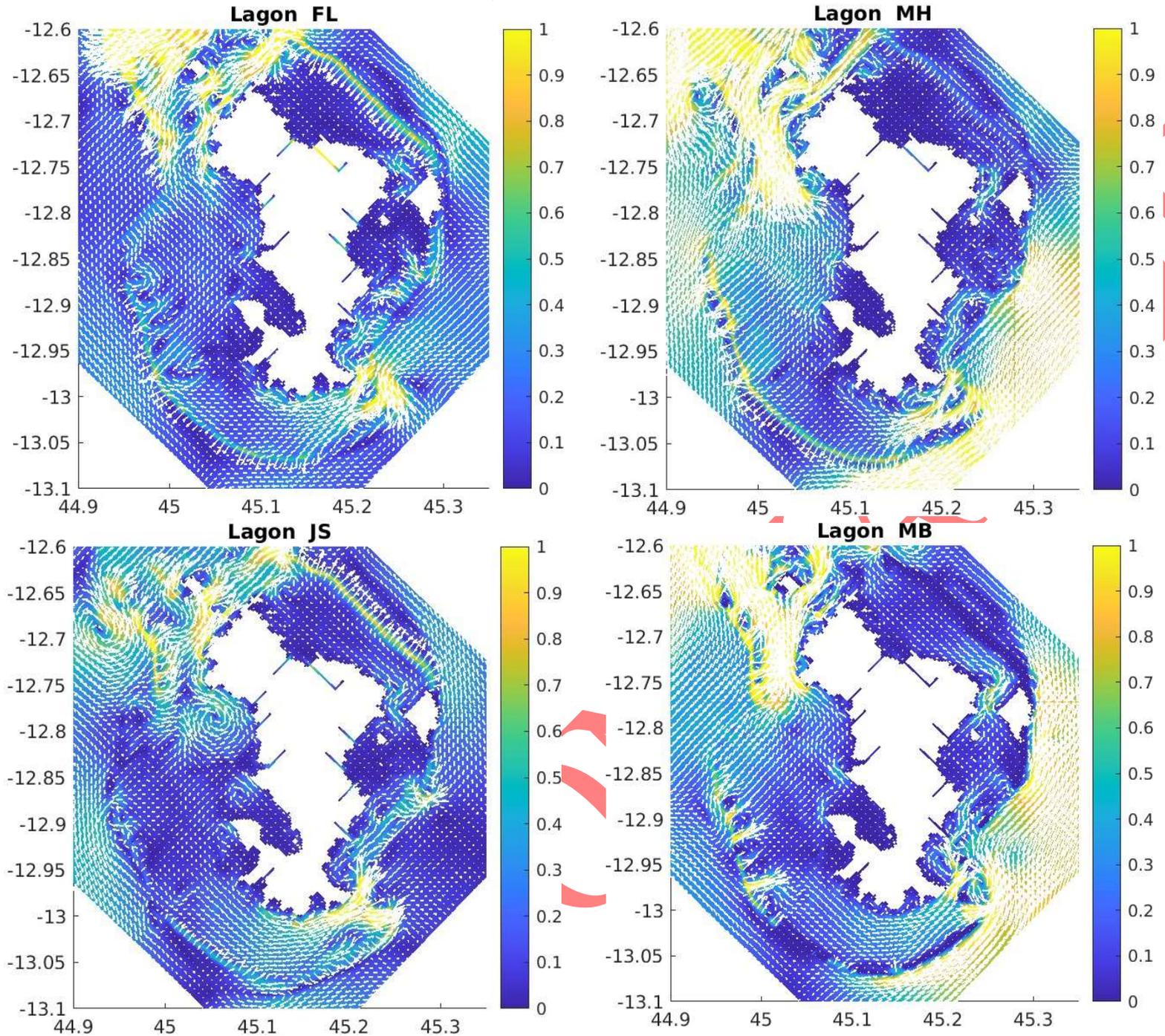
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré



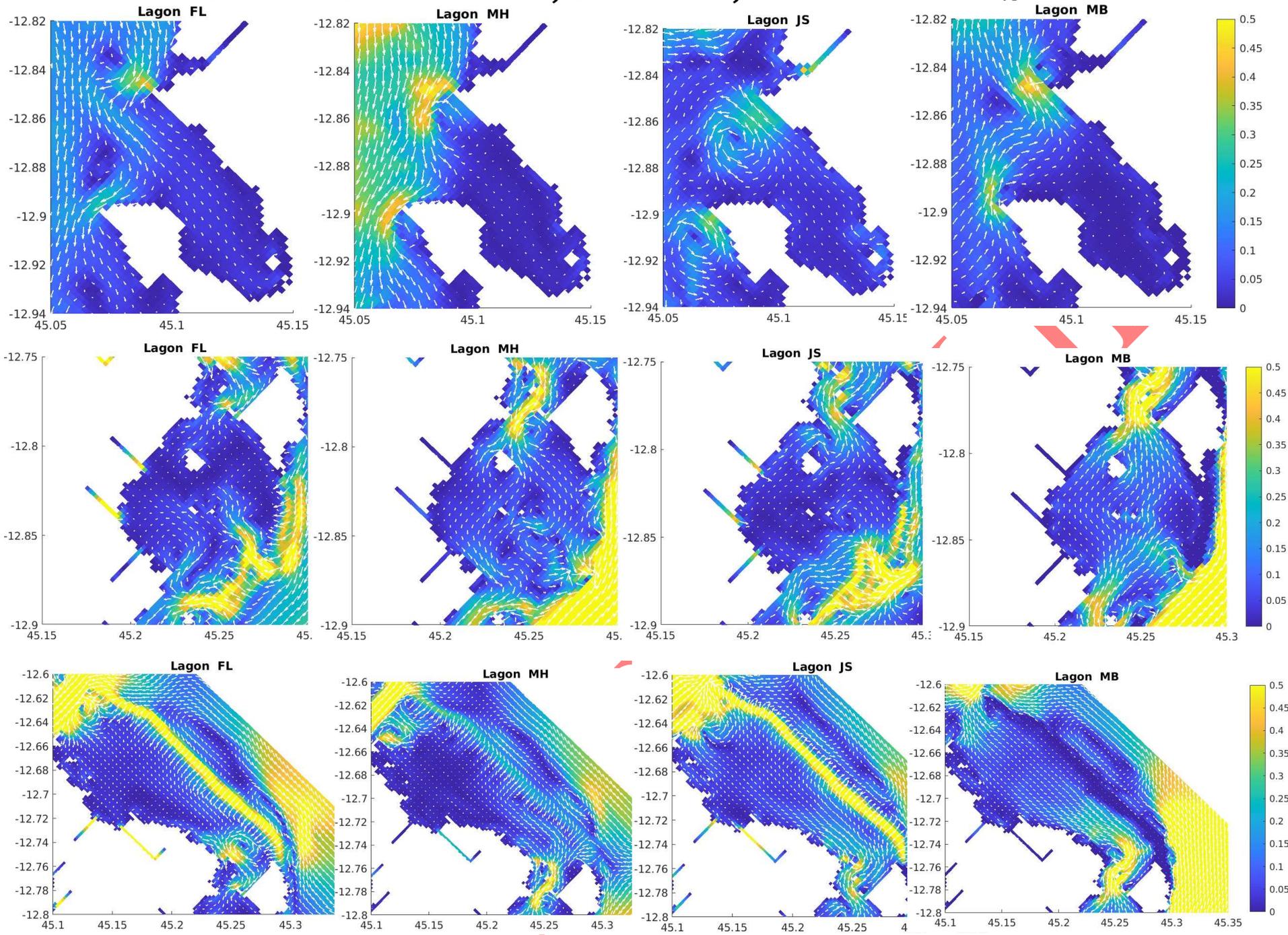
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré

NON VALIDE

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré



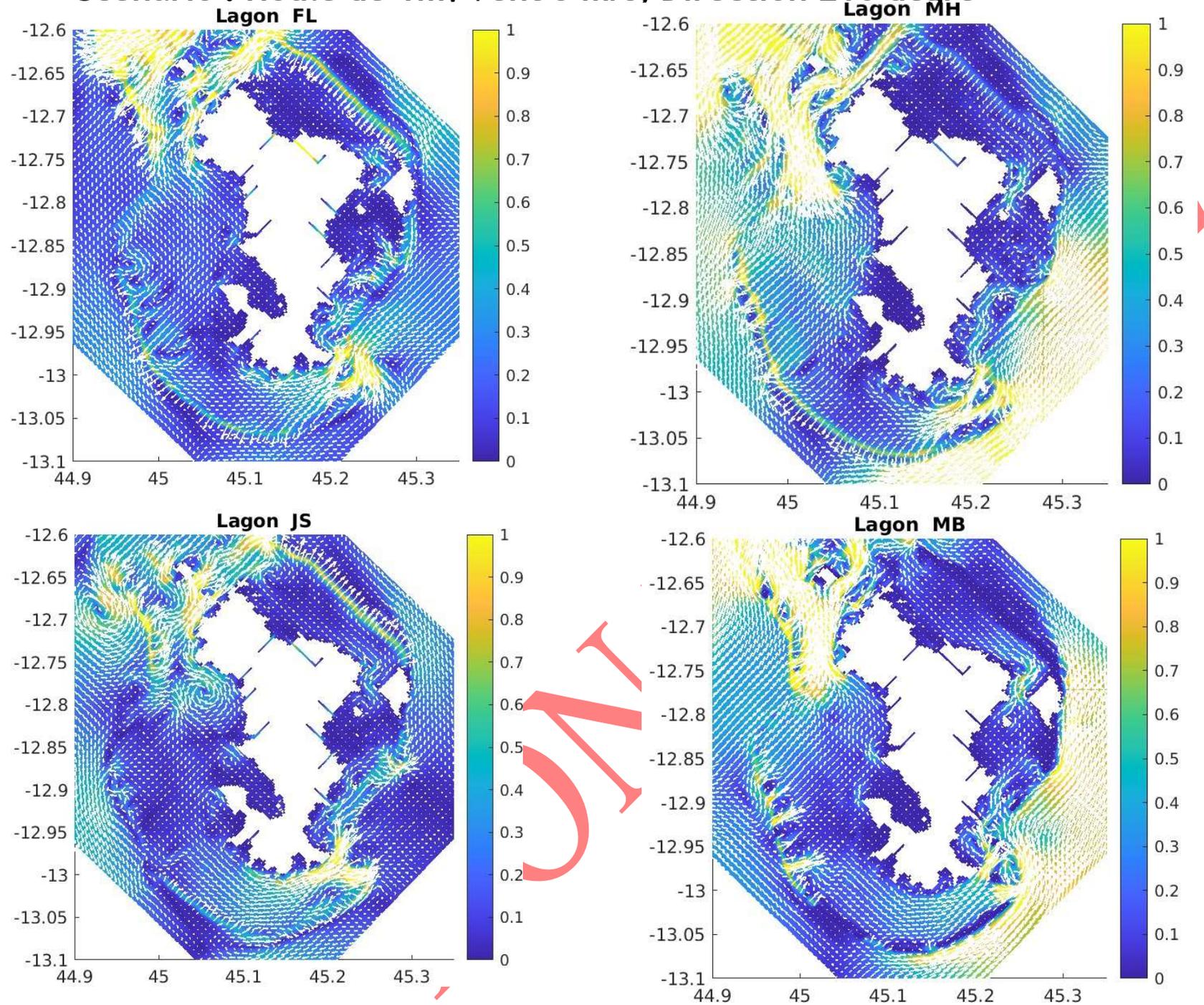
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré



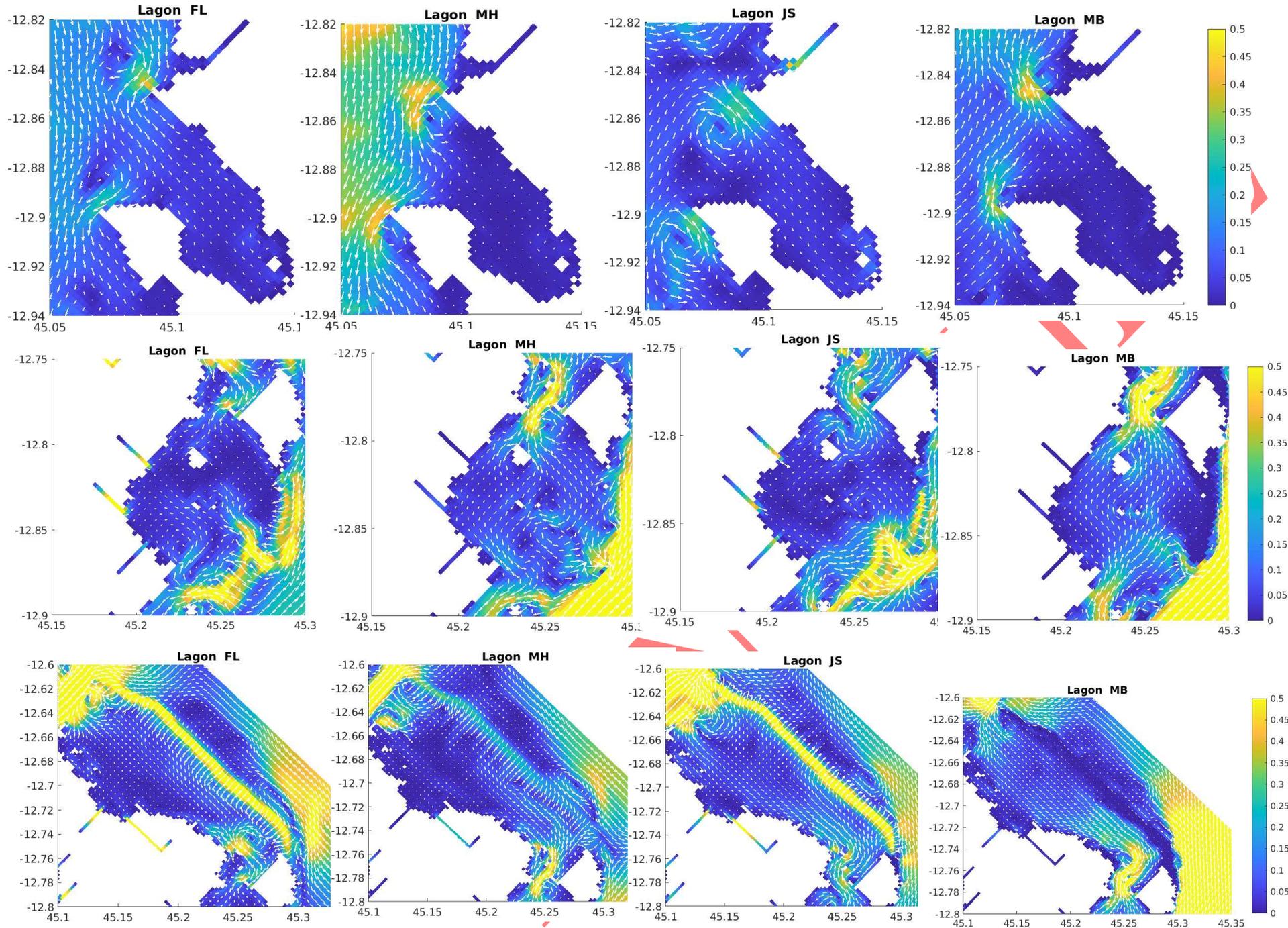
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré

NON VALIDE

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré



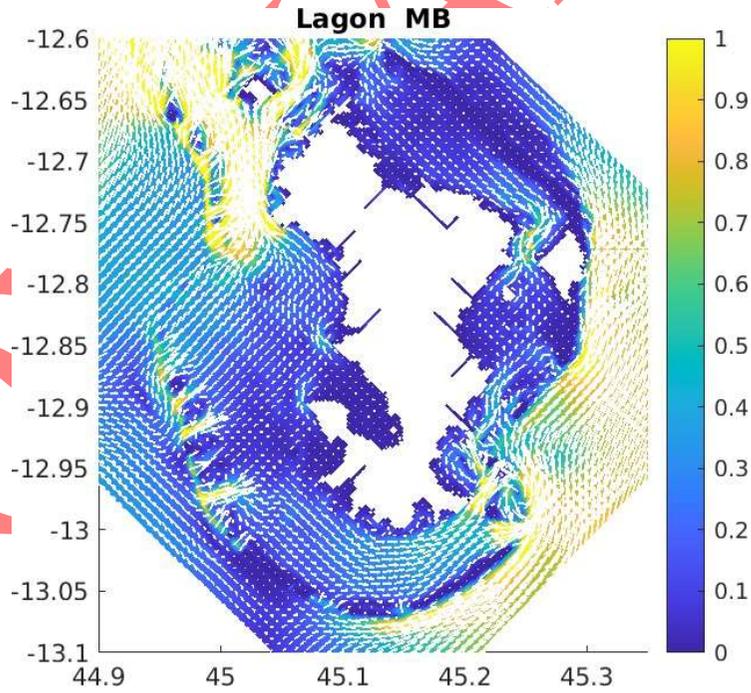
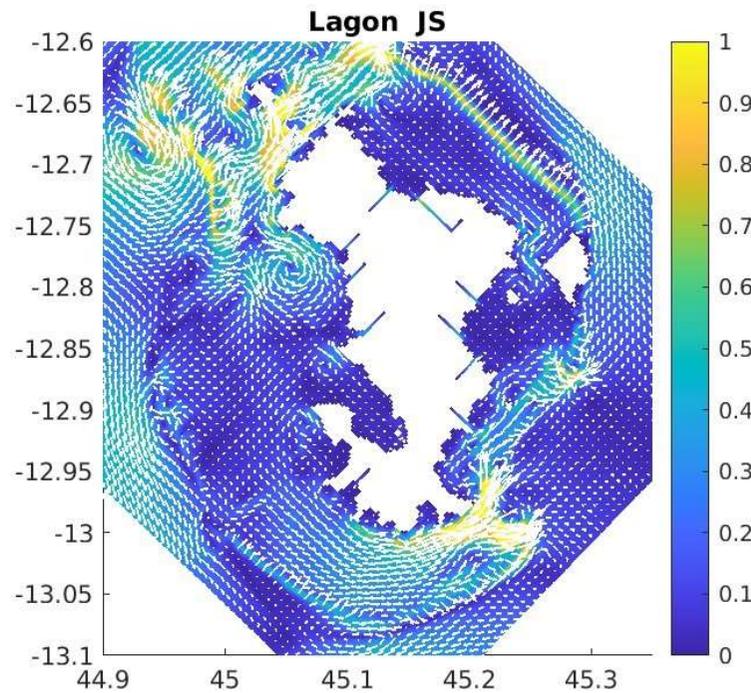
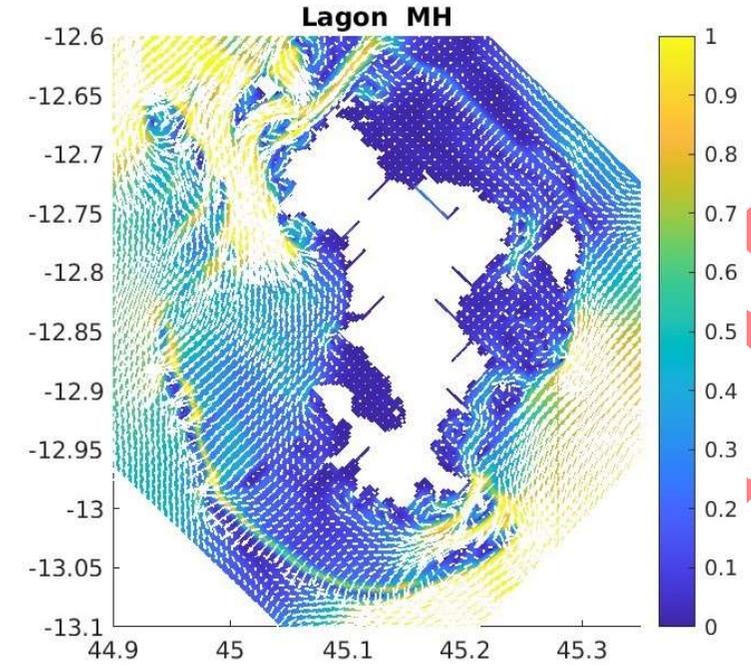
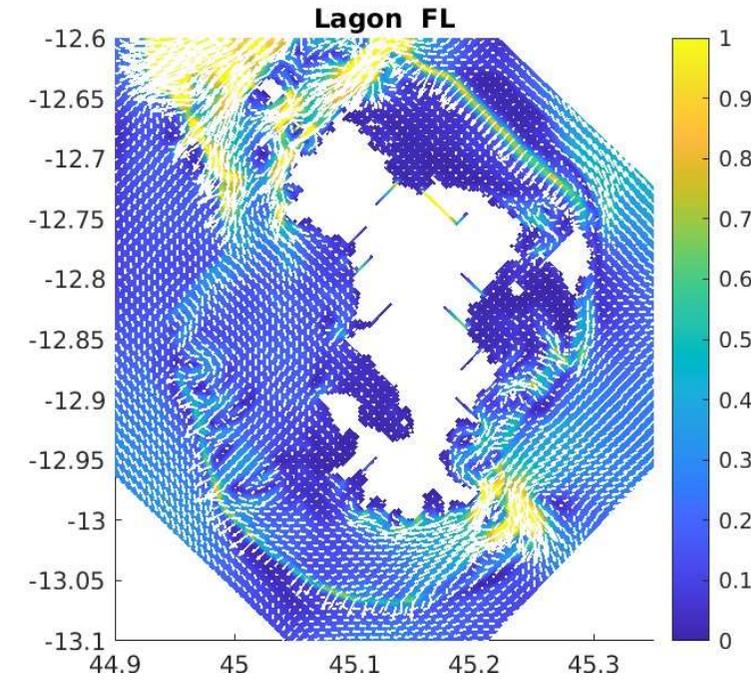
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré



NON VALIDE

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 330 degré

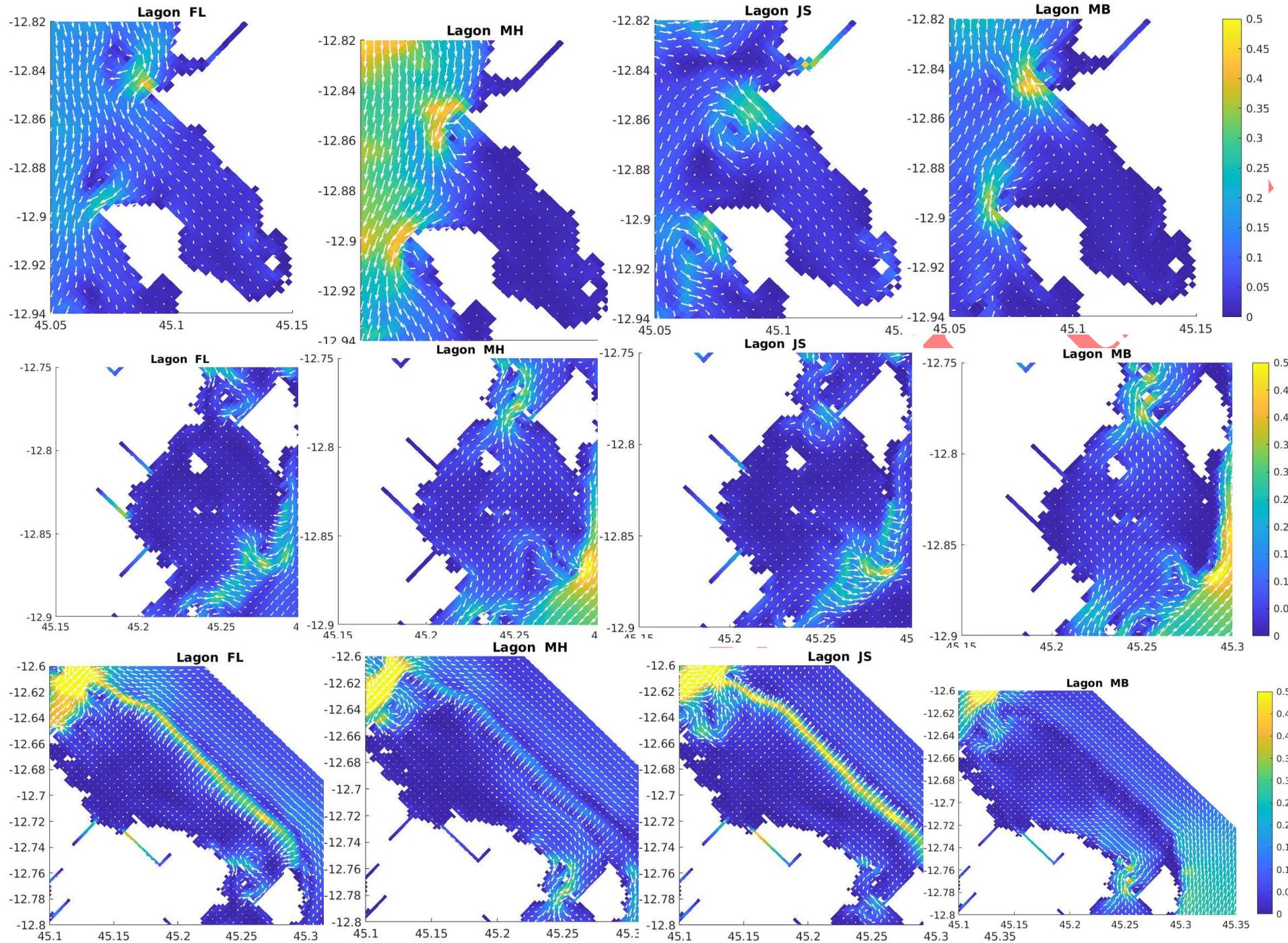
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 330 degré



RE

NS

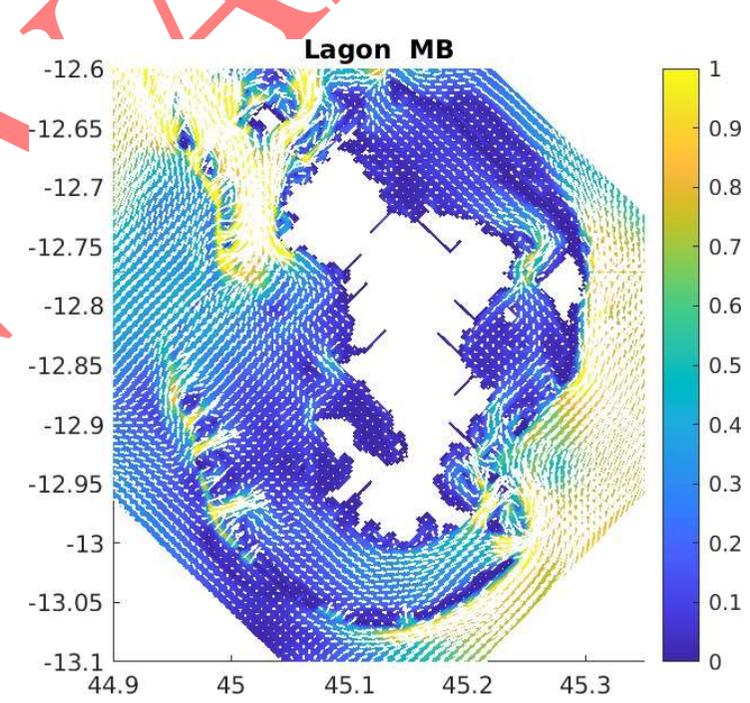
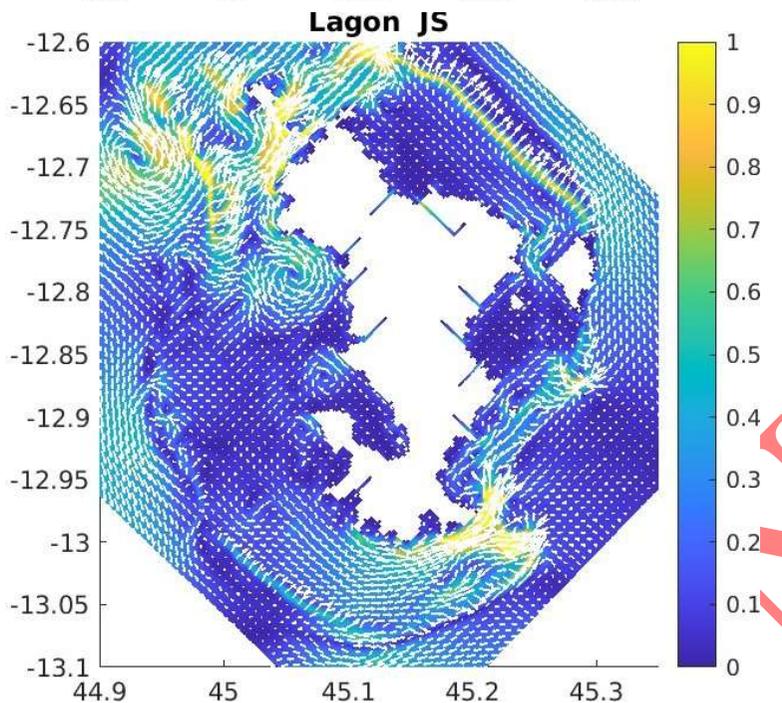
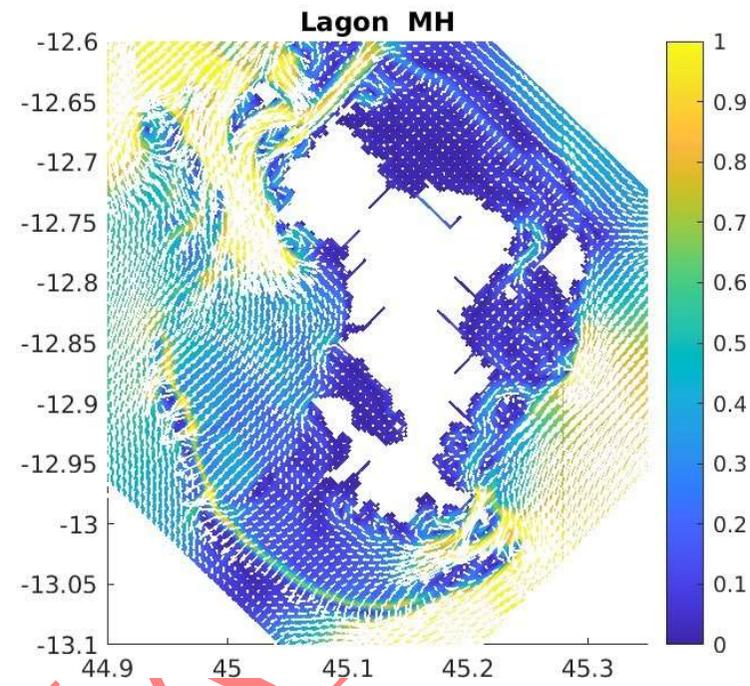
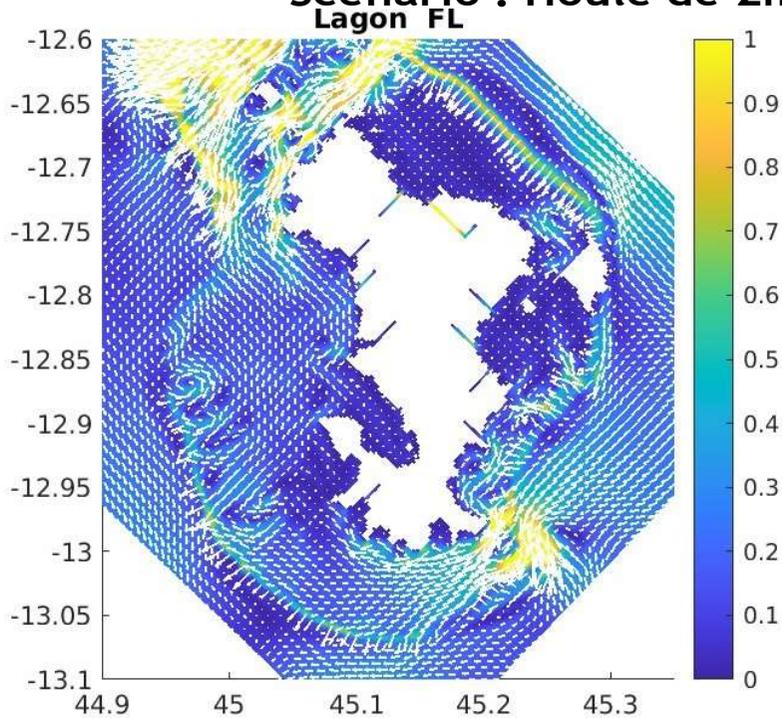
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 330 degré



Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré

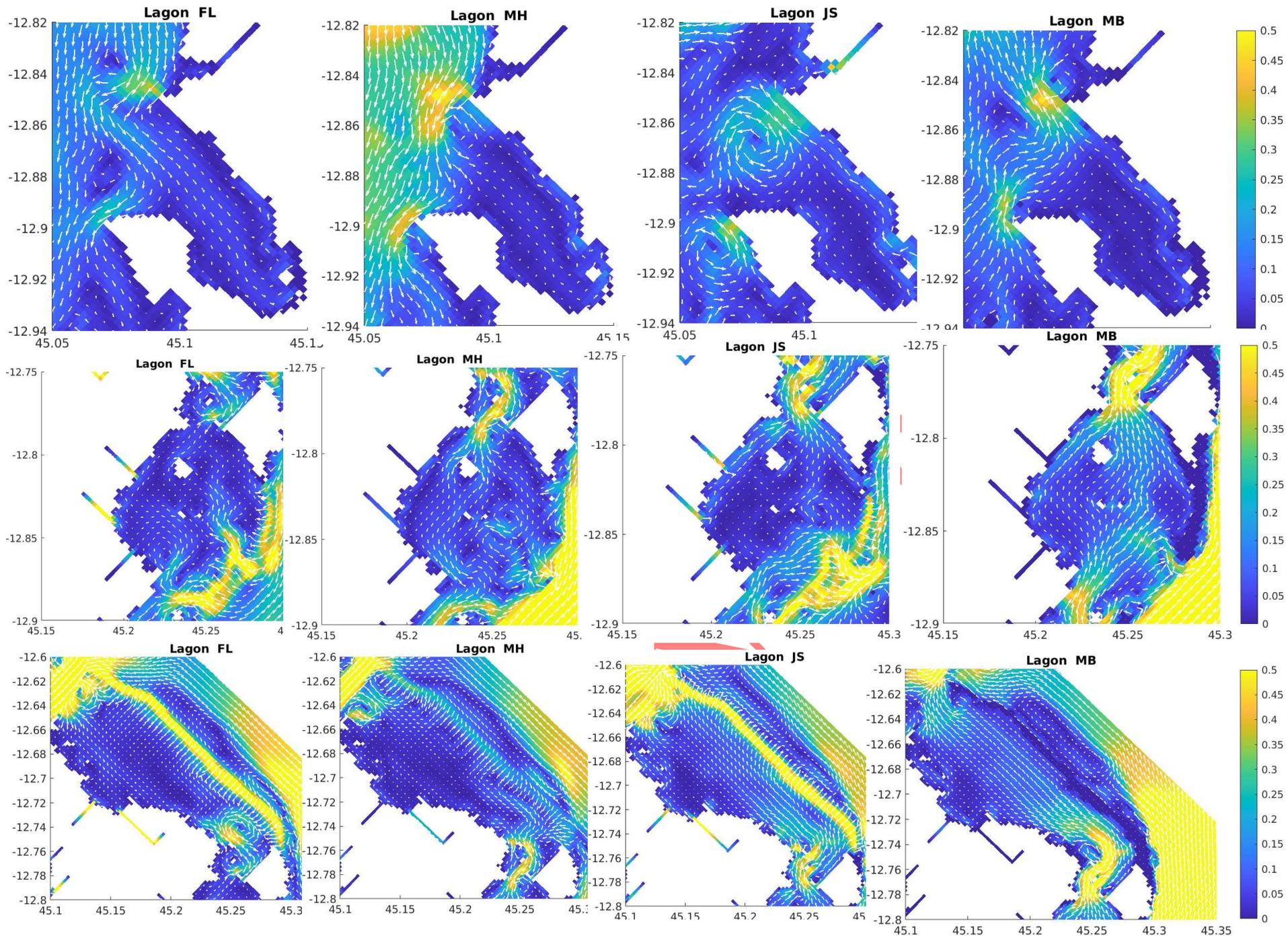
NON VALIDE

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré



NON

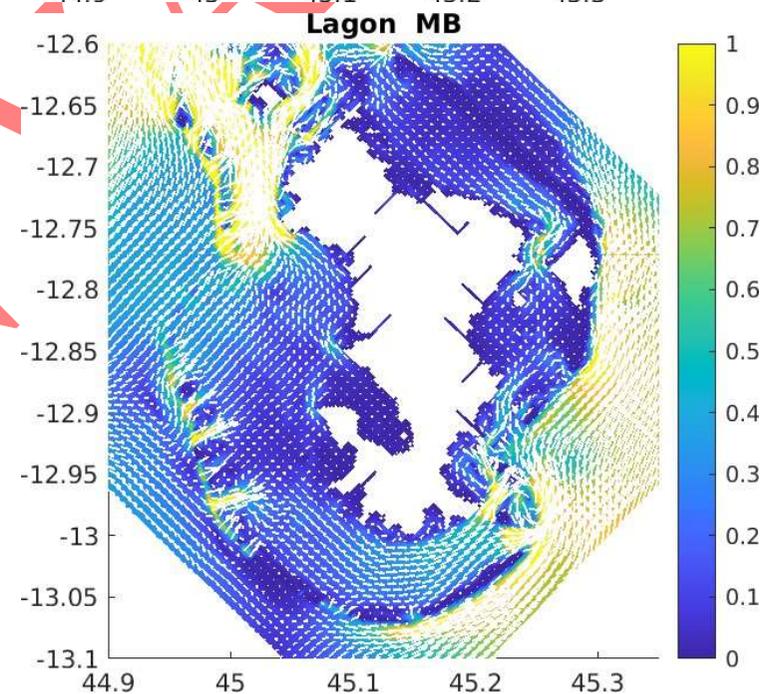
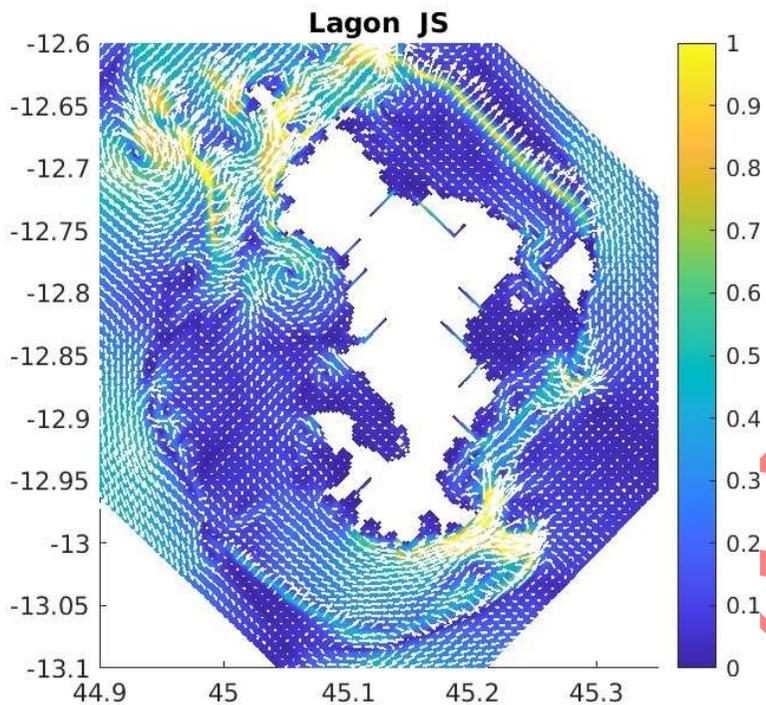
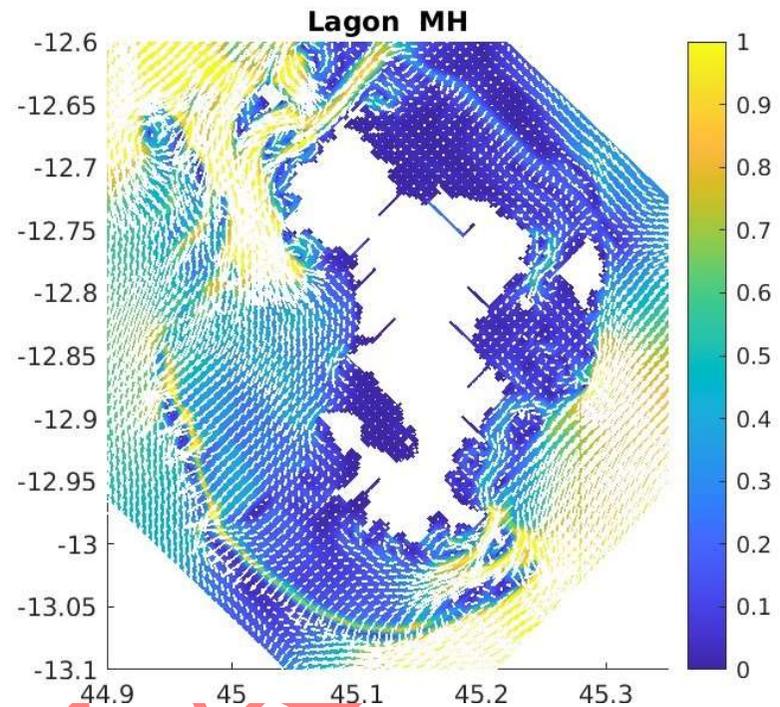
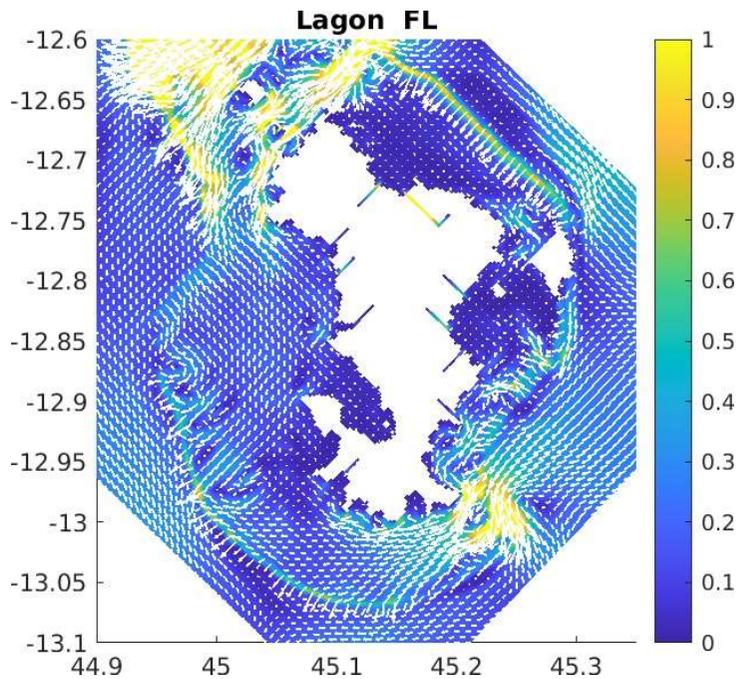
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré



Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré

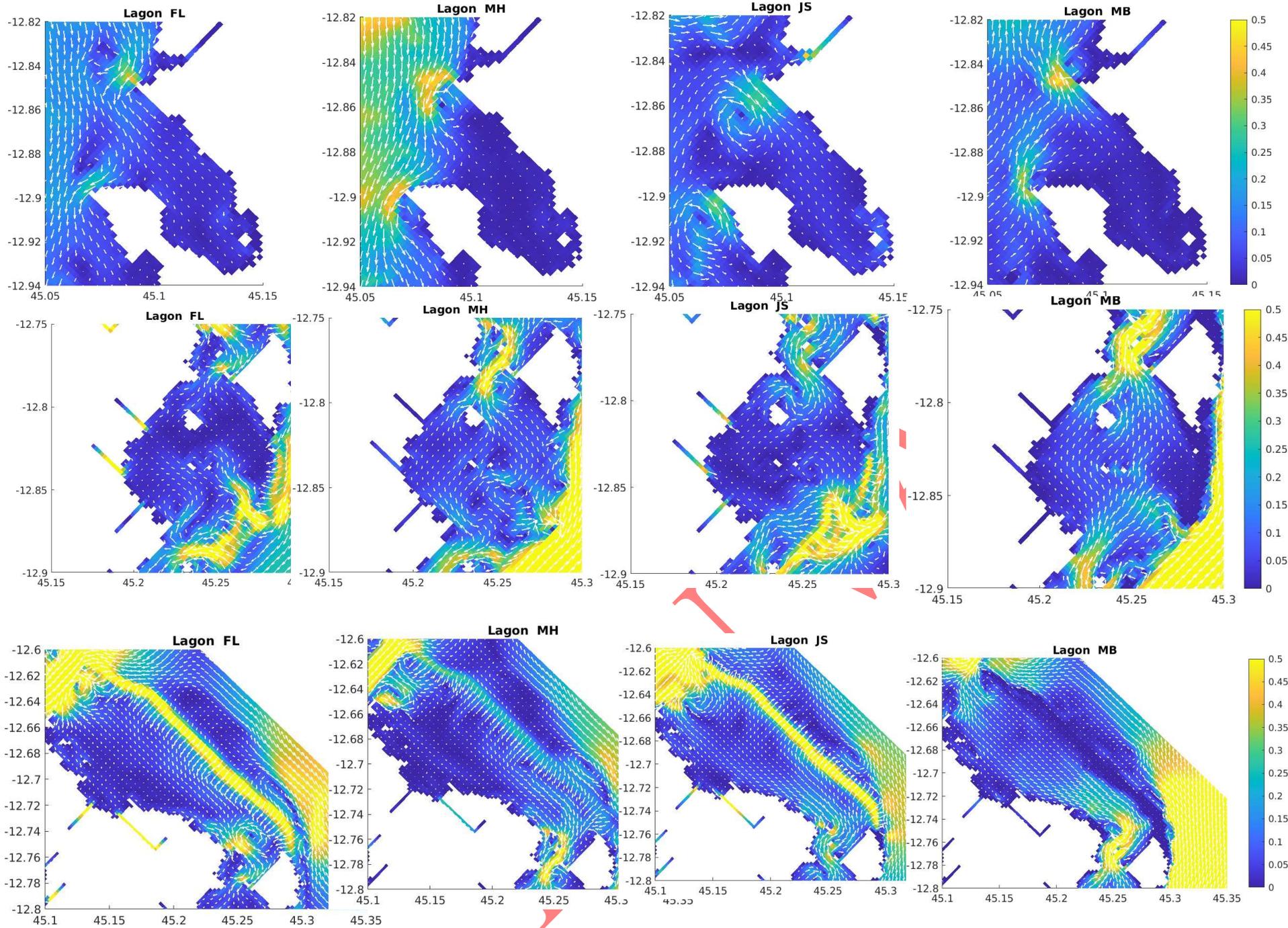
NON VALIDE

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré



NON

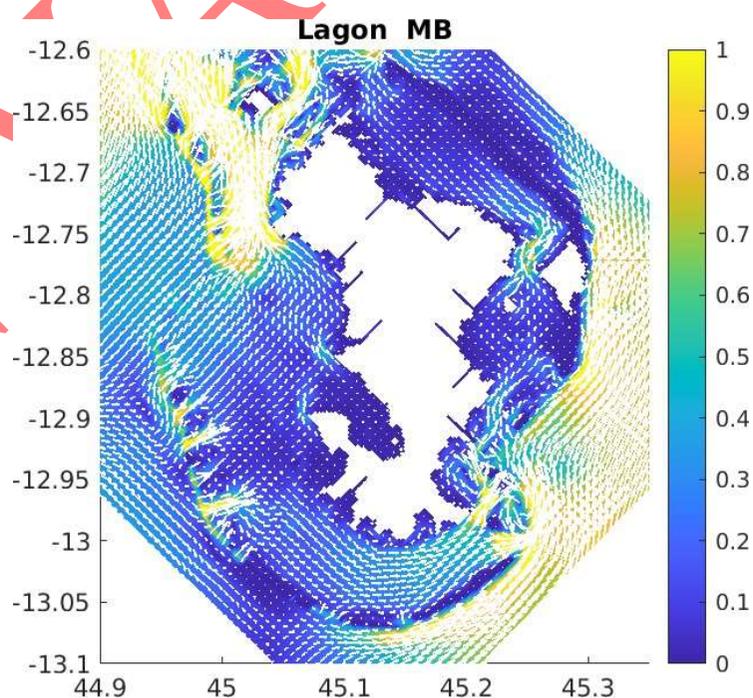
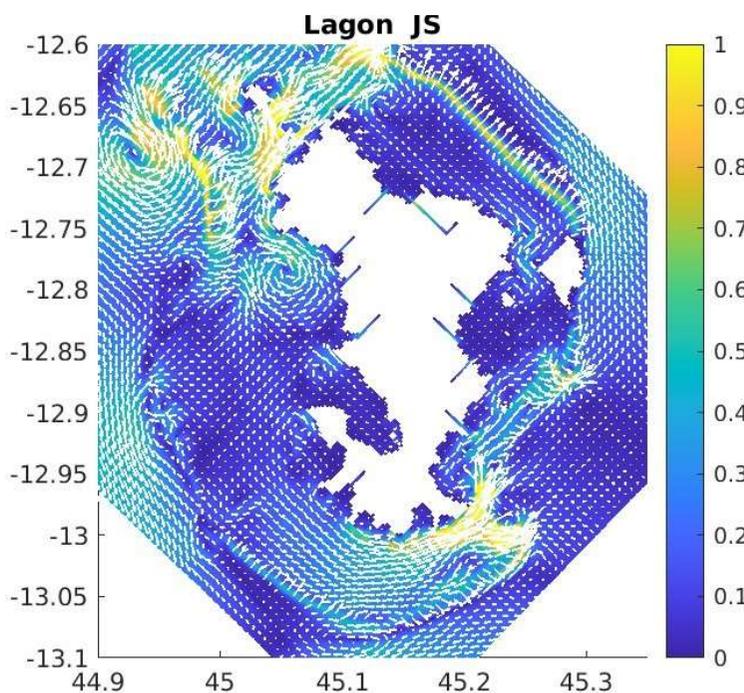
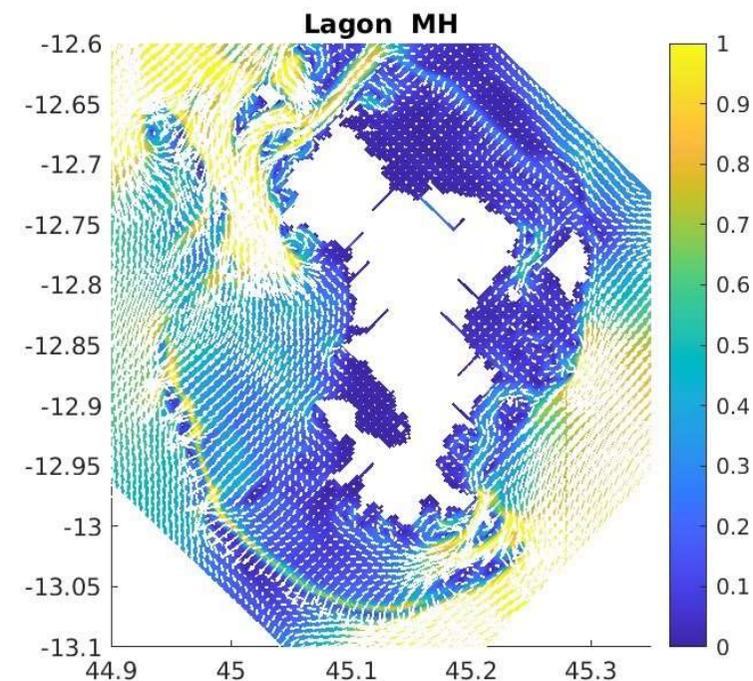
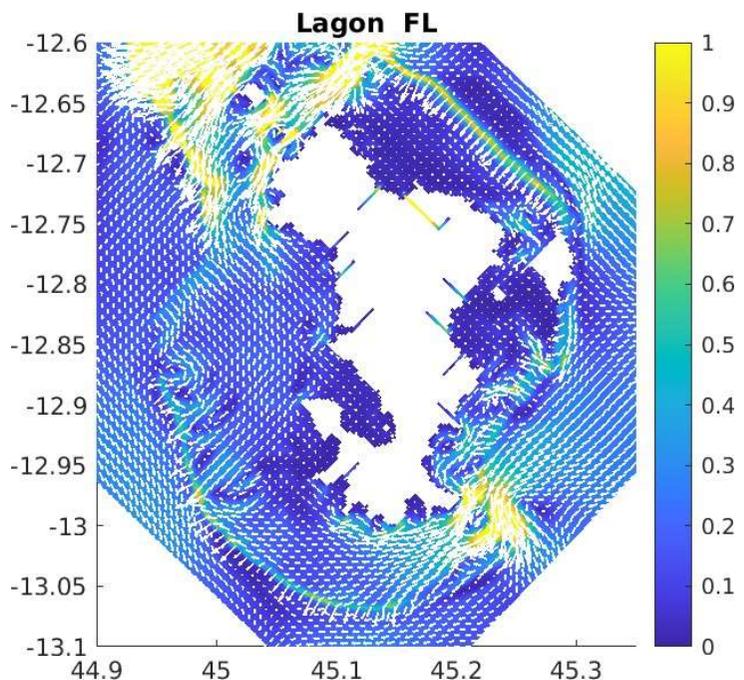
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré



Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré

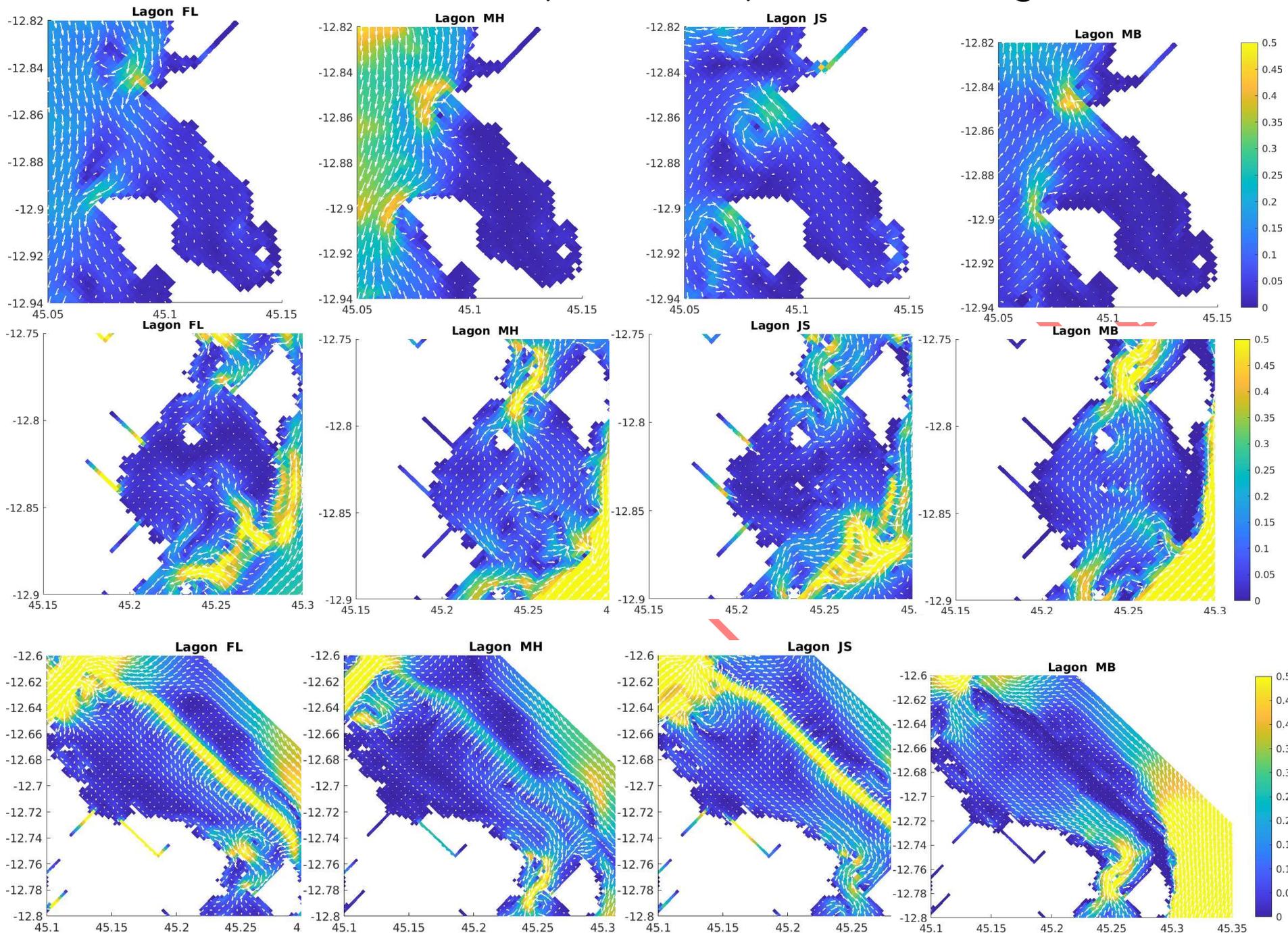
NON VALIDE

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré



NON

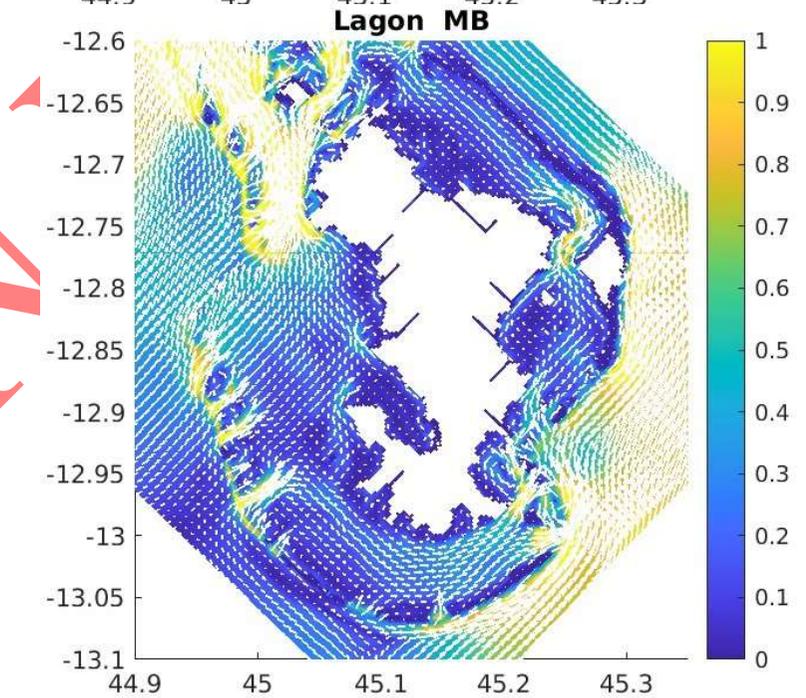
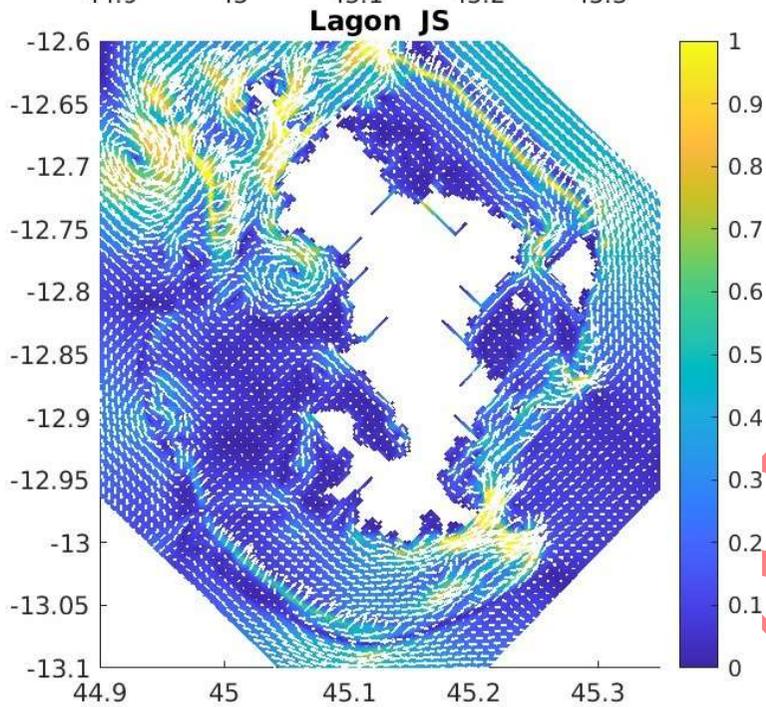
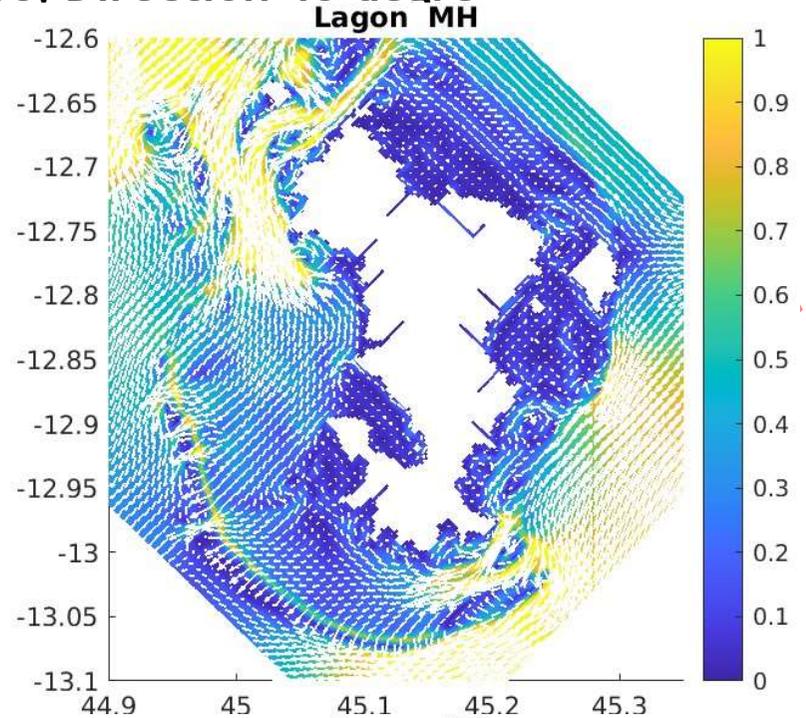
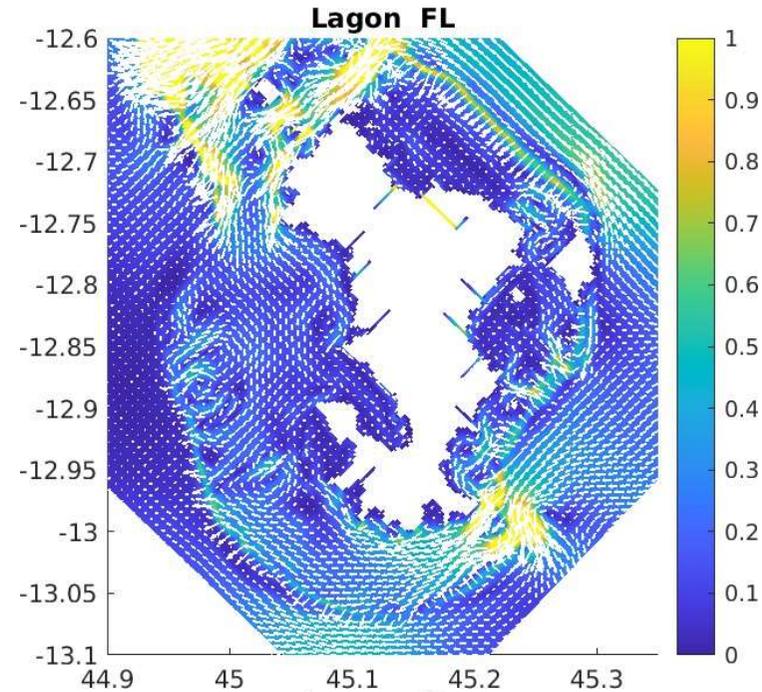
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 45 degré

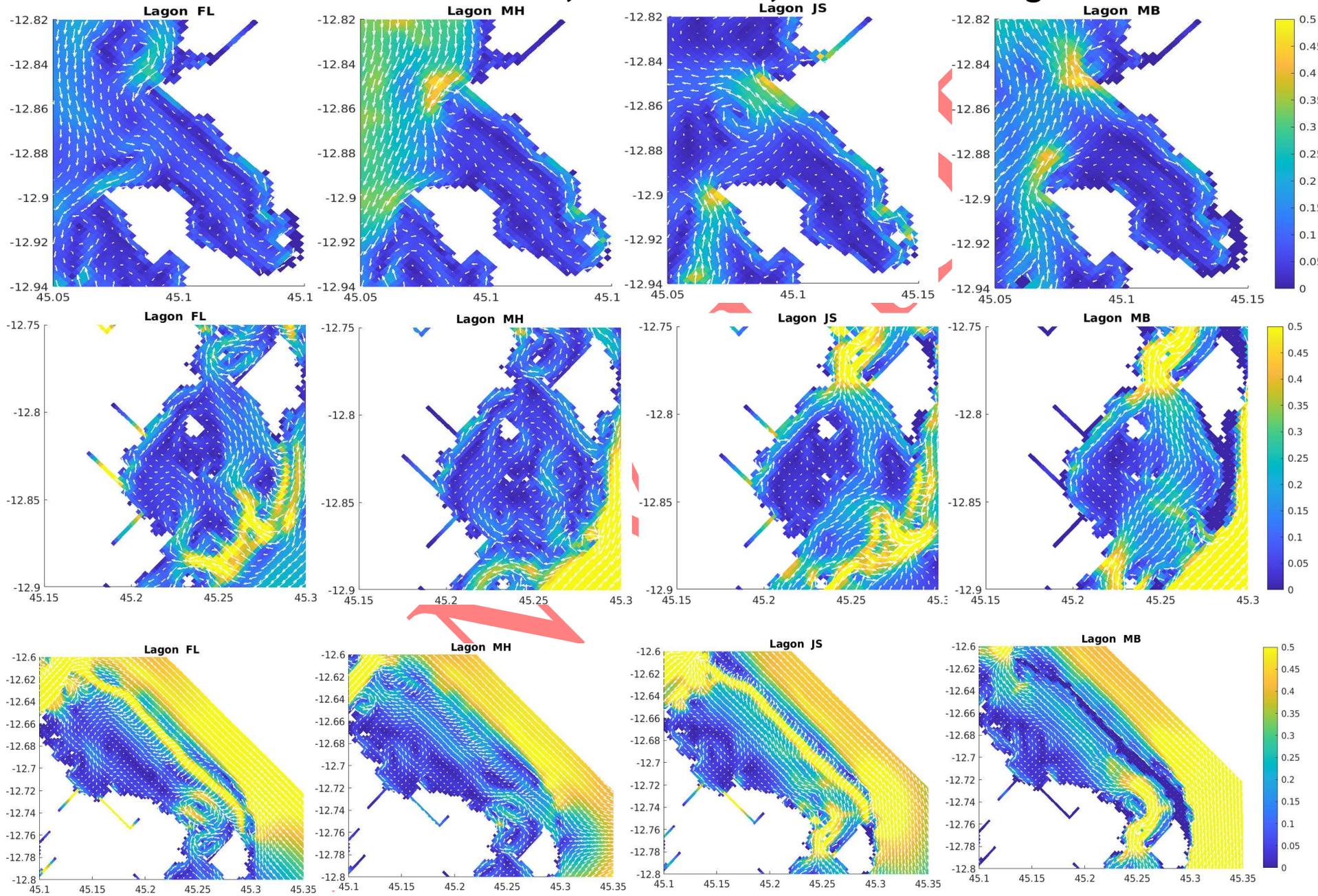
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s. Direction 45 degré



NON

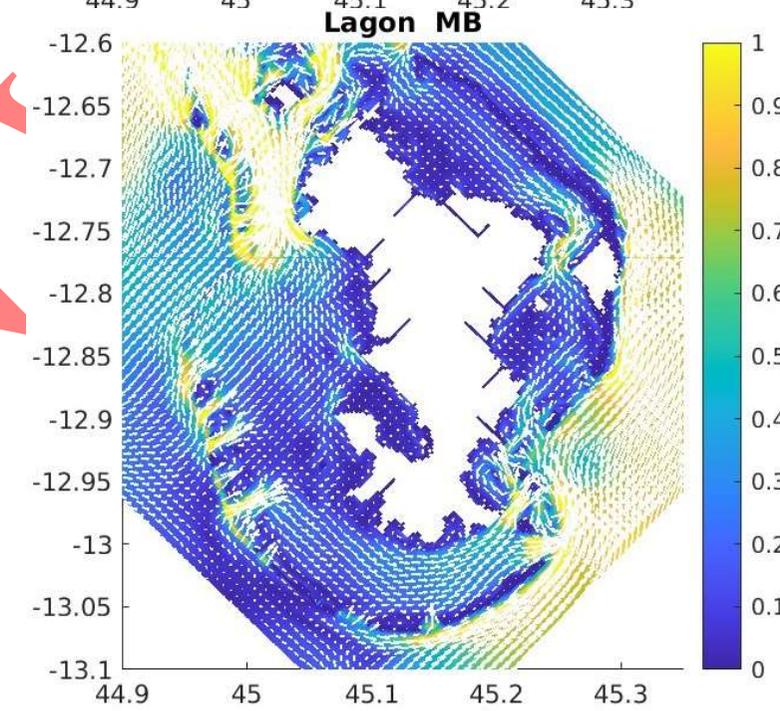
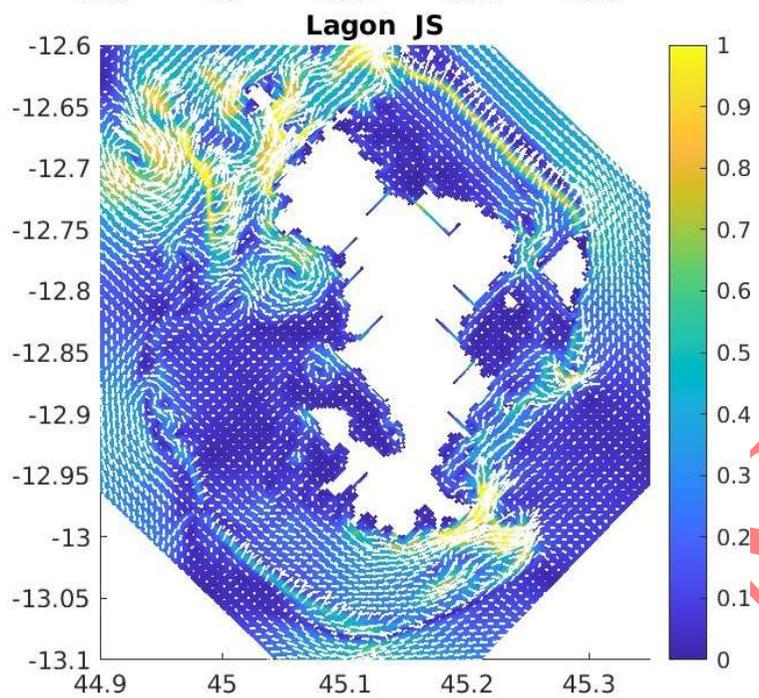
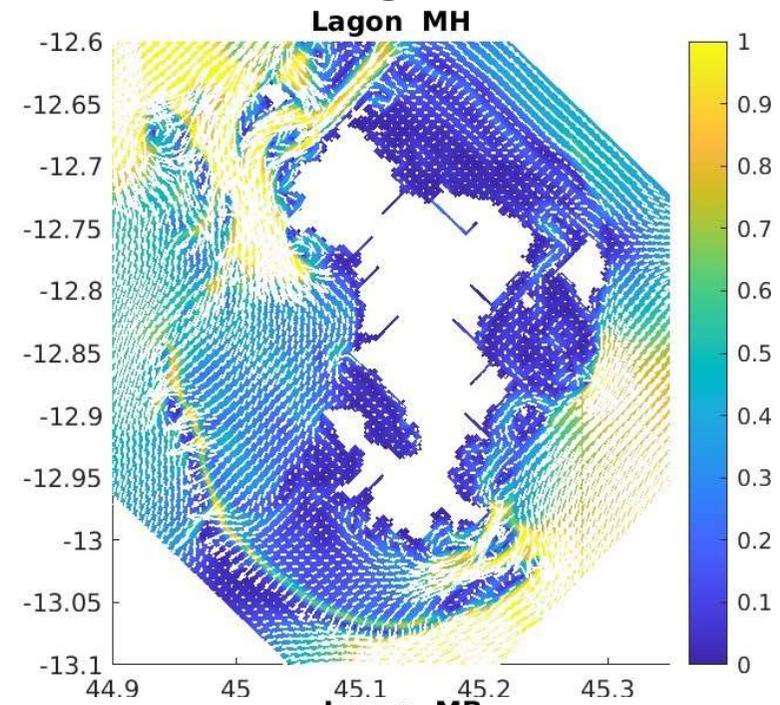
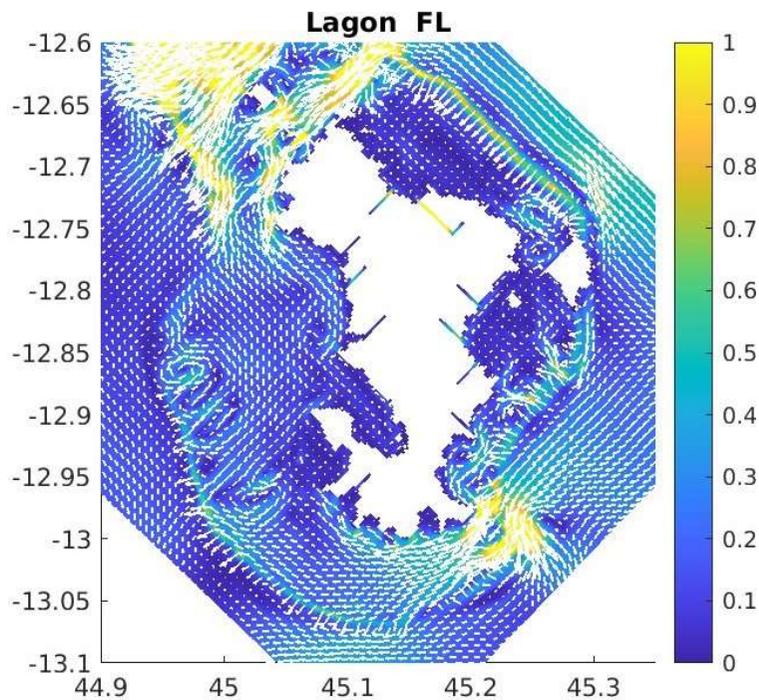
Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 45 degré



NON VALIDE

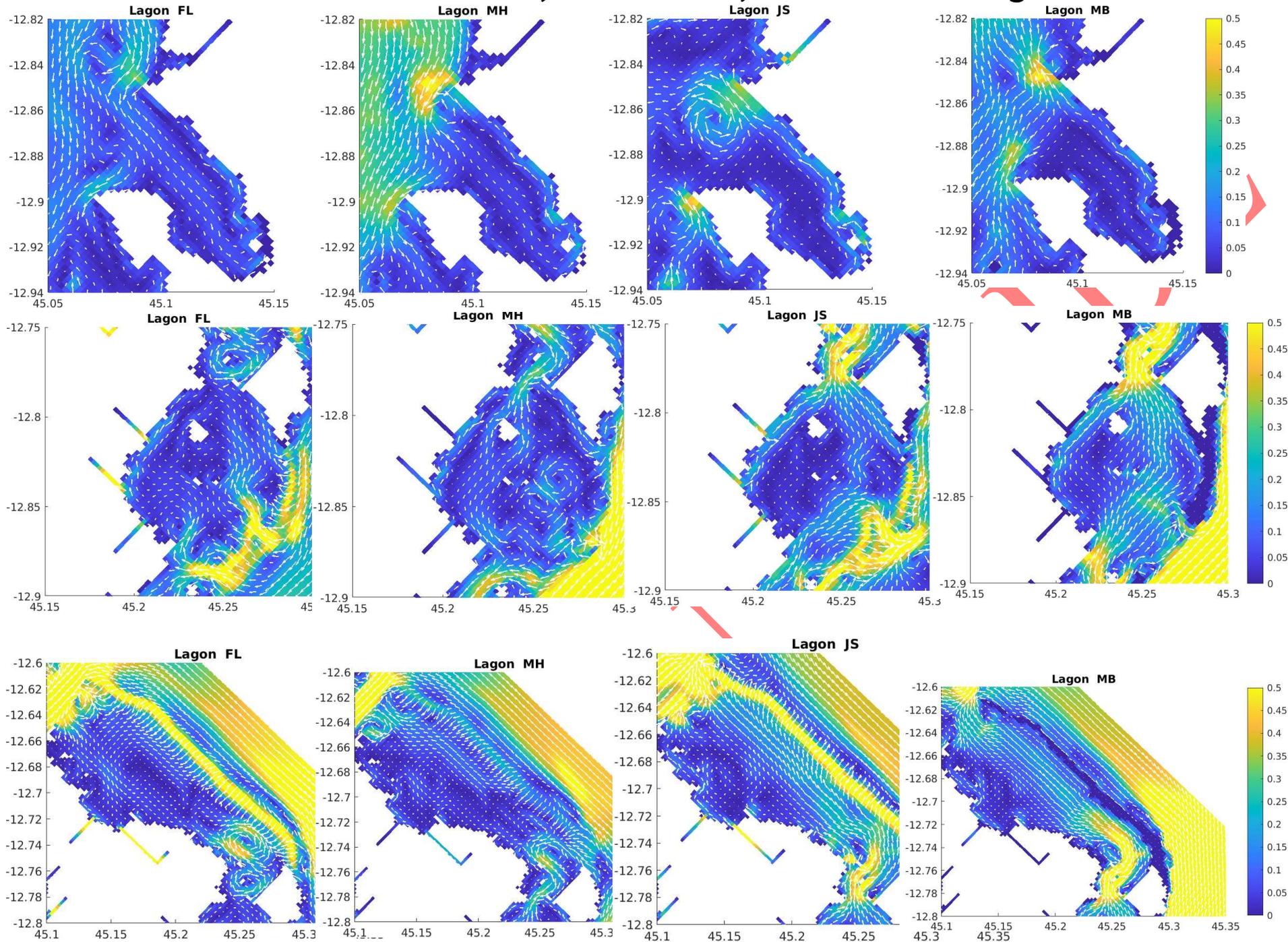
Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 150 degré

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 150 degré



NON

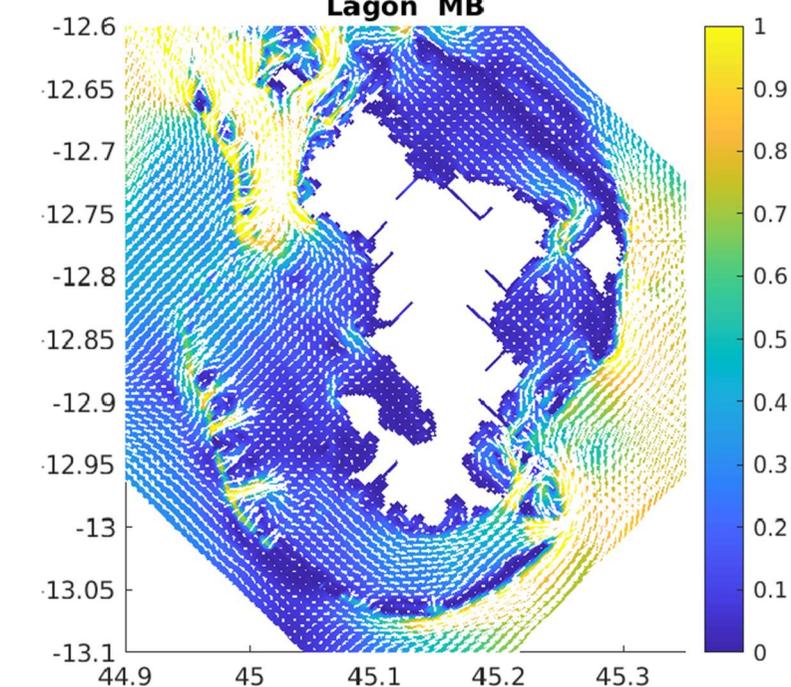
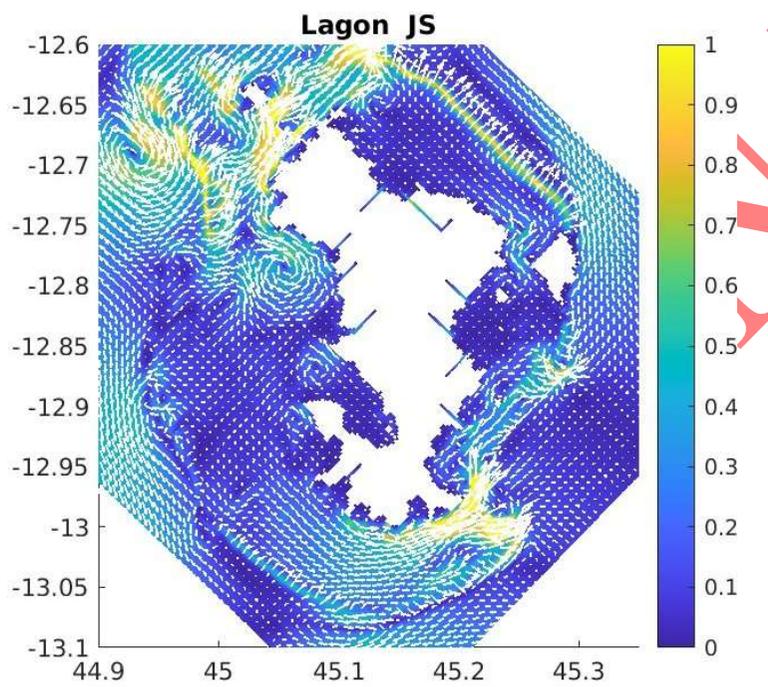
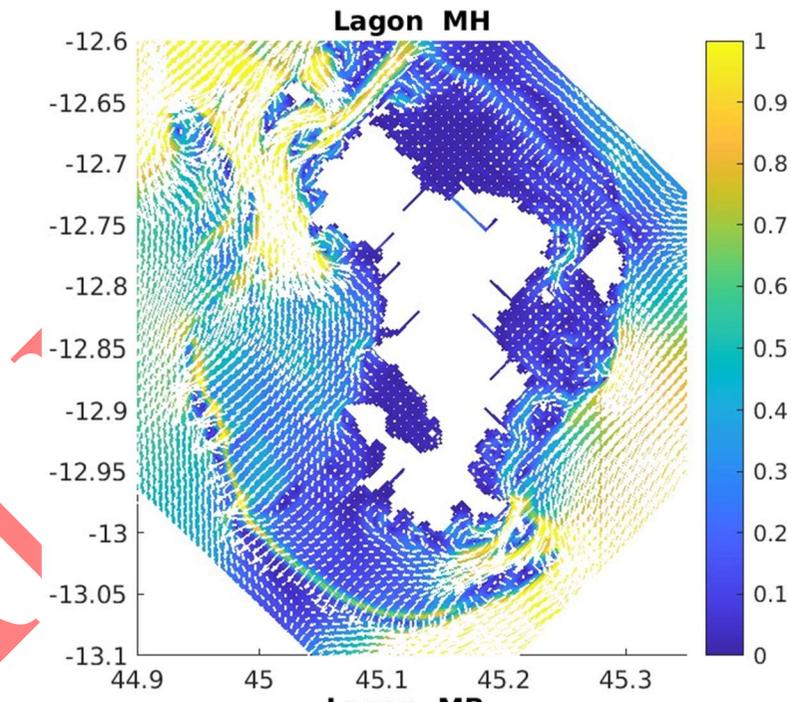
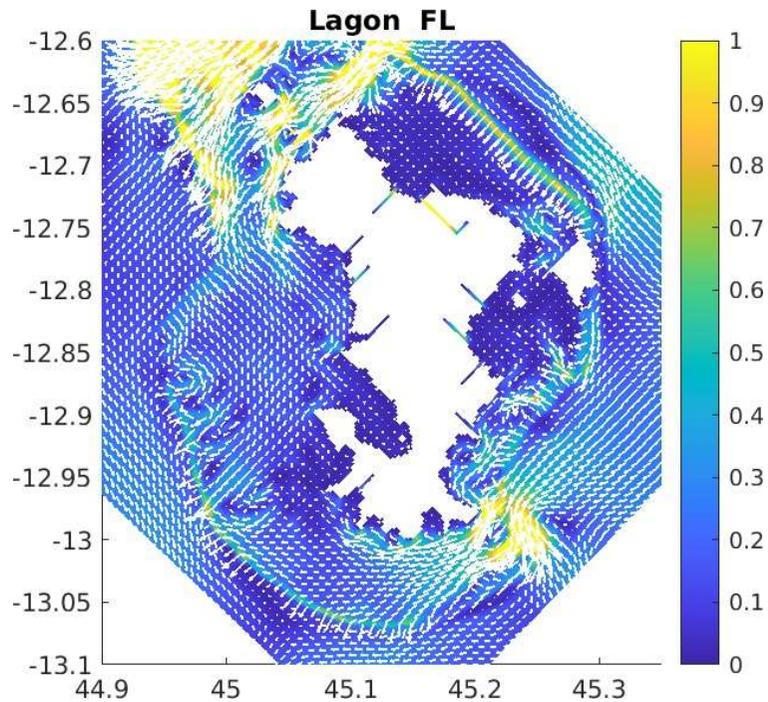
Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 150 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 210 degré

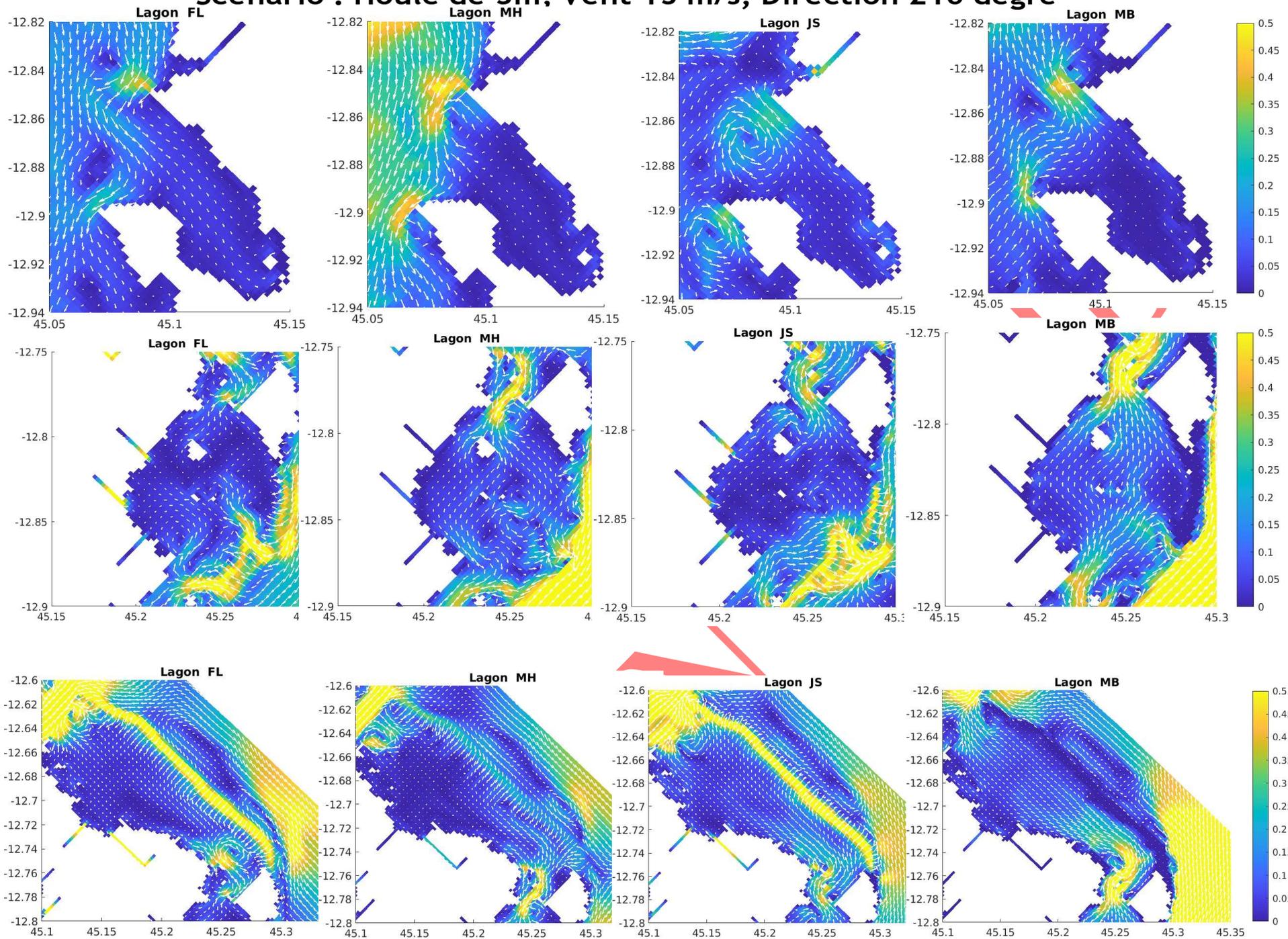
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 210 degré



VALID

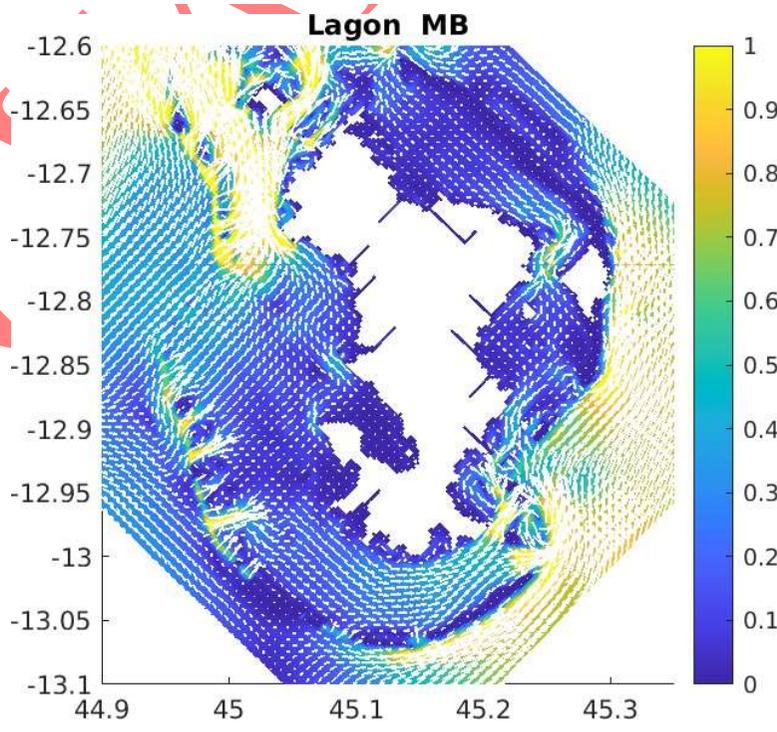
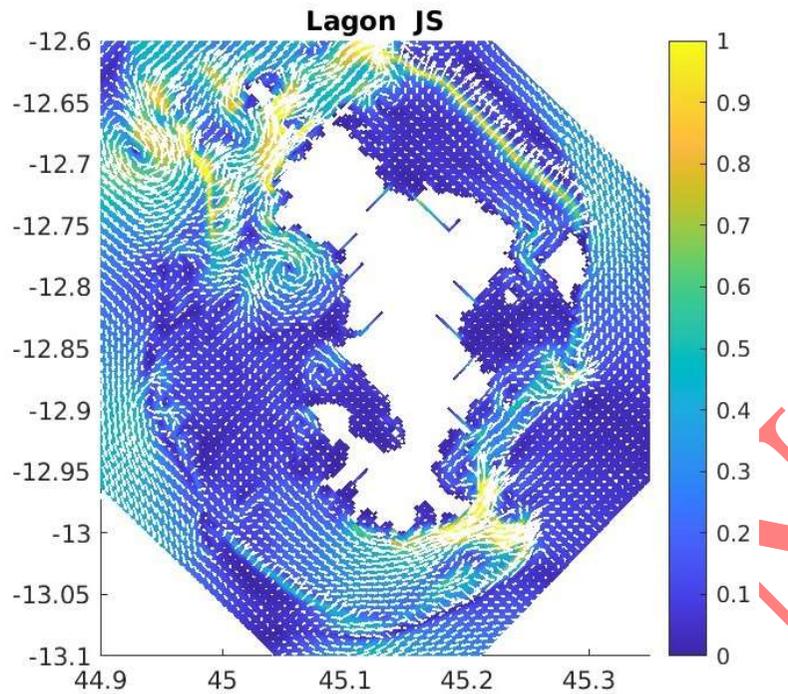
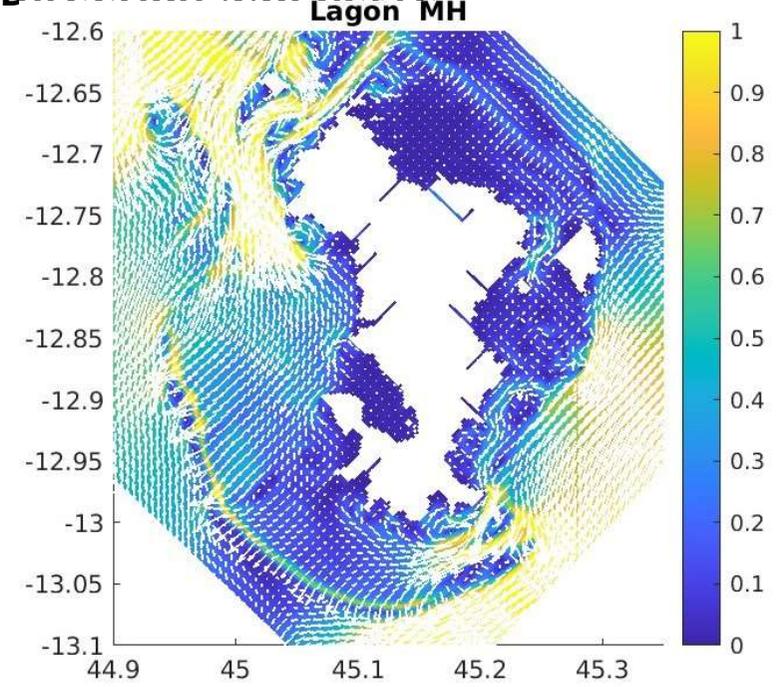
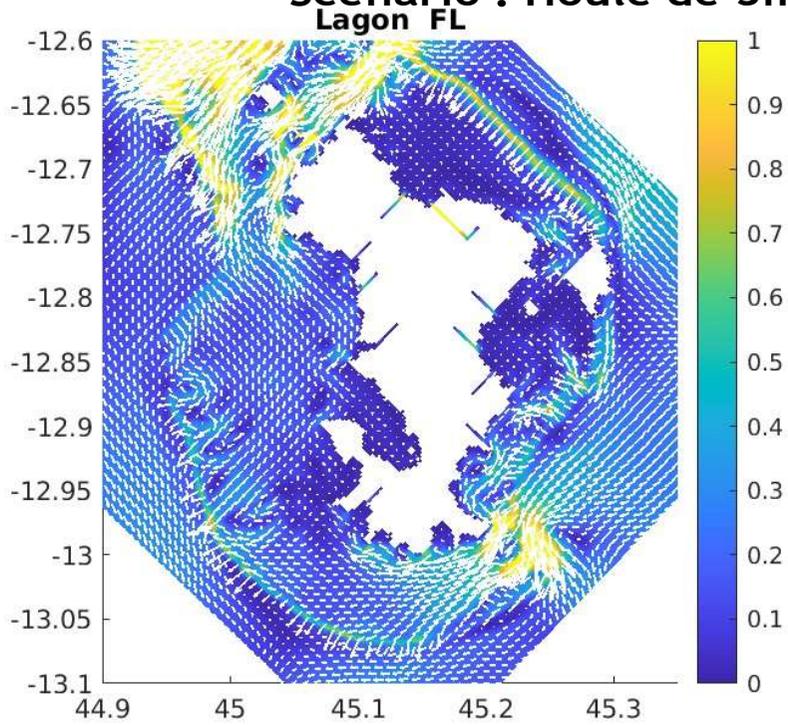
Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 210 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré

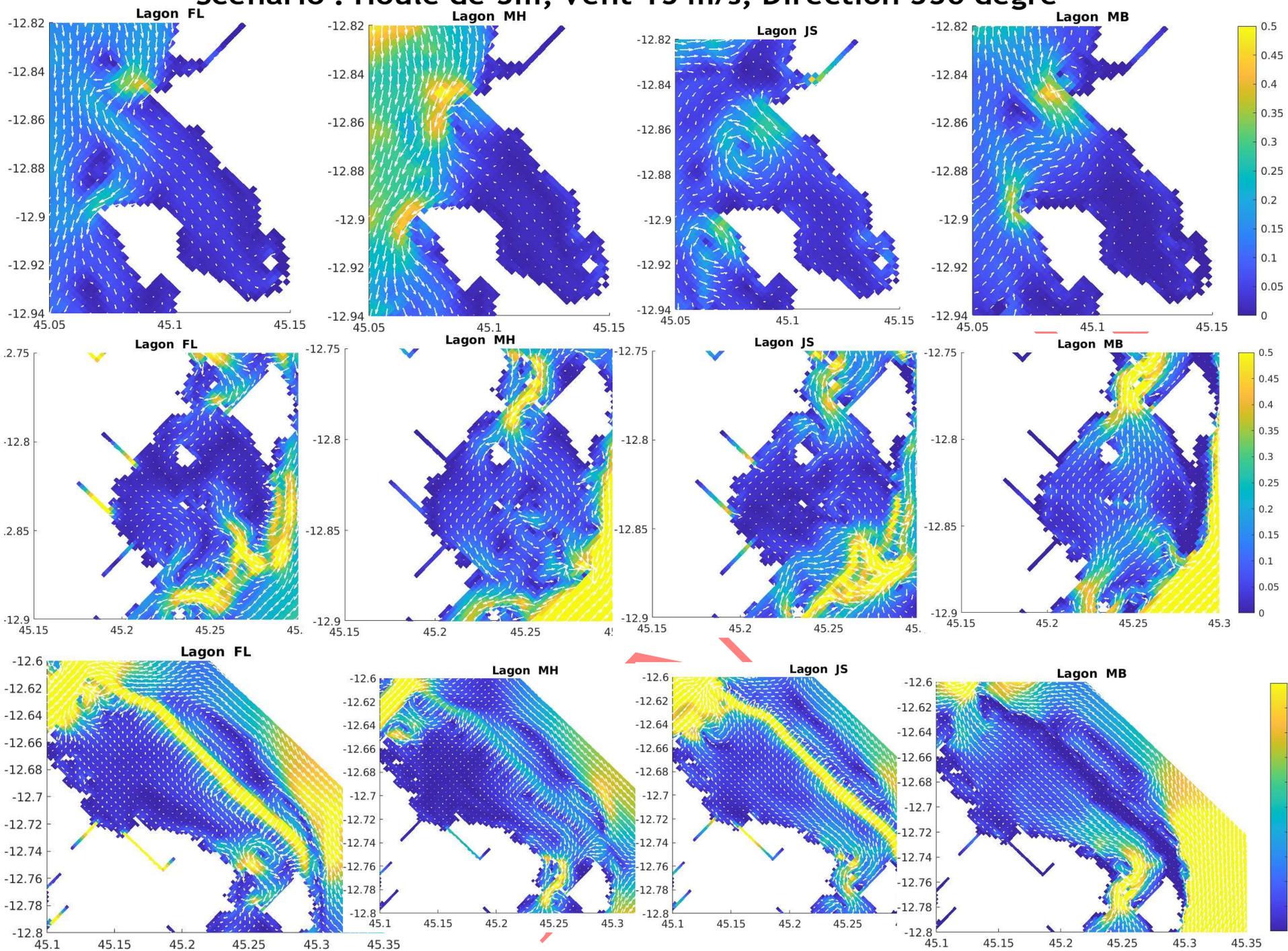
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré



NON

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré



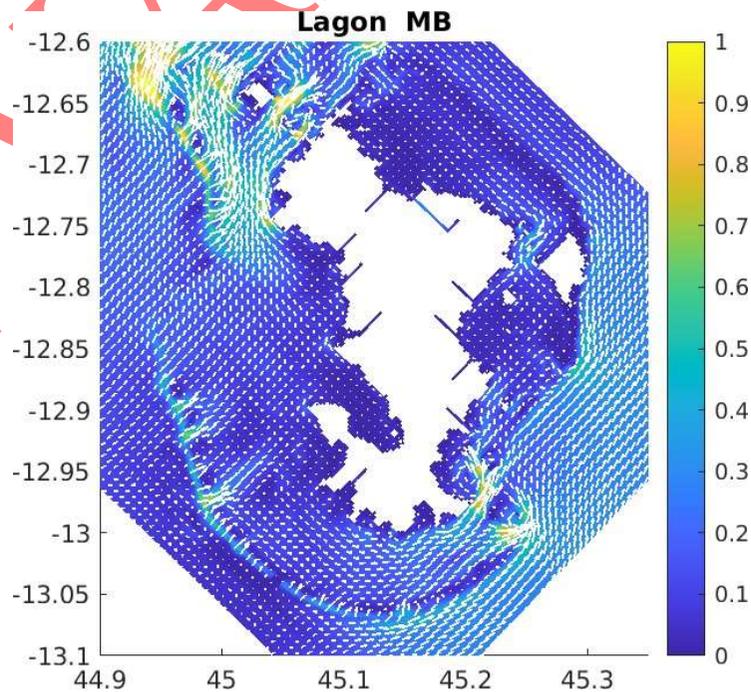
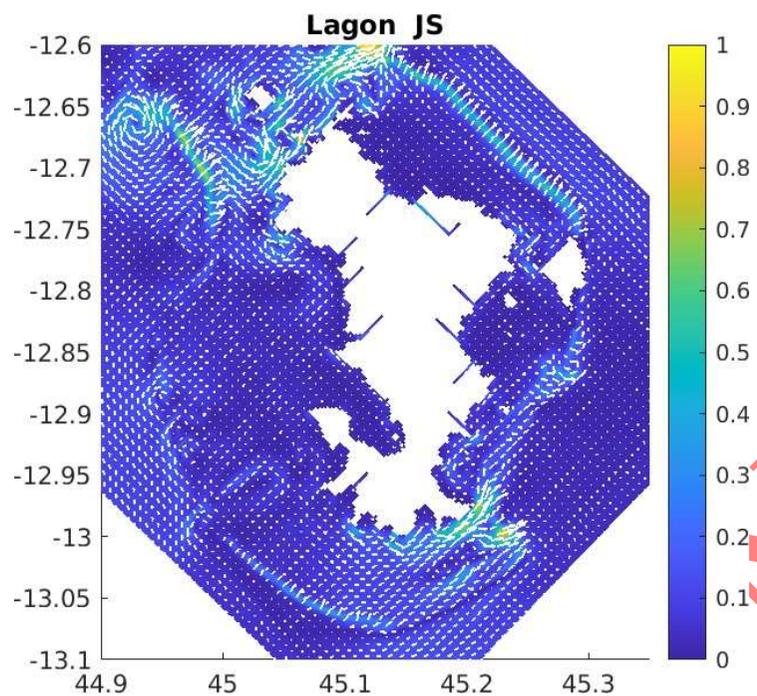
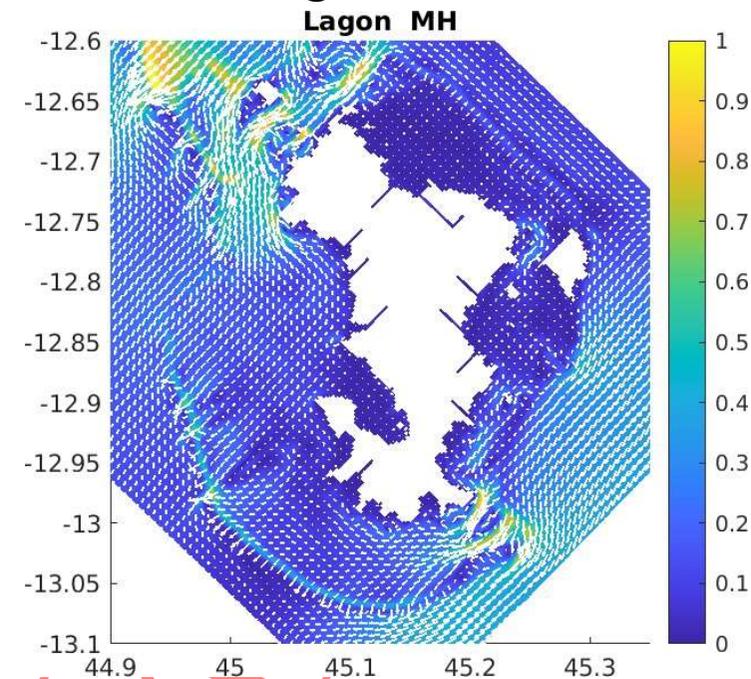
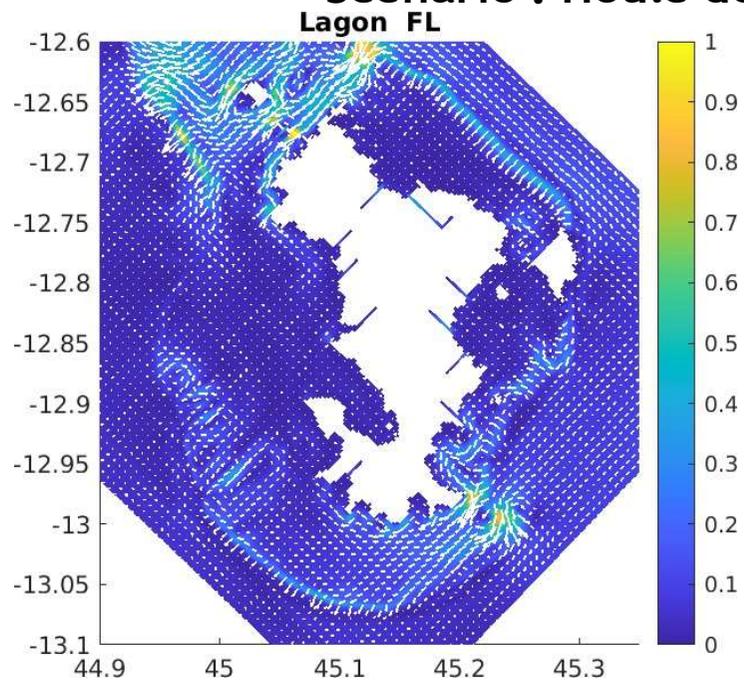
Scénario Mortes-eaux

NON VALIDE

NON VALIDE

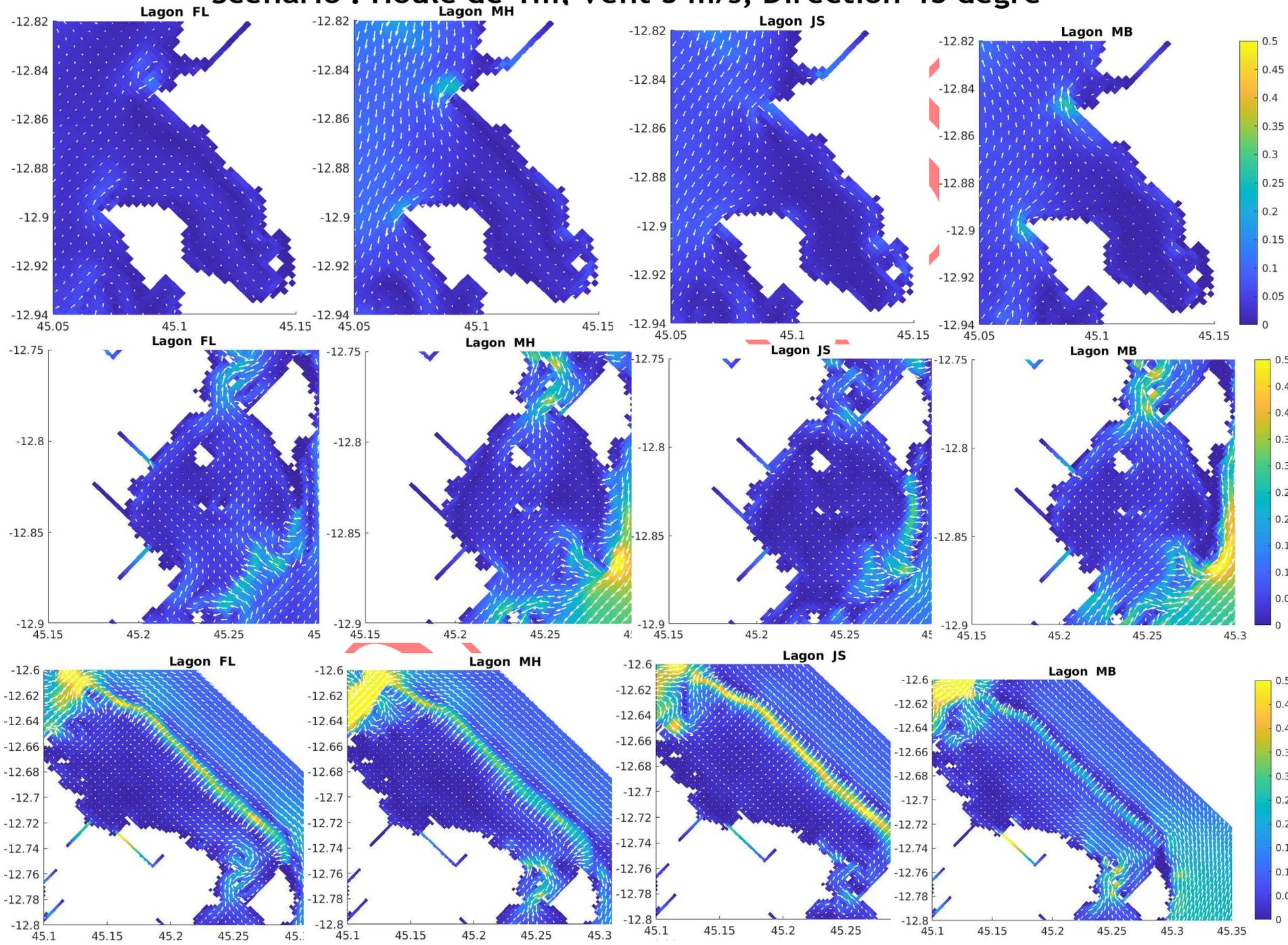
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré



NON

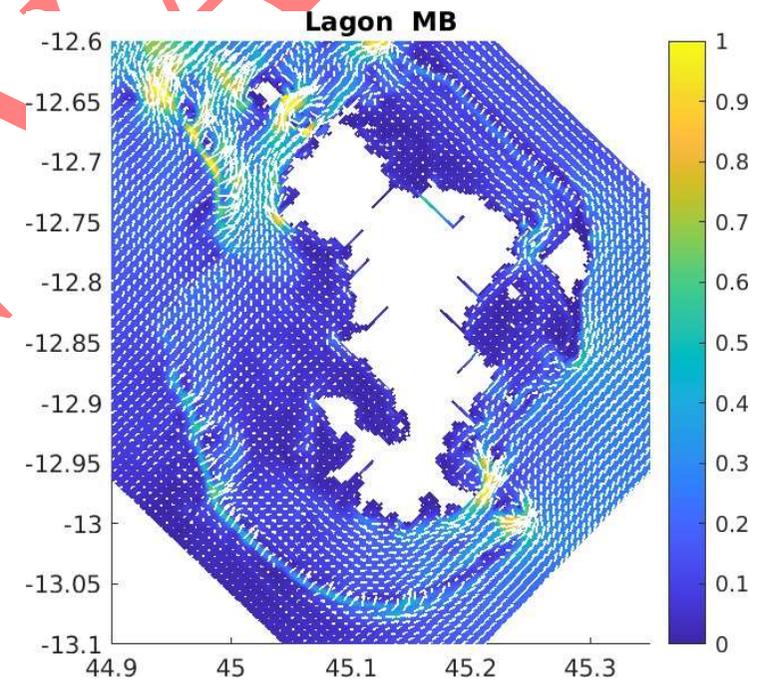
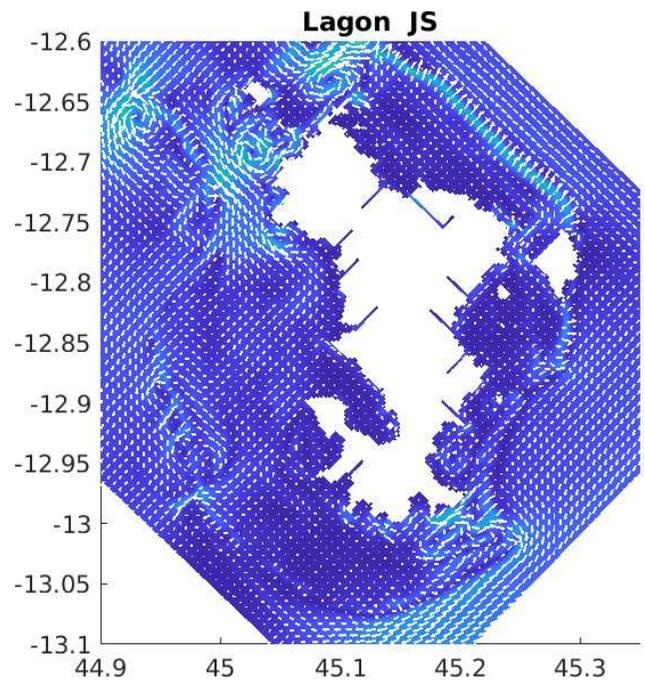
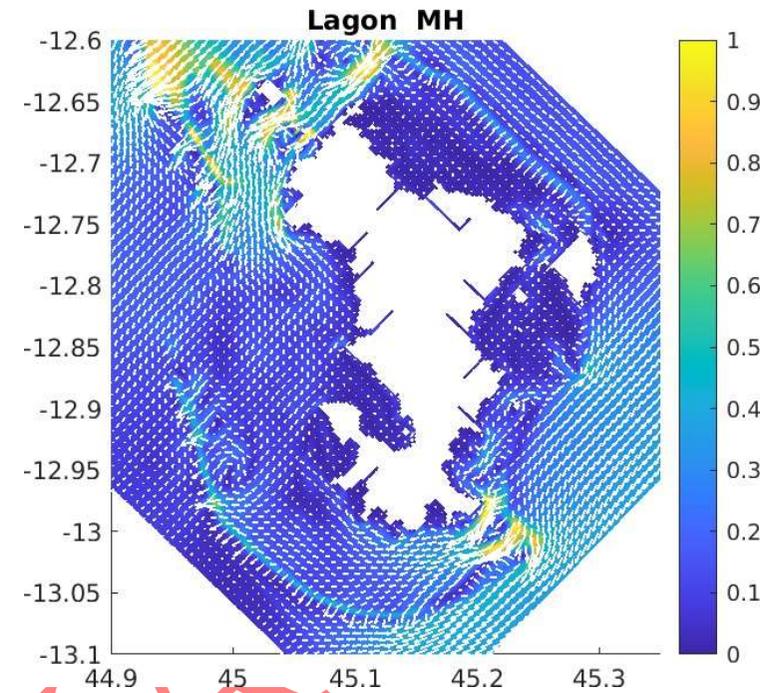
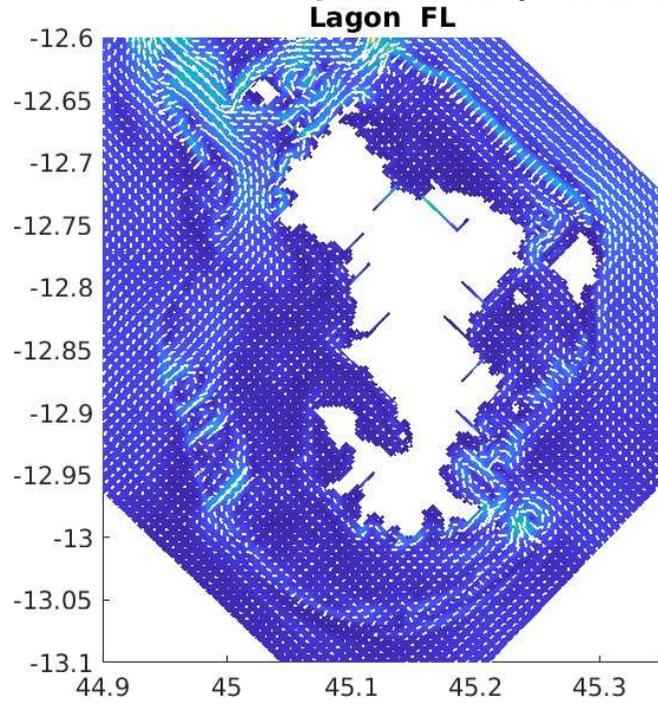
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 45 degré



NON VALIDE

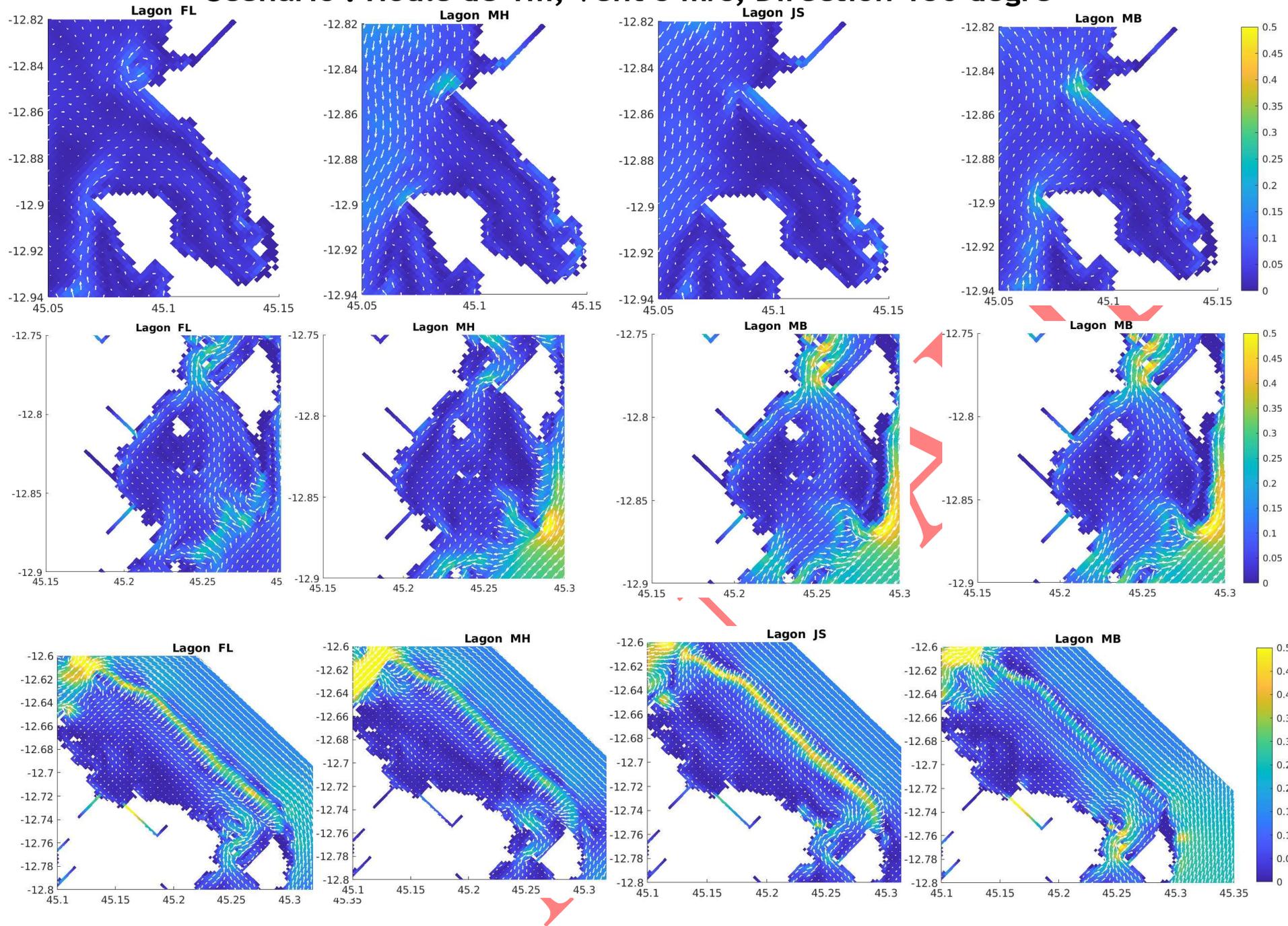
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré



NON

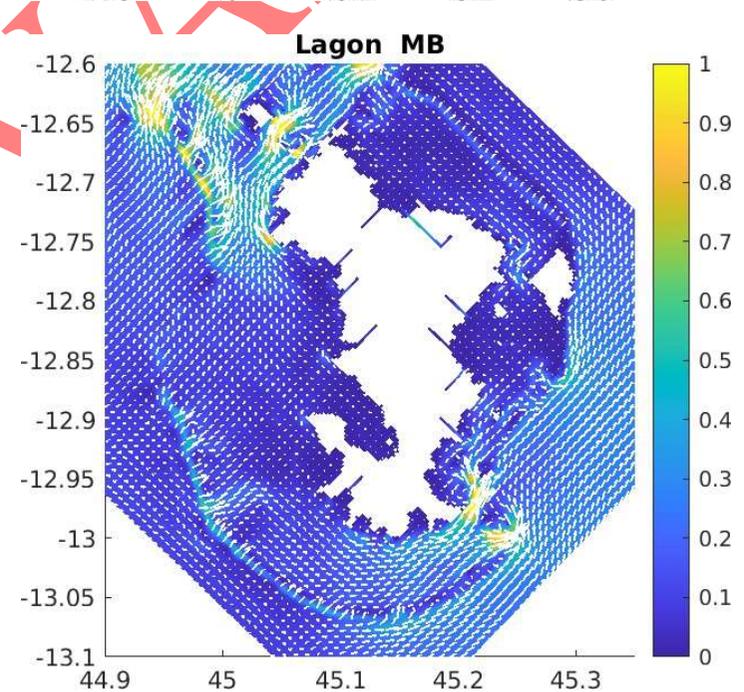
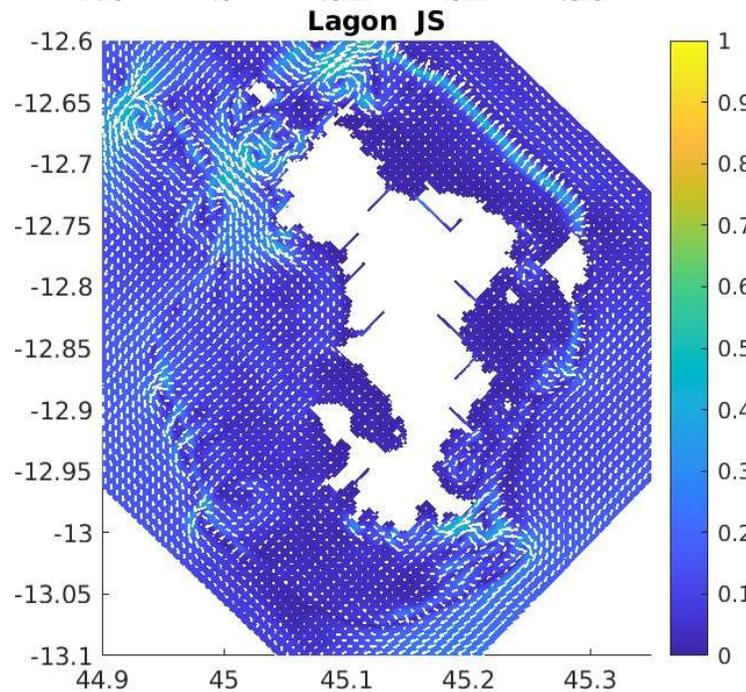
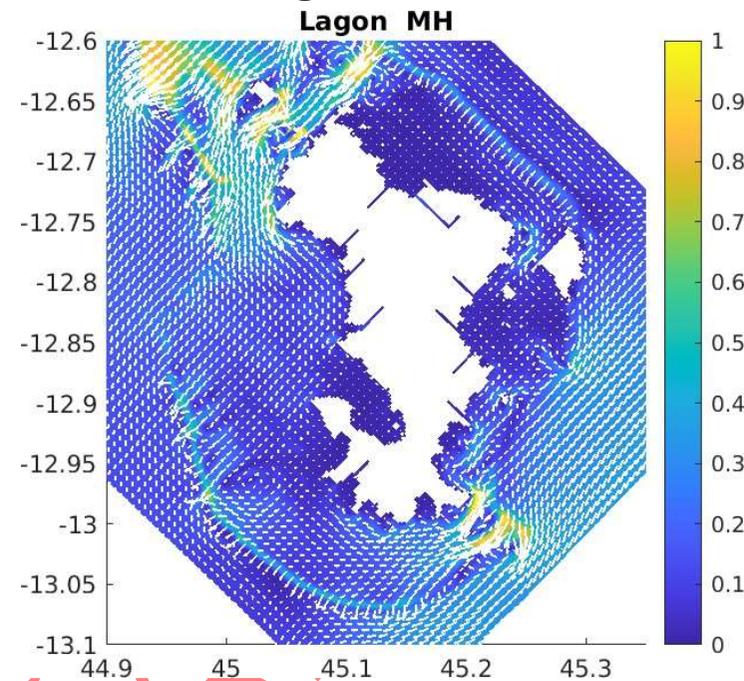
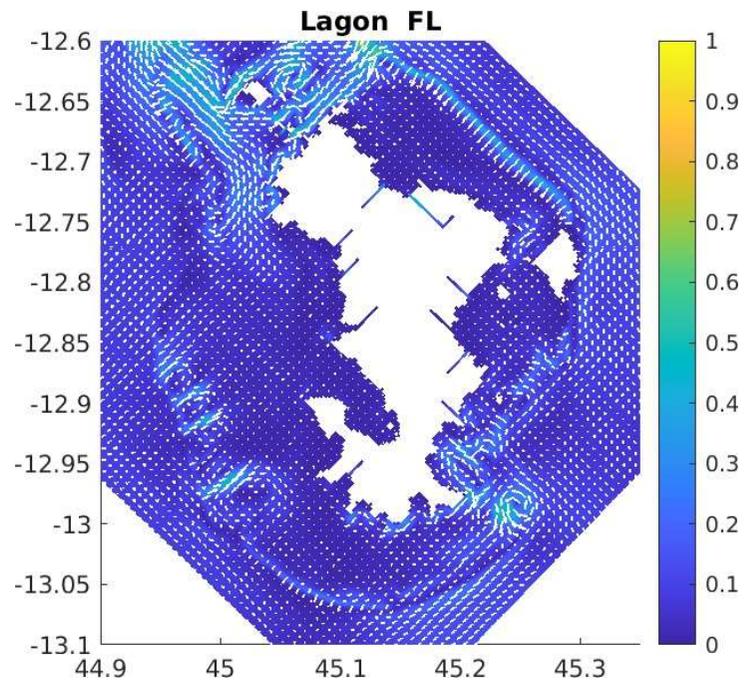
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 150 degré



NON VALIDE

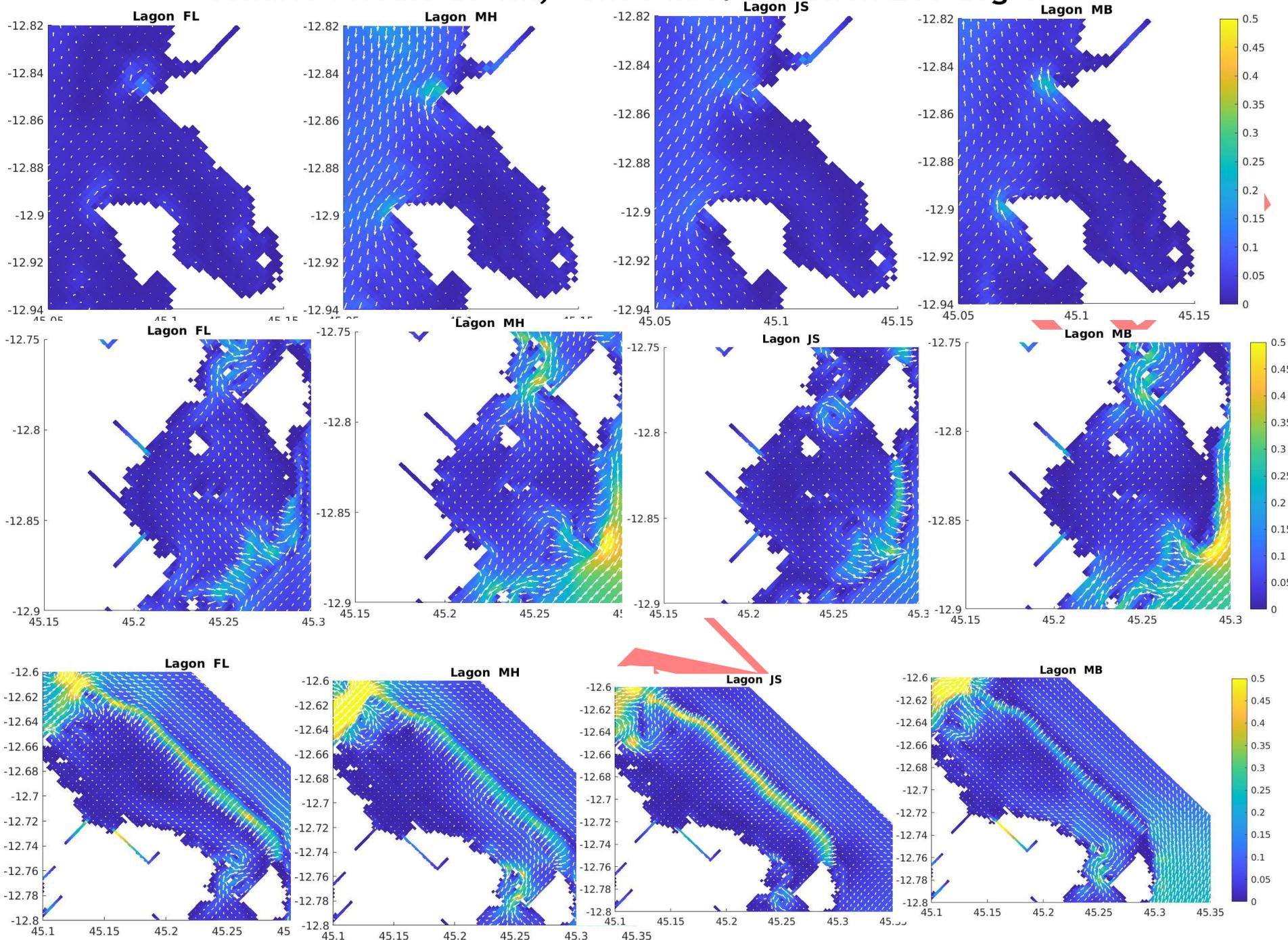
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré



NON

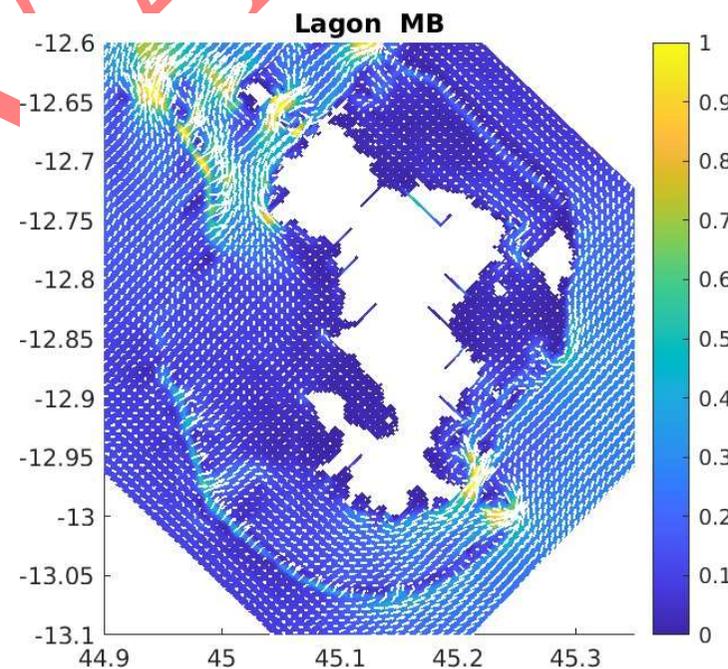
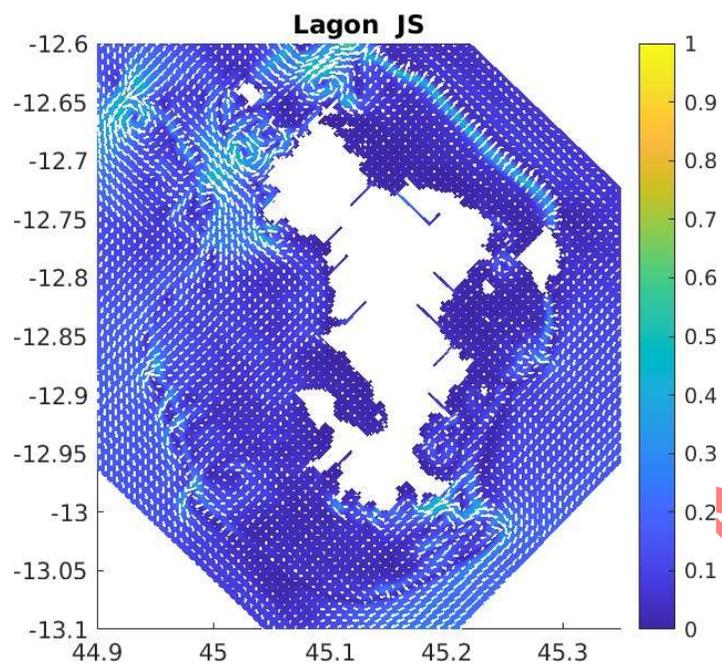
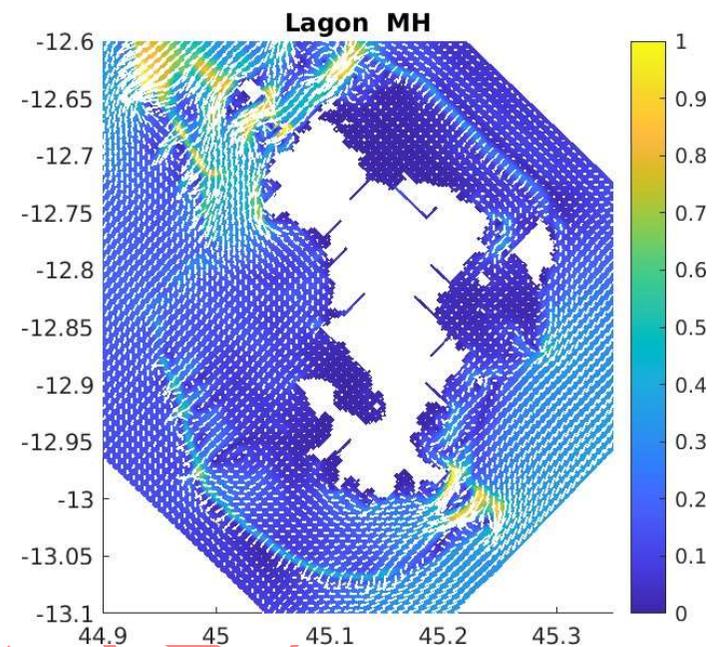
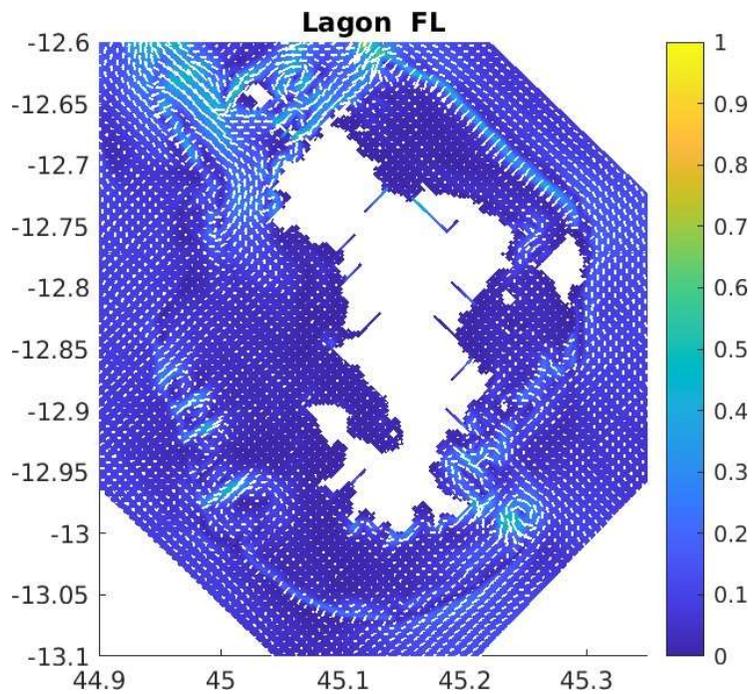
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 210 degré



NON VALIDE

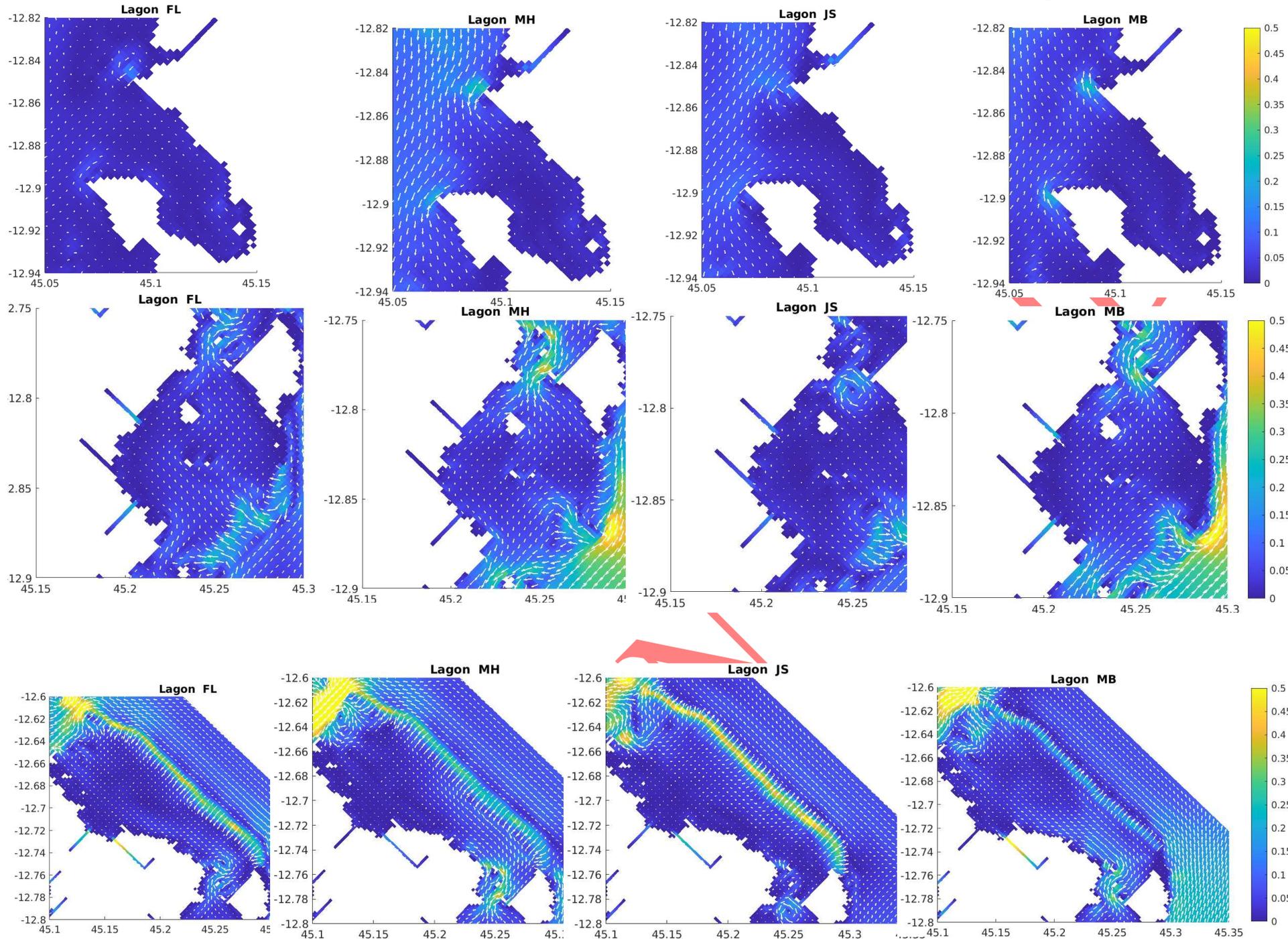
Scenario : Houle de 1m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré

Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 330 degré



NON

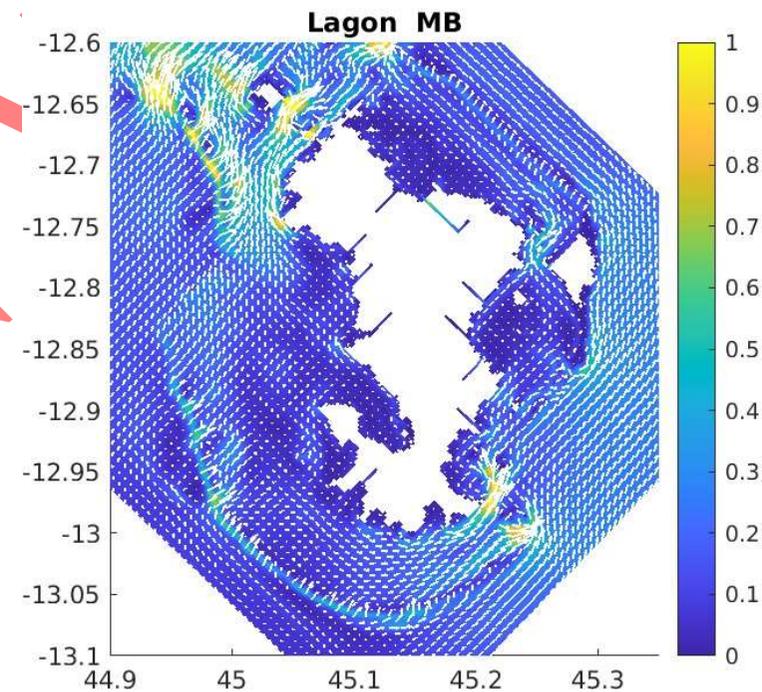
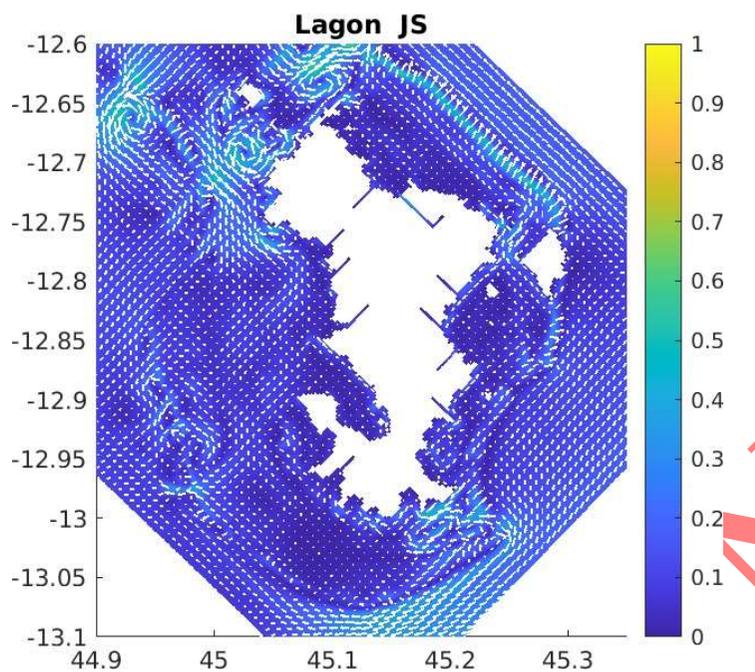
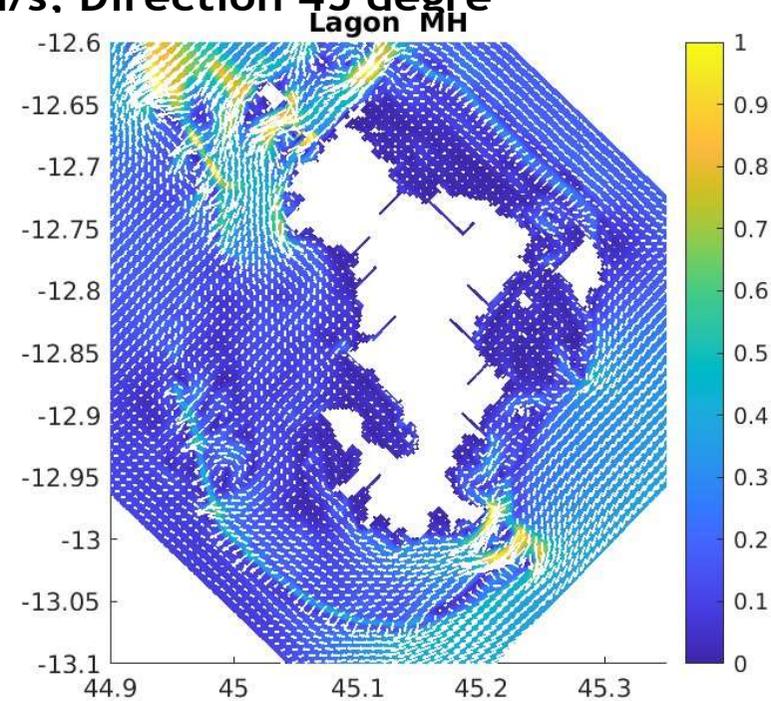
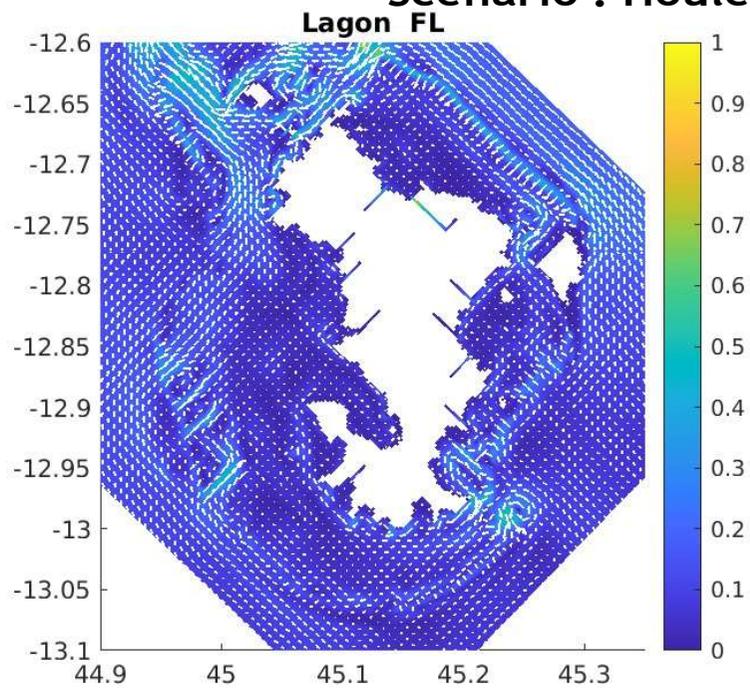
Scenario : Houle de 1m, Vent 5 m/s, Direction 330 degré



NON VALIDE

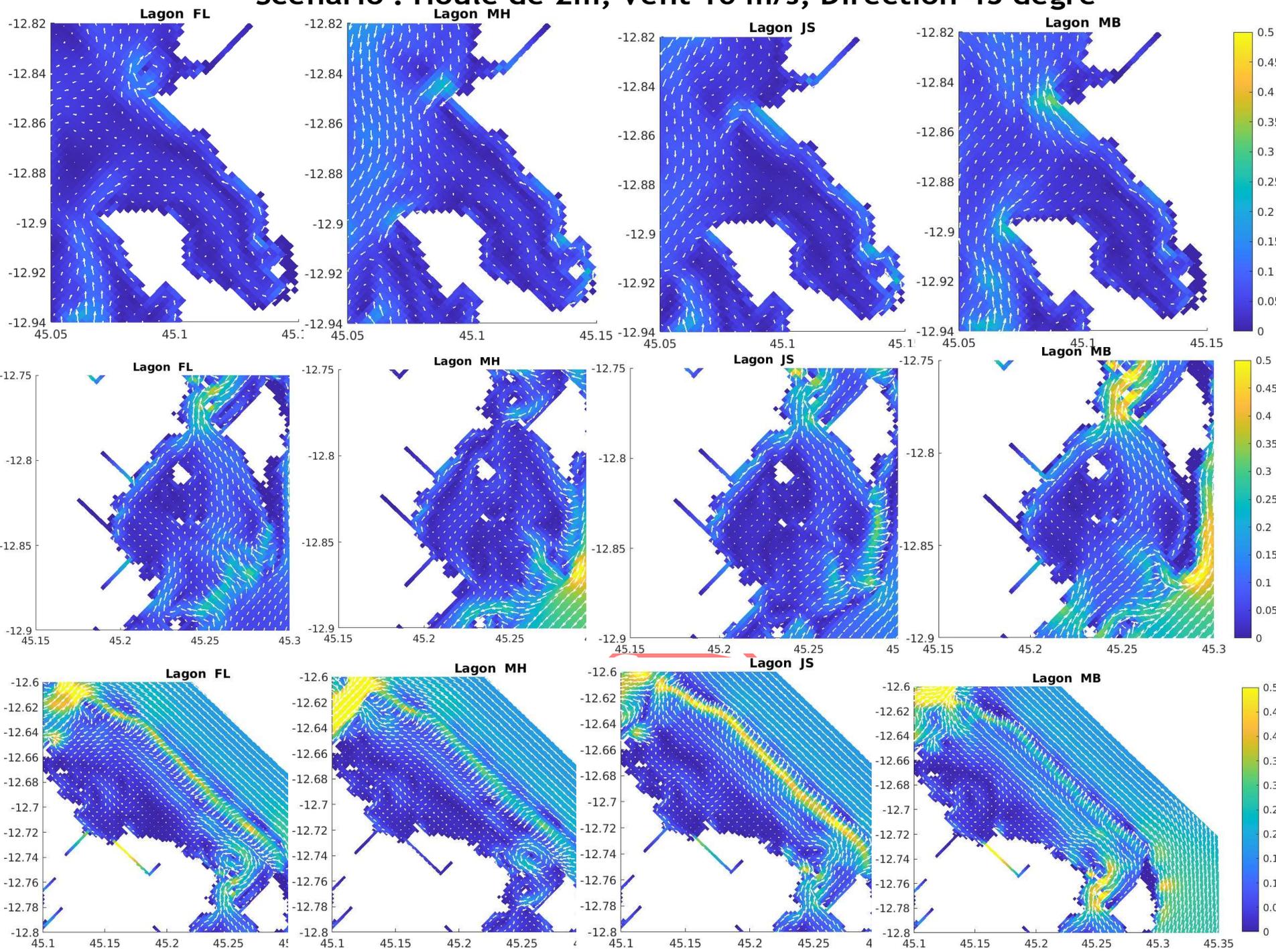
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 45 degré

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 45 degré



NON

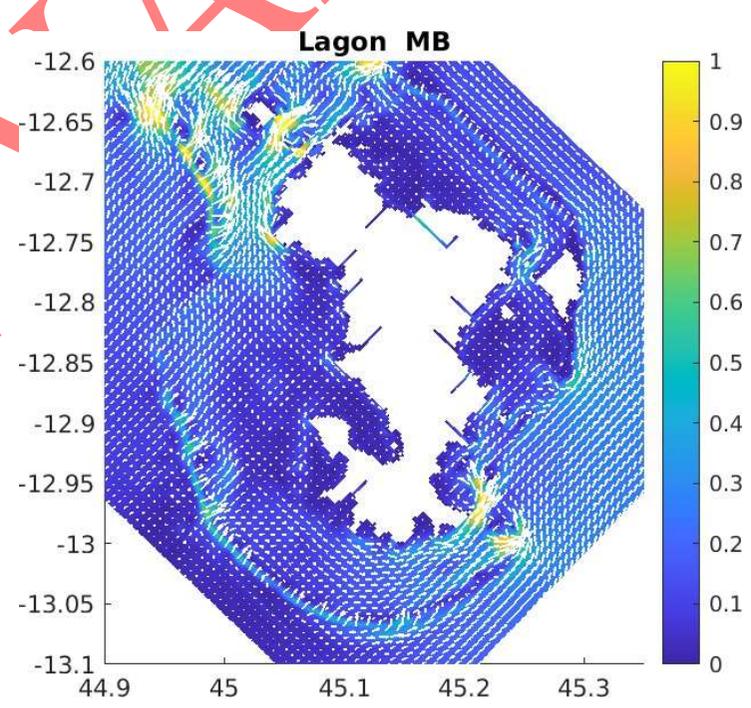
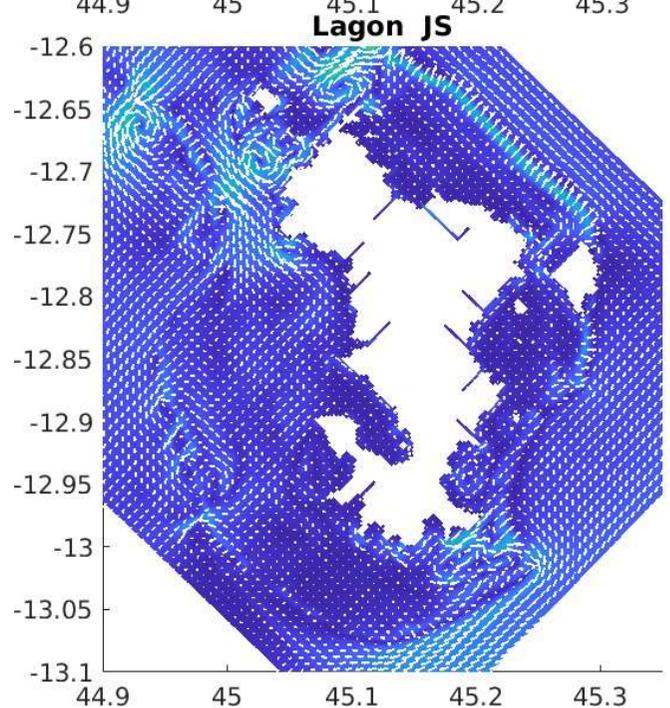
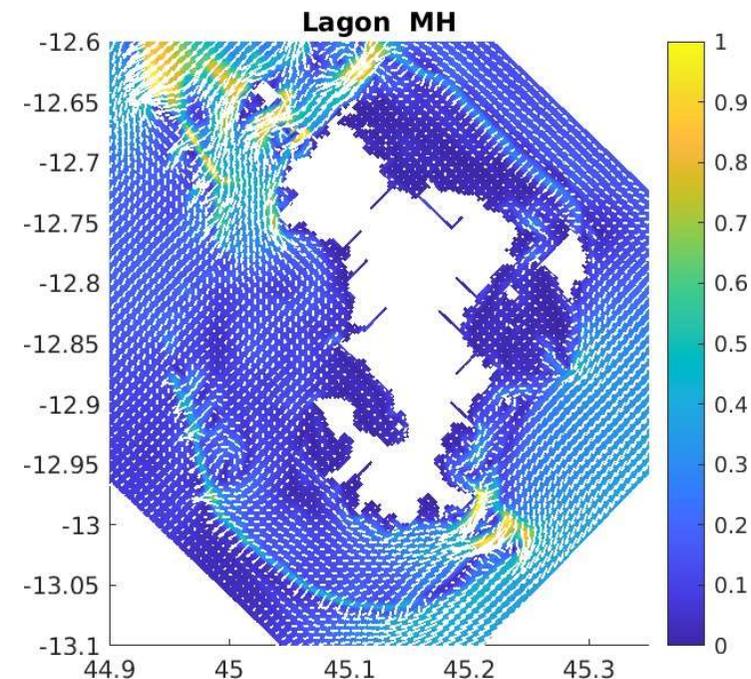
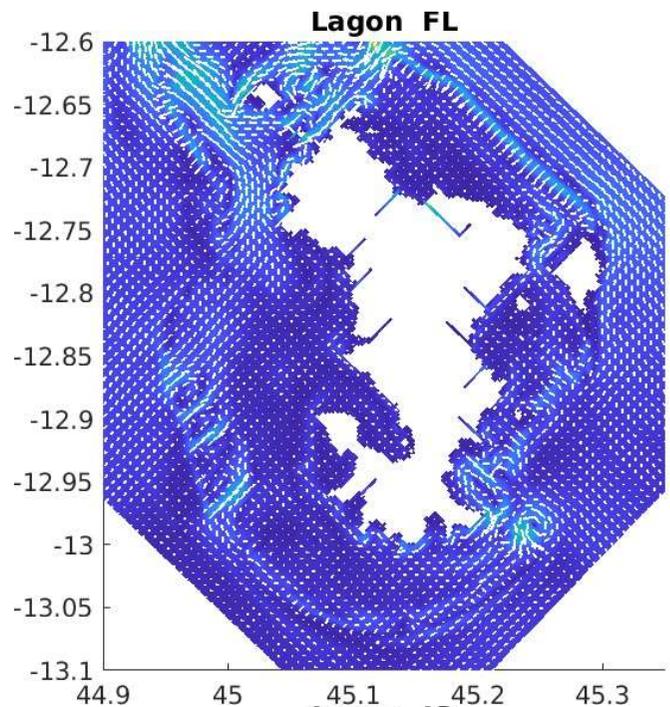
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 45 degré



NON VALIDE

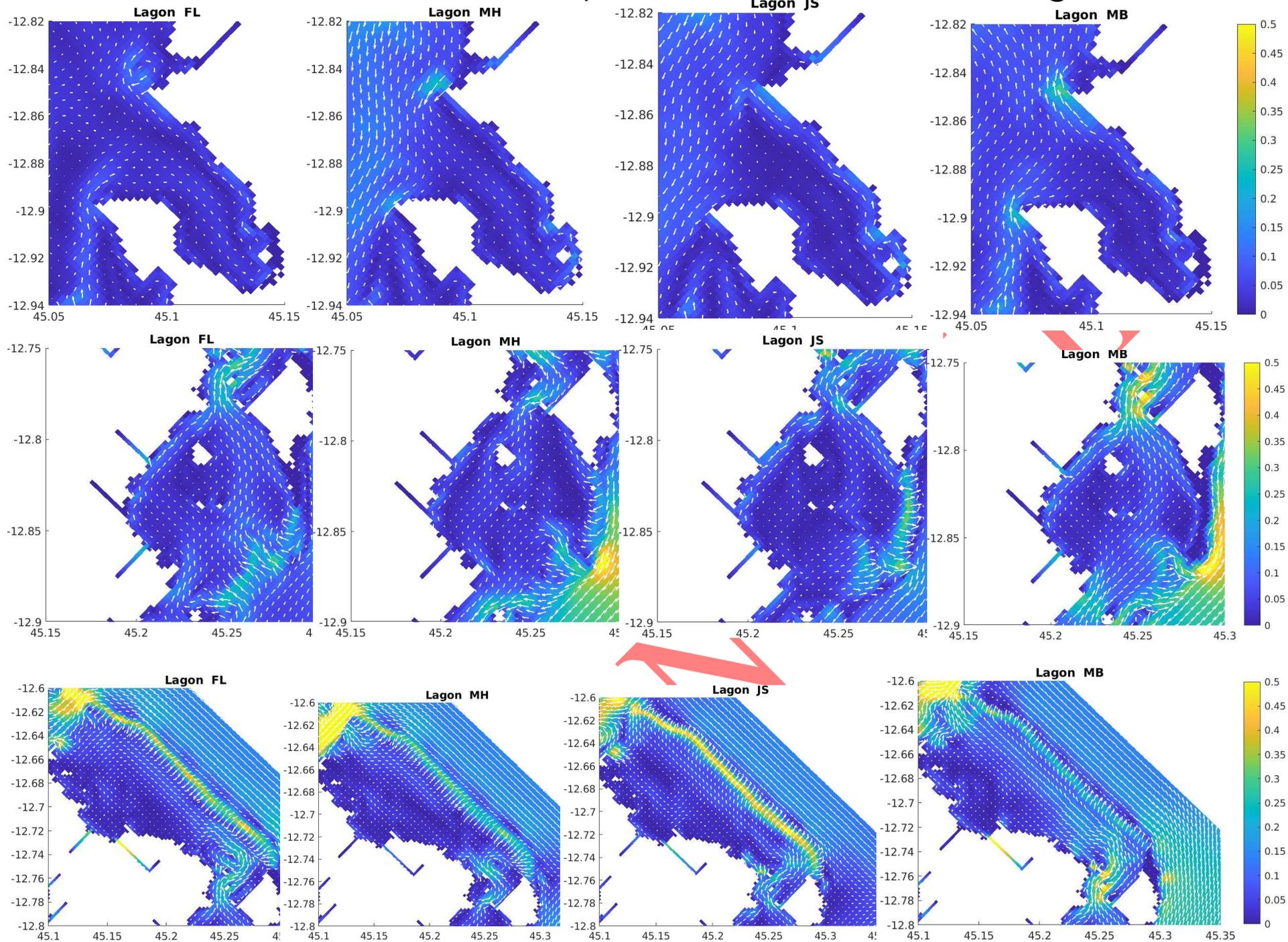
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré



NON

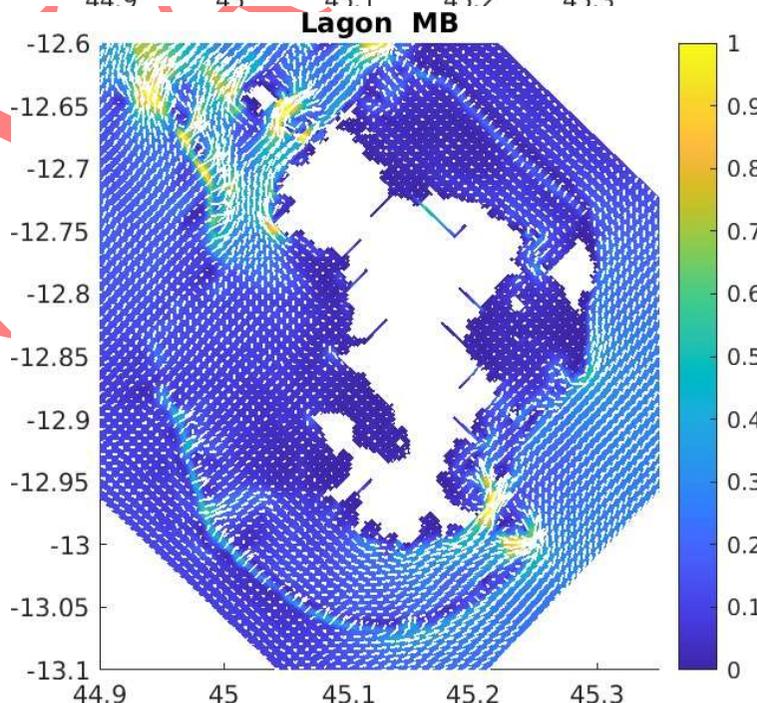
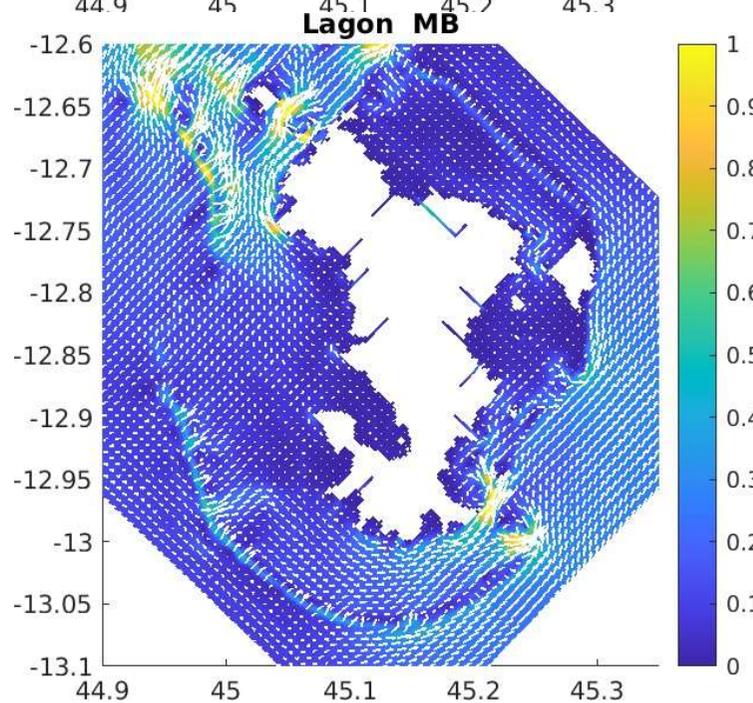
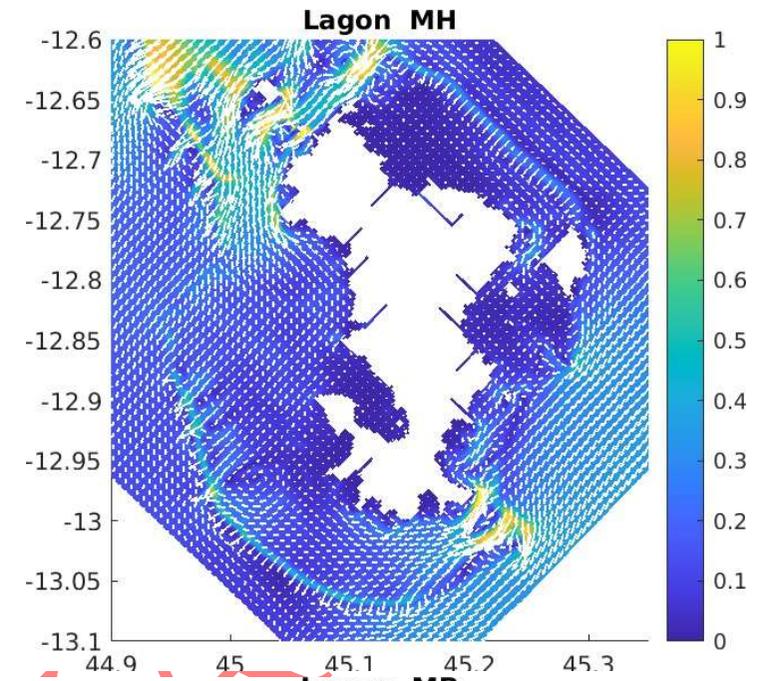
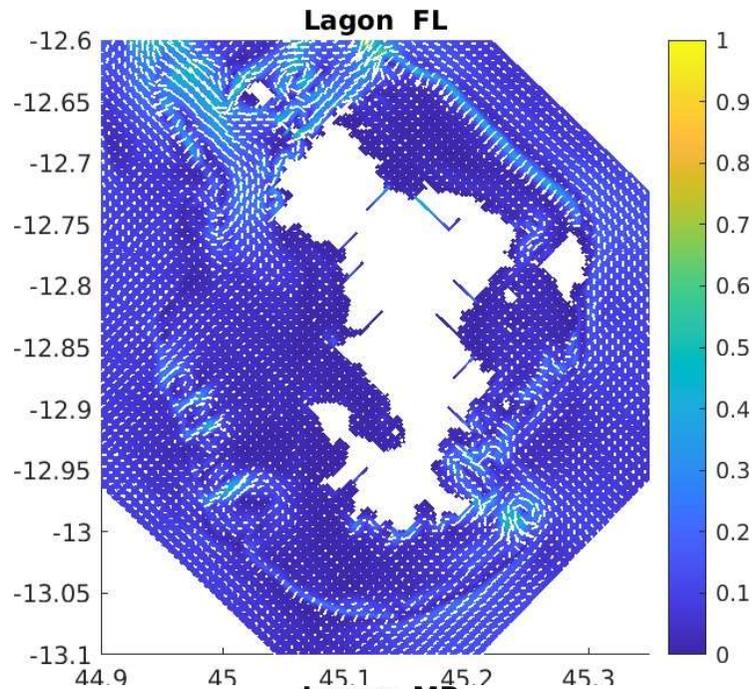
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 150 degré



NON VALIDE

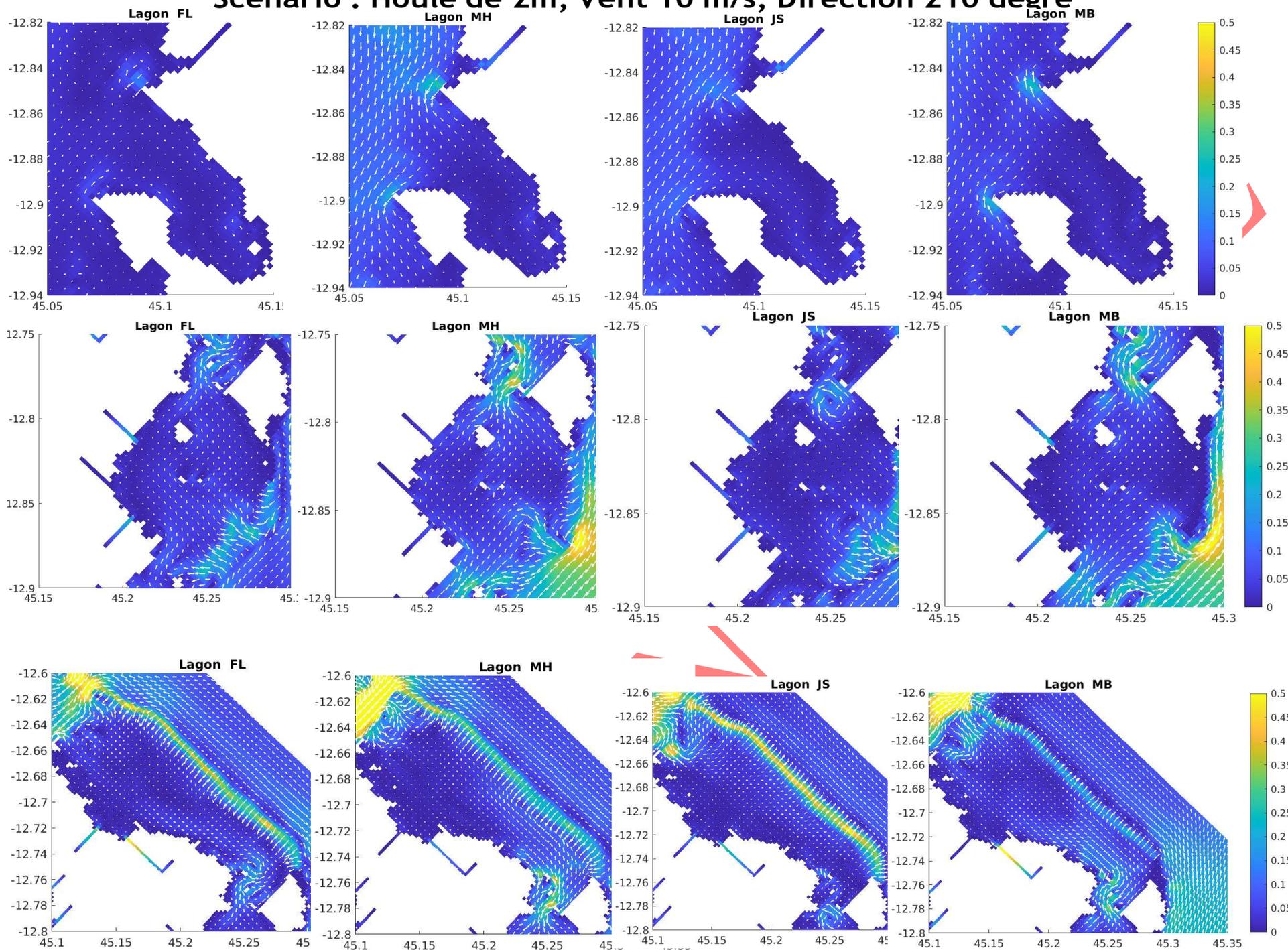
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré

Scenario : Houle de 2 m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré



NON

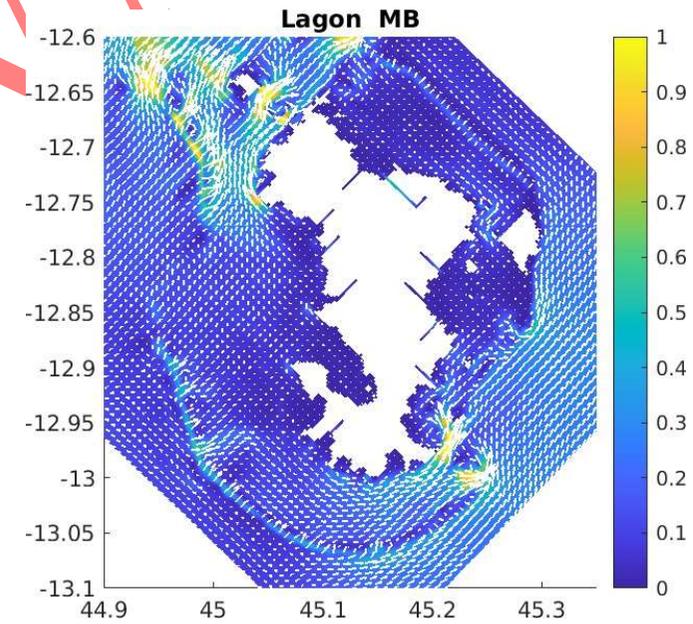
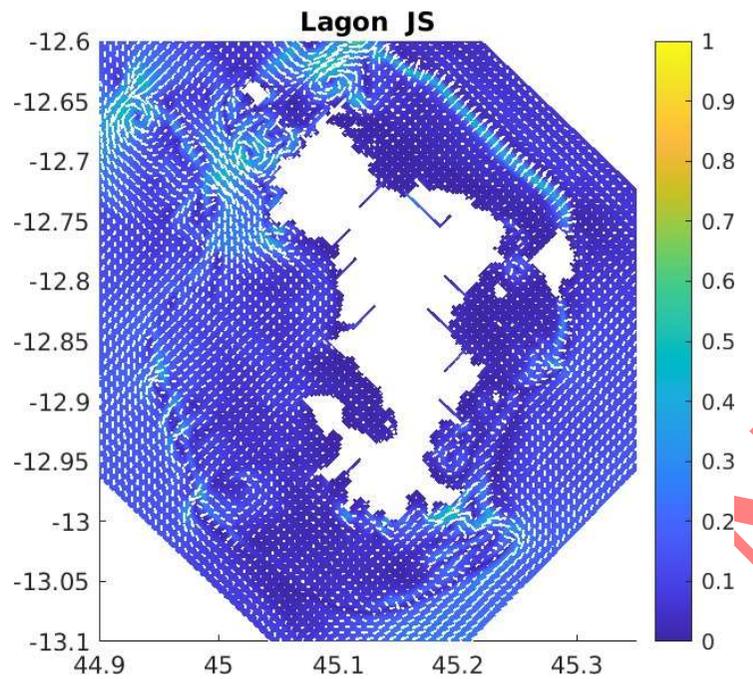
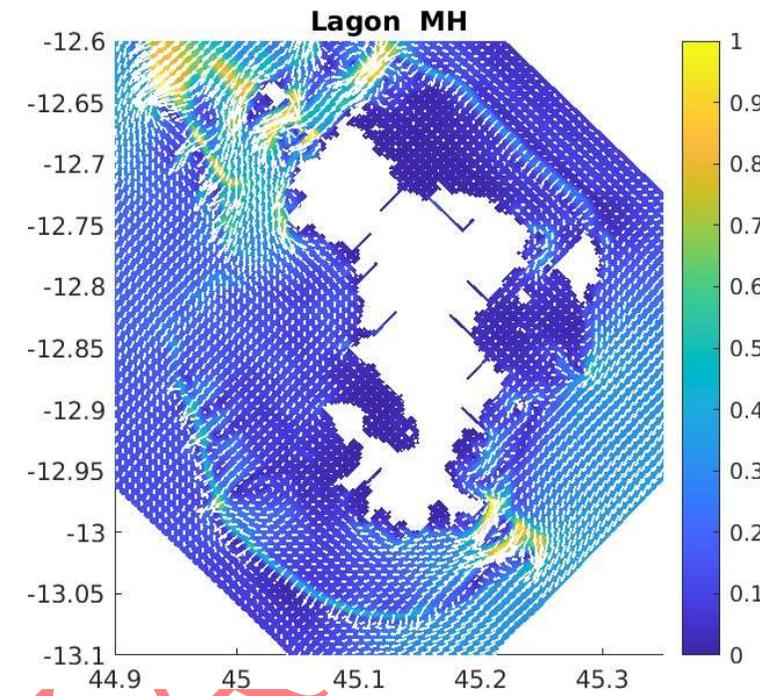
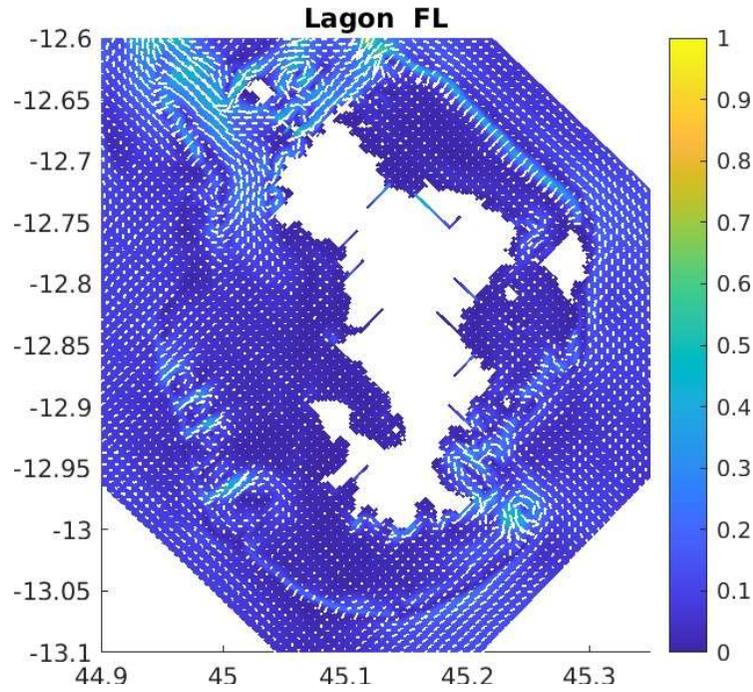
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 210 degré



Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré

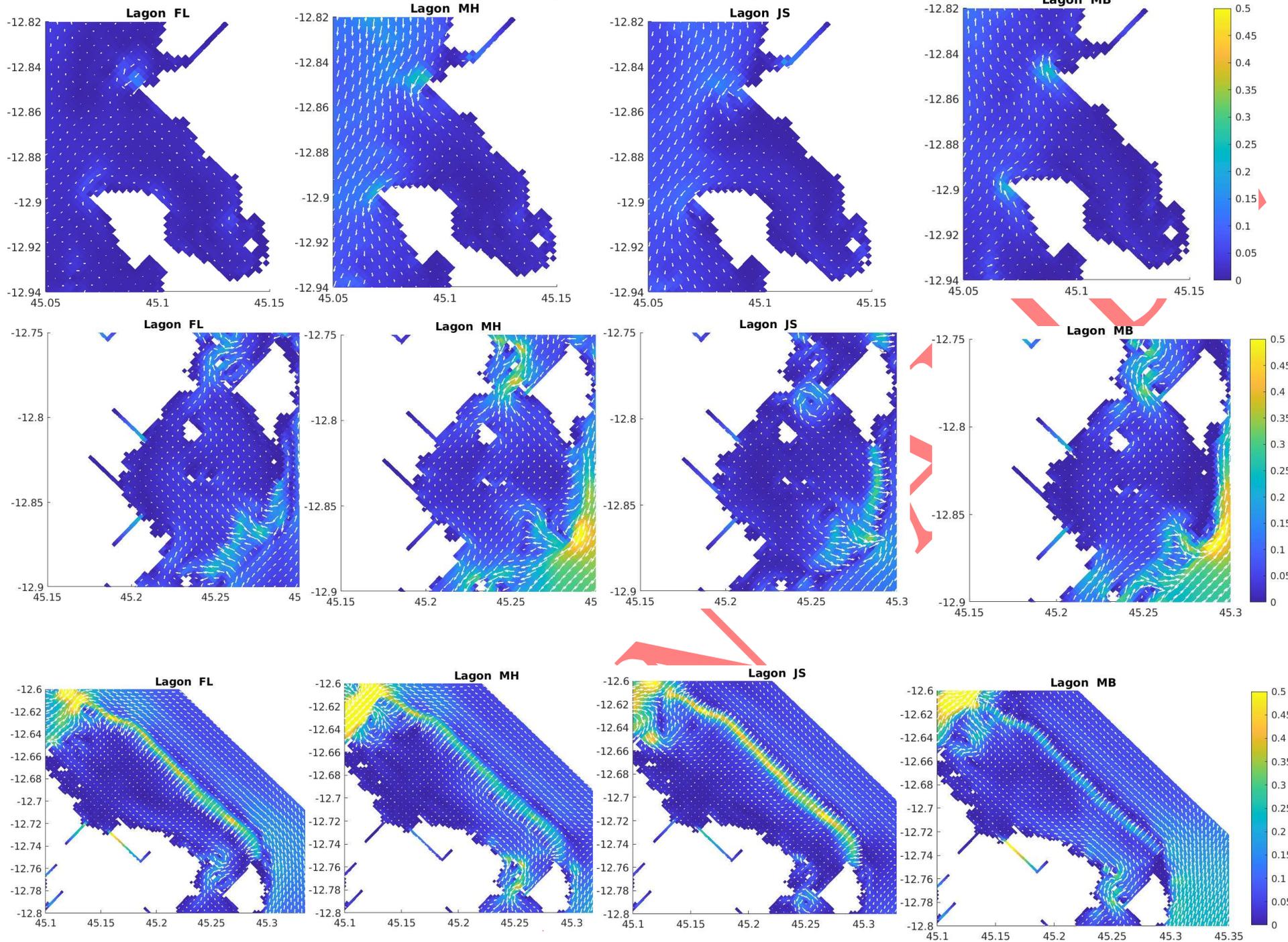
NON VALIDE

Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré



NON PAK

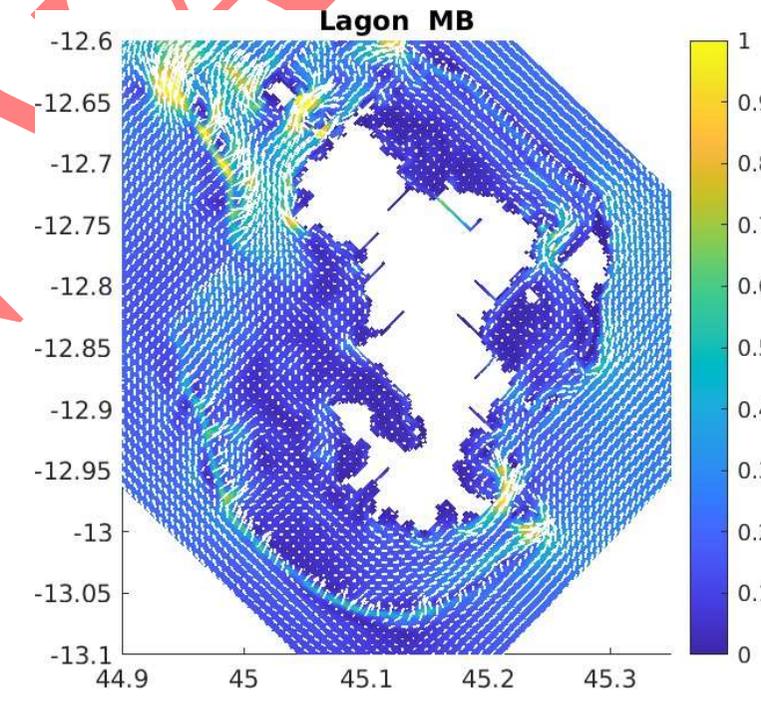
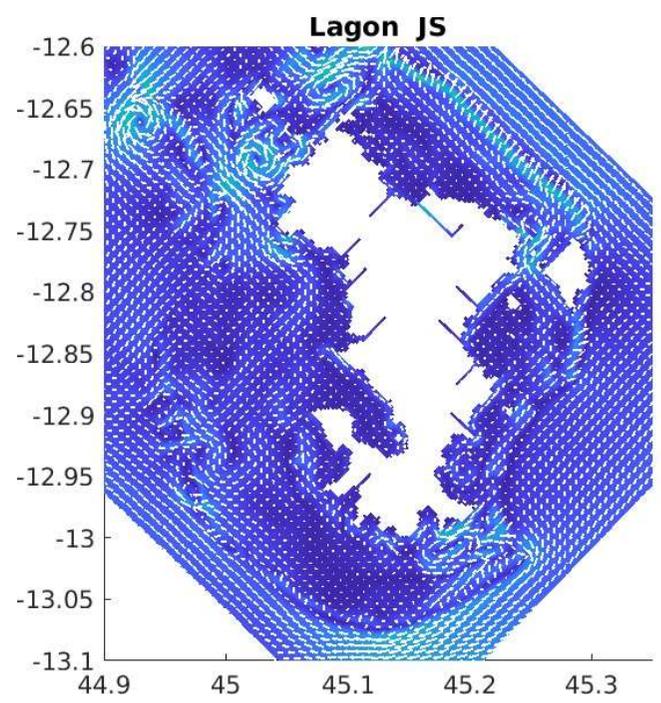
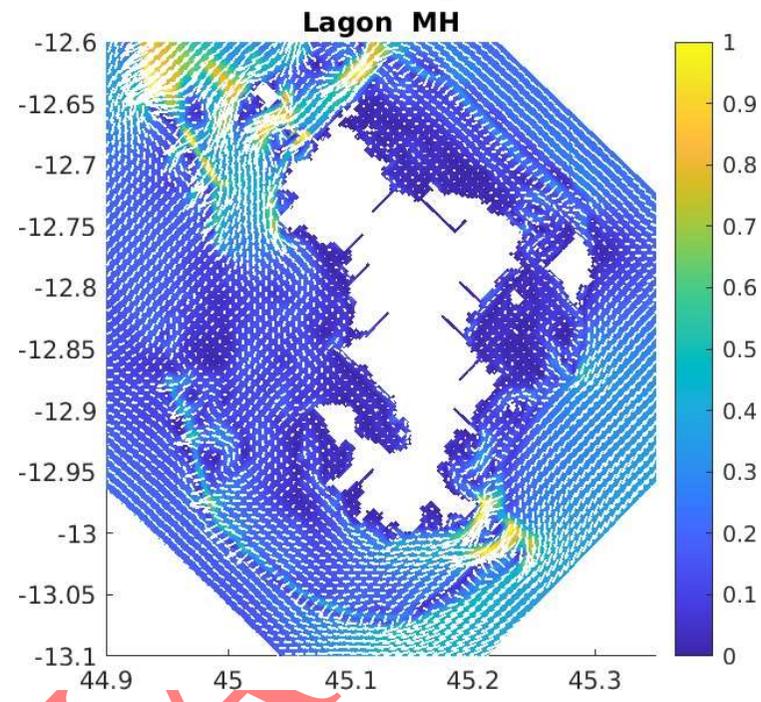
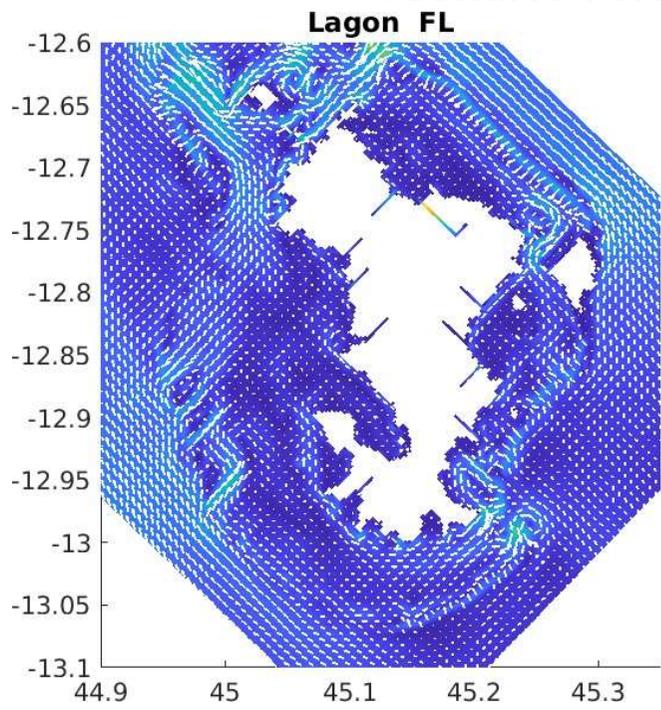
Scenario : Houle de 2m, Vent 10 m/s, Direction 330 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 150 degré

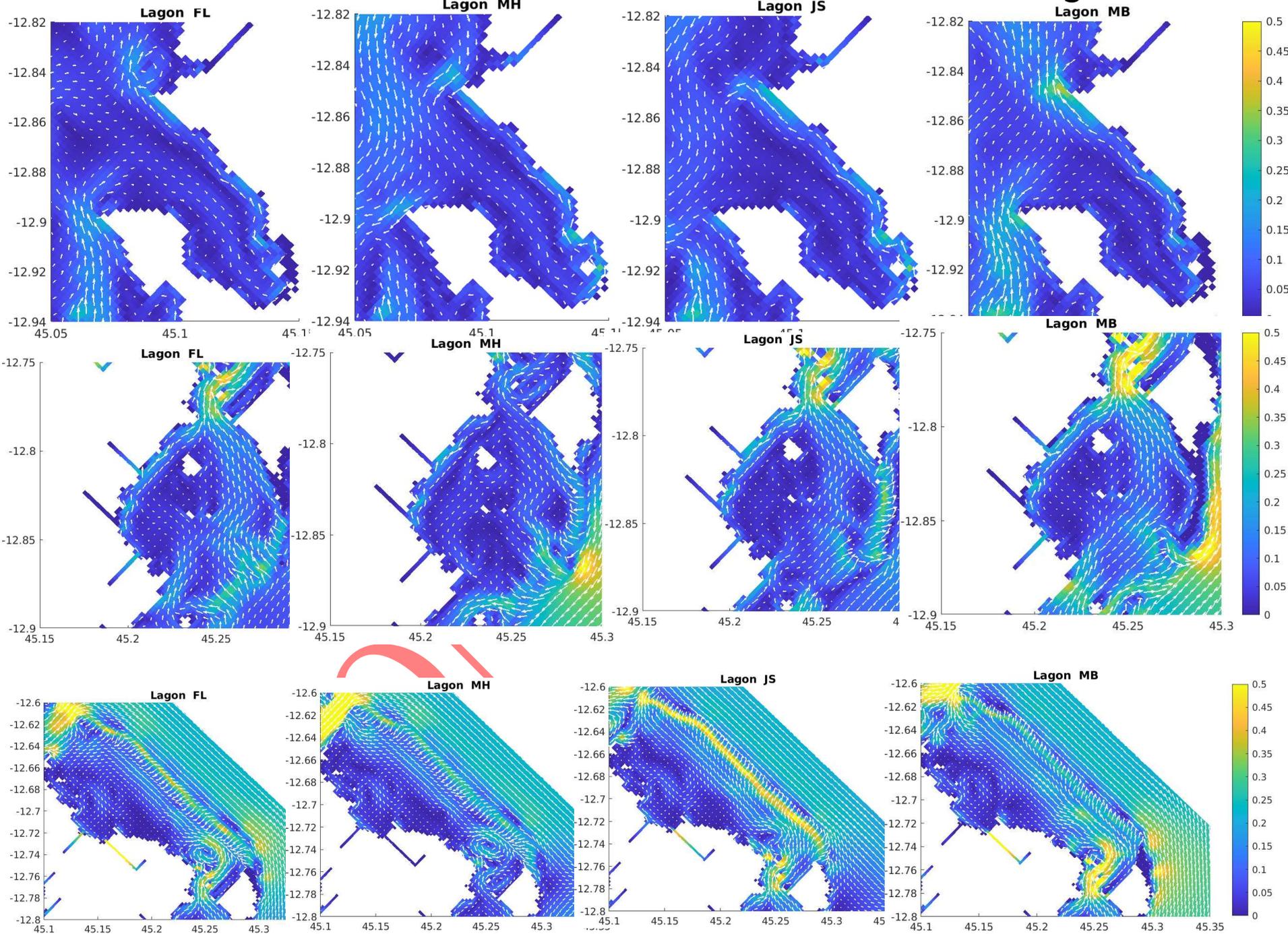
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 150 degré



NON

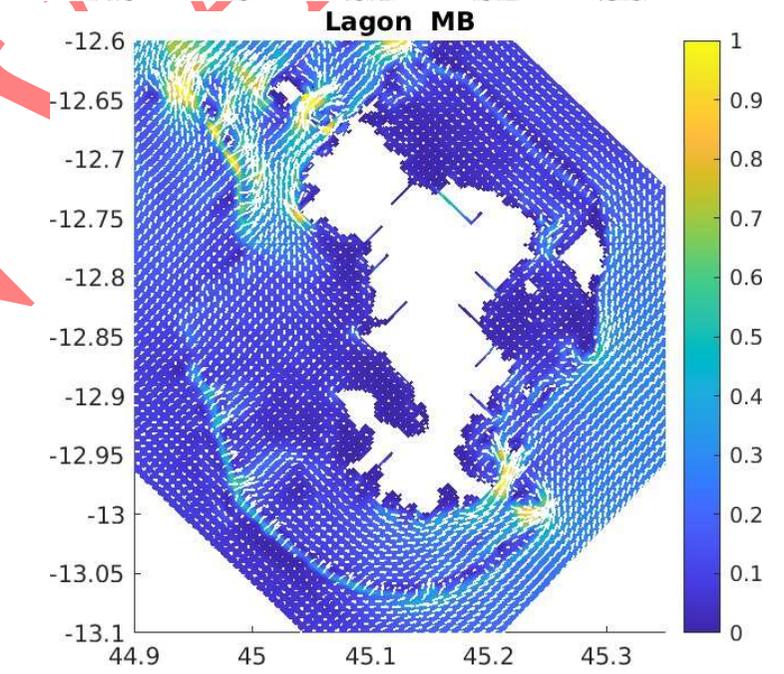
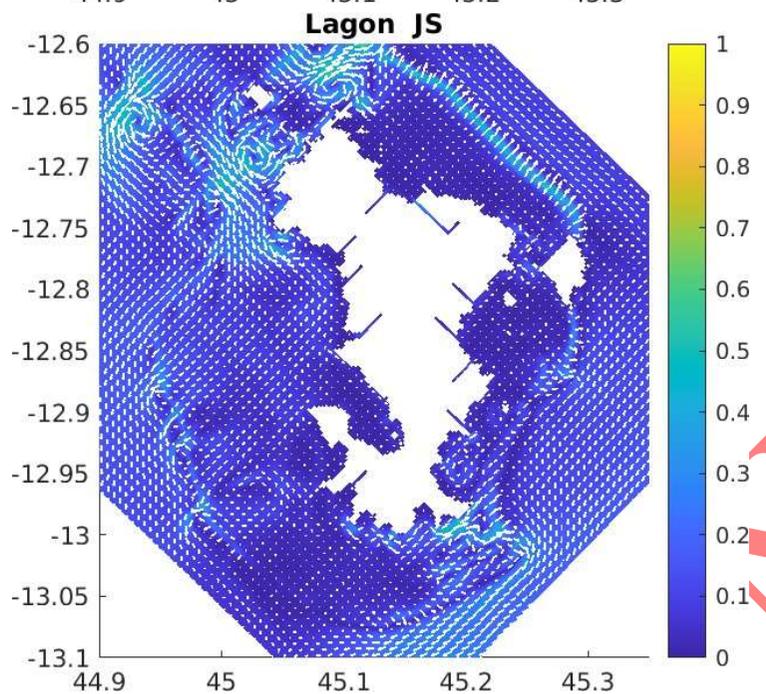
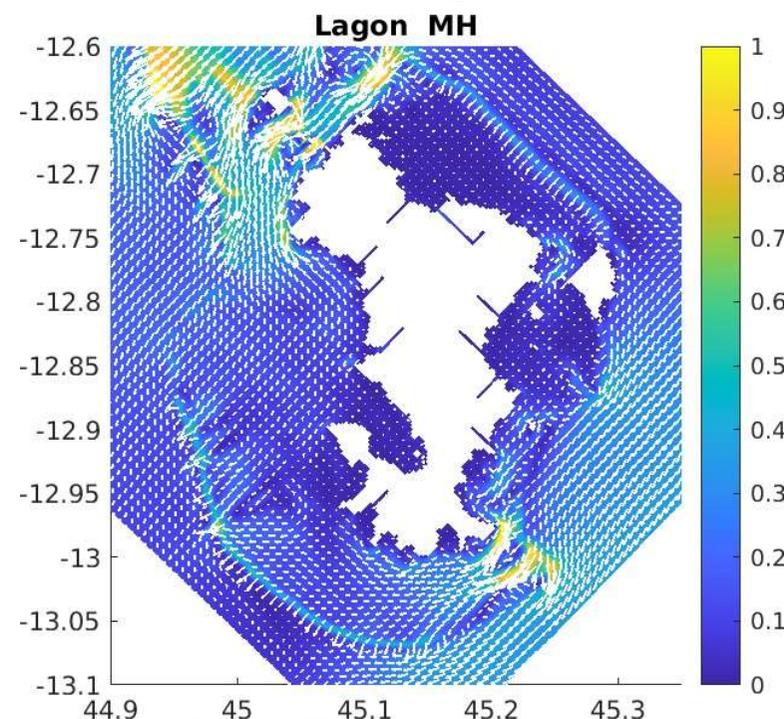
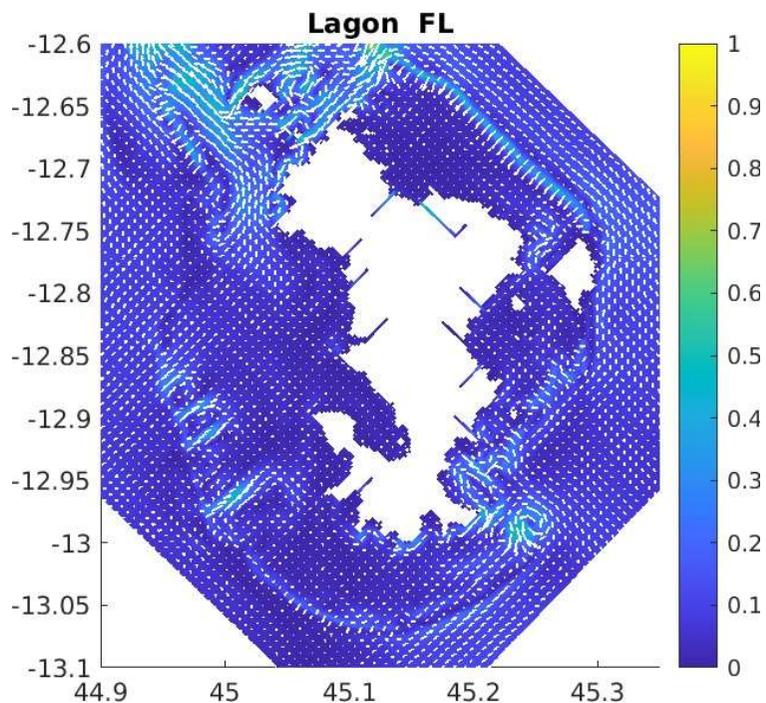
Scenario : Houle de 3m. Vent 15 m/s. Direction 150 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 210 degré

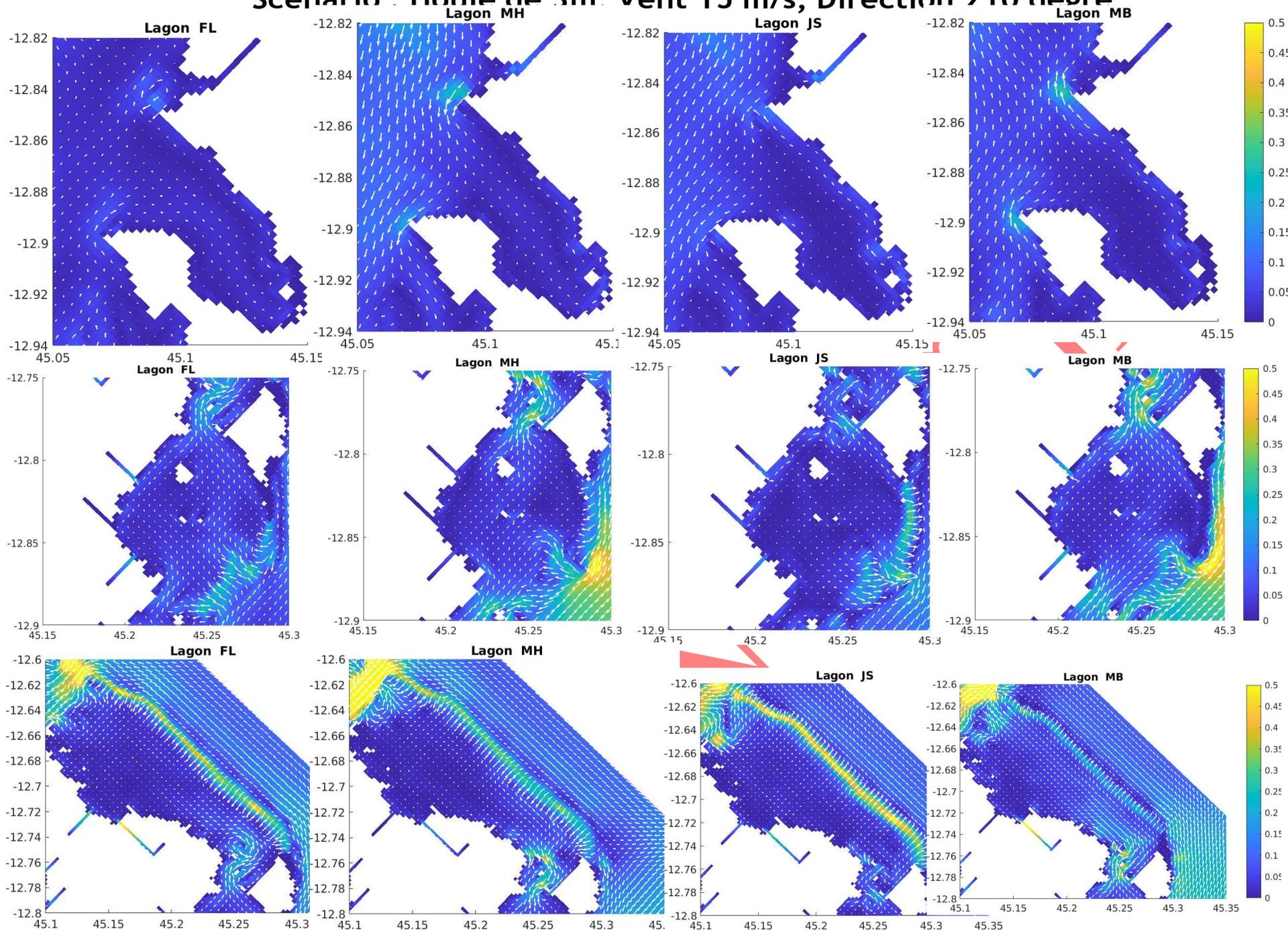
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 210 degré



NON

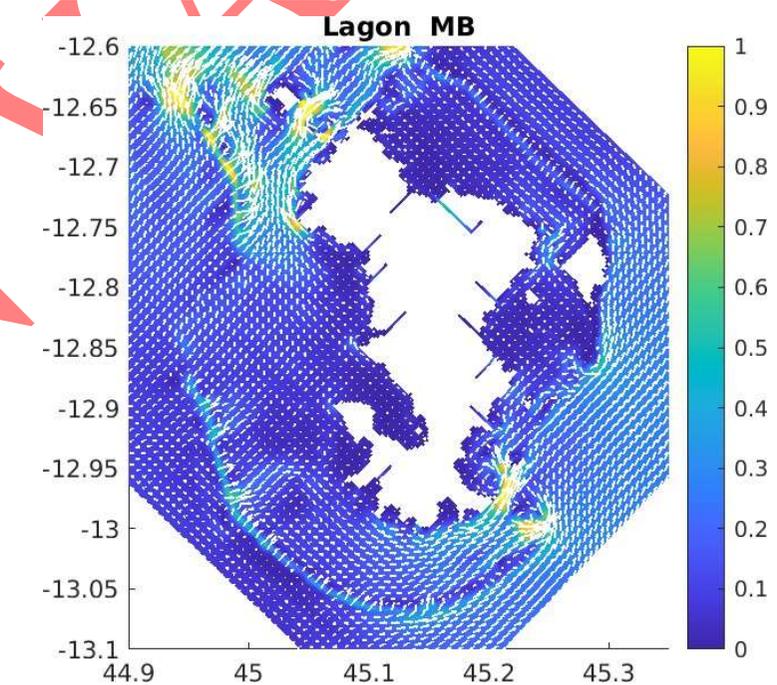
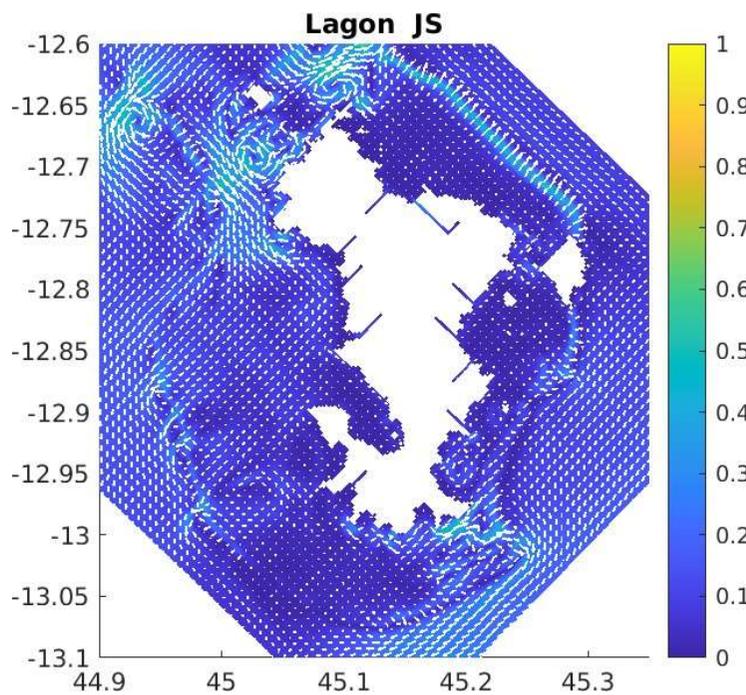
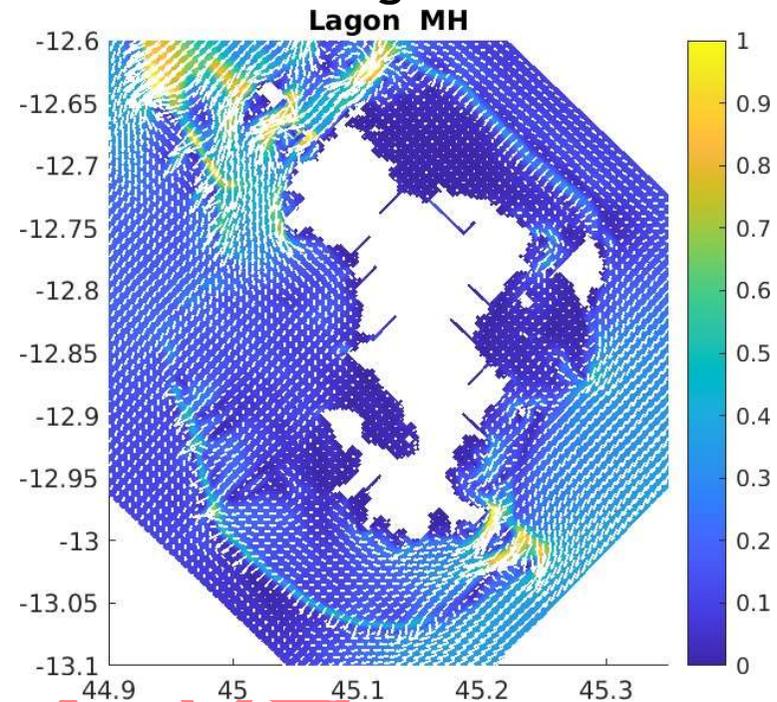
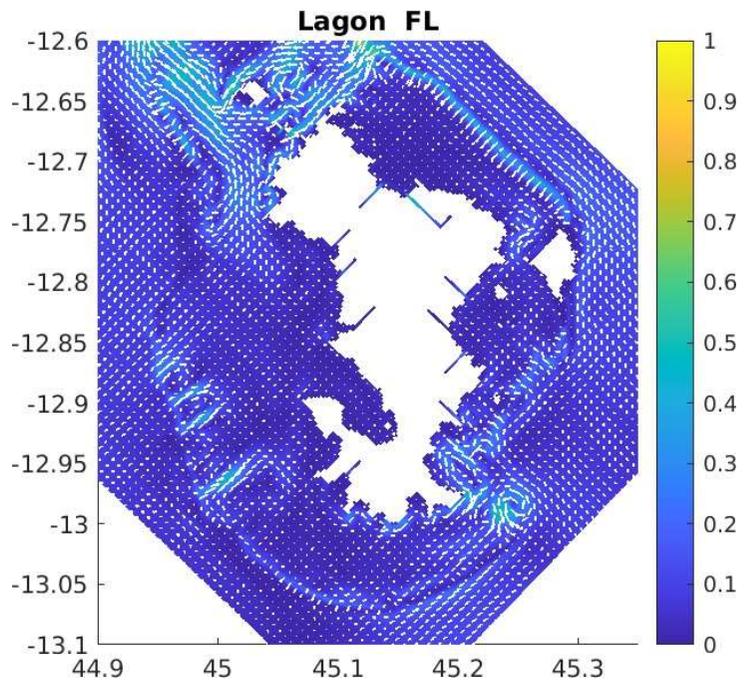
Scenario : Houle de 3m. Vent 15 m/s, Direction 210 degré



Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré

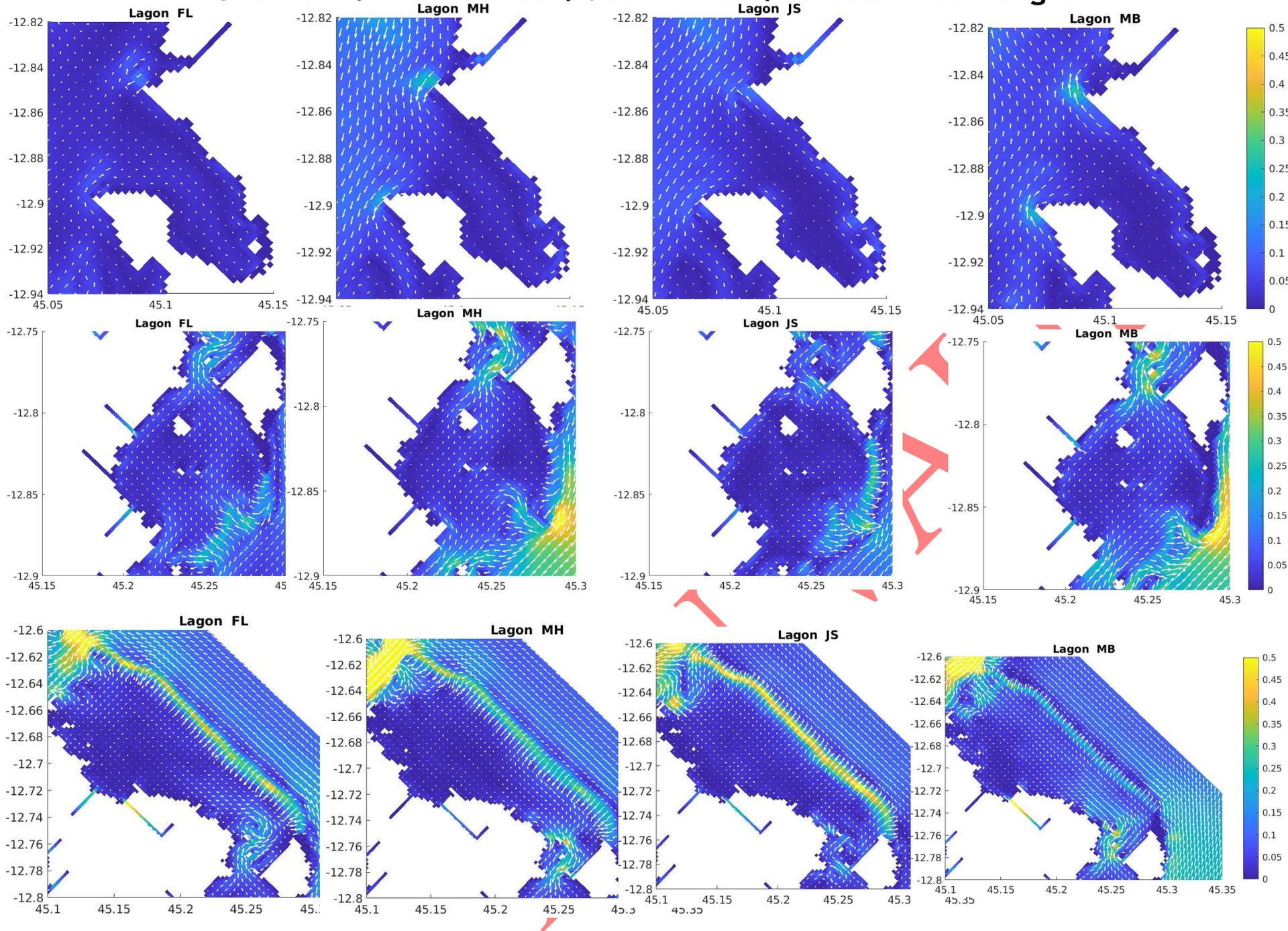
NON VALIDE

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré



NON

Scenario : Houle de 3m, Vent 15 m/s, Direction 330 degré

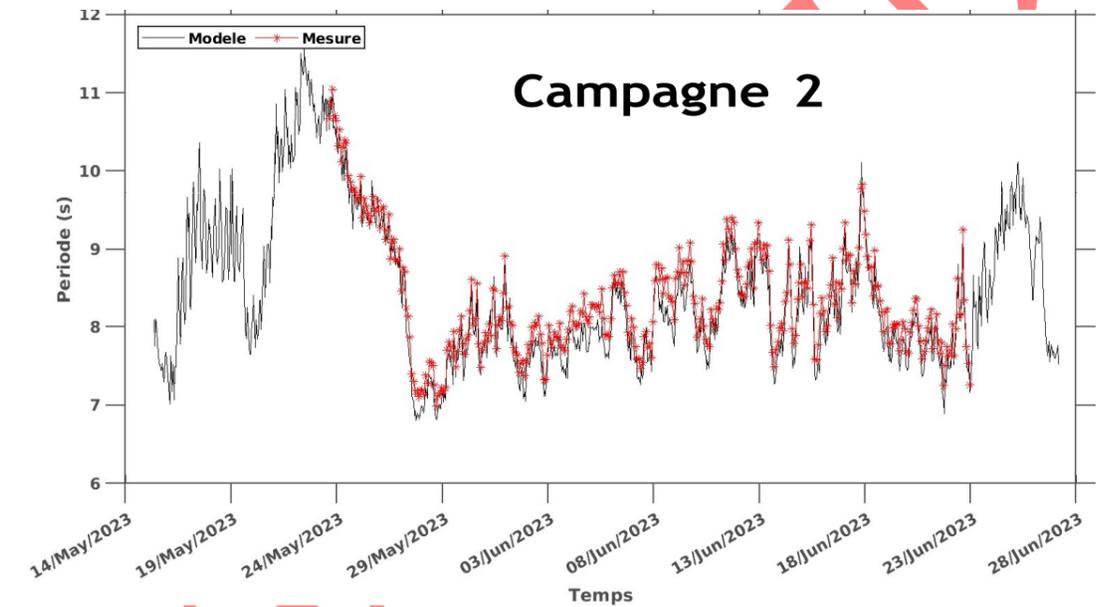
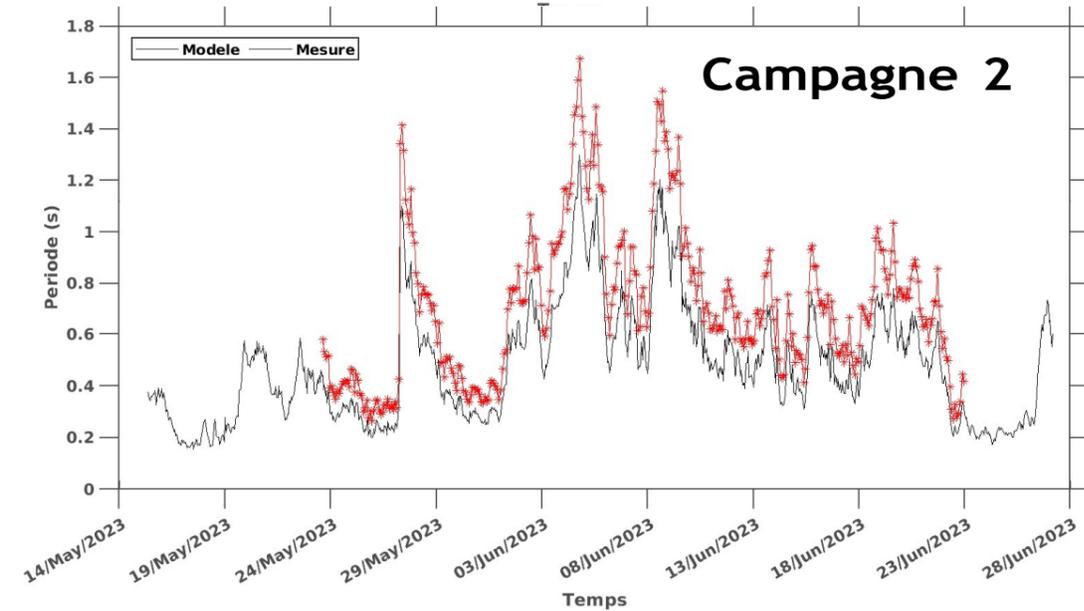
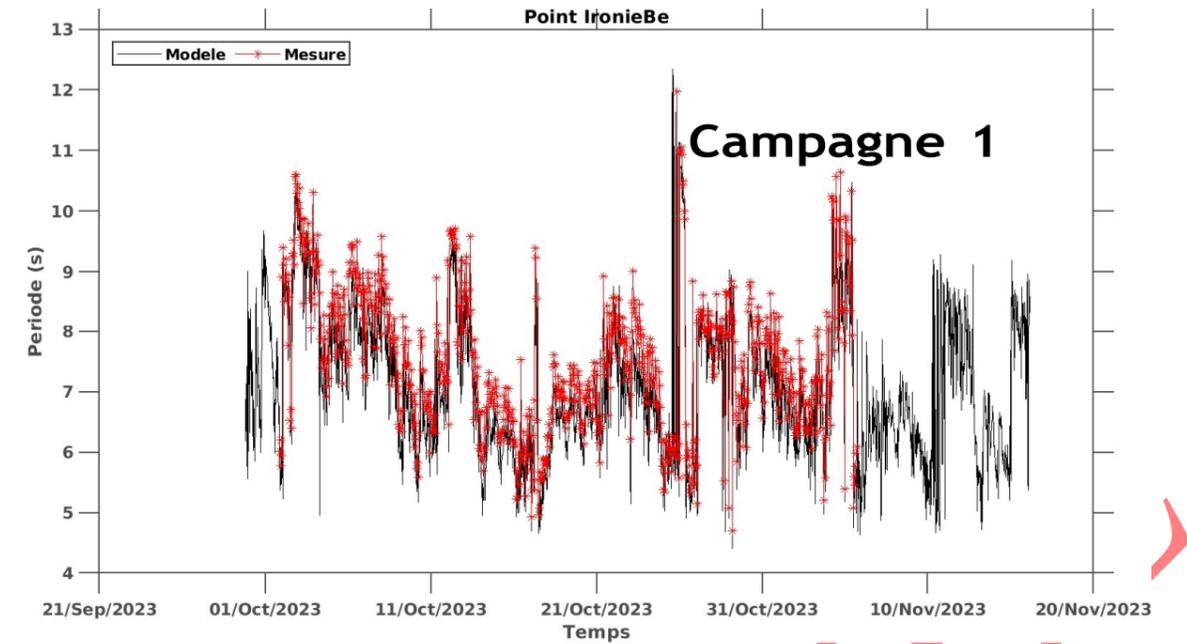
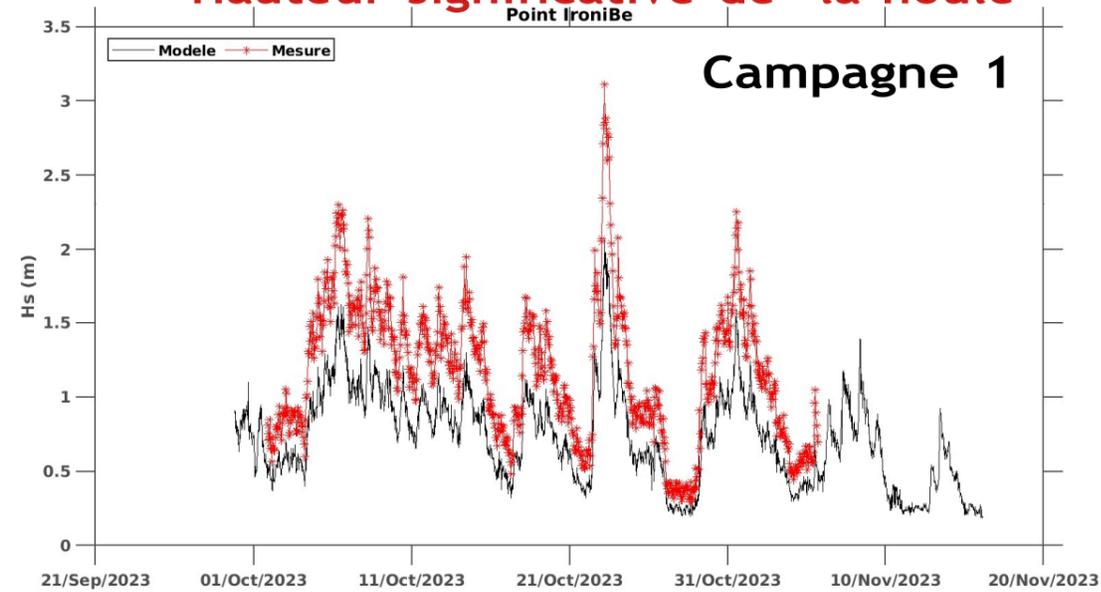


7.3 VALIDATION DU MODELE DE HOULE ET RESULTATS

NON VALIDE

Validation modèle de houle SWAN : IroniBé 2023 **Période de la houle**

Hauteur significative de la houle



NOI

